



**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

**STUDIUM TRVANLIVOSTI MODIFIKOVANÝCH  
CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ**

STUDY OF THE DURABILITY OF MODIFIED CEMENTITIOUS COMPOSITES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Bařina**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

|                         |                                                                   |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| STUDIJNÍ PROGRAM        | N3607 Stavební inženýrství                                        |
| TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| STUDIJNÍ OBOR           | 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství                         |
| PRACOVISTĚ              | Ústav technologie stavebních hmot a dílců                         |

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                         |                                                           |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|
| DIPLOMANT               | Bc. Tomáš Bařina                                          |
| NÁZEV                   | Studium trvanlivosti modifikovaných cementových kompozitů |
| VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE | doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.                            |
| DATUM ZADÁNÍ            | 31. 3. 2016                                               |
| DATUM ODEVZDÁNÍ         | 13. 1. 2017                                               |

V Brně dne 31. 3. 2016

|                                           |                                           |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| .....                                     | .....                                     |
| prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA | prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA |
| Vedoucí ústavu                            | Děkan Fakulty stavební VUT                |

## PODKLADY A LITERATURA

Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E., A., B., Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials, Construction and Building Materials, Vol. 42, 2013, p. 217–224.

Muhammad, N., Z., et al., Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches, Construction and Building Materials, Vol. 101, 2015, p. 80–90.

Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E., A., B., Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive, Construction and Building Materials, Vol. 34, 2012, p. 566–574.

Příslušné normy.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Problematika vlivu sekundární krystalizace na zvýšení trvanlivosti cementových kompozitů je stále diskutovanou otázkou. Diplomová práce bude zaměřena na ověření účinků vybraného typu přísady, která je označována jako sekundární krystalizace cementu na jemnozrnný cementový kompozit (malta). V diplomové práci proveďte:

1. Proveďte rešerši zaměřenou na problematiku přísad umožňujících sekundární krystalizaci cementu a souhrnně zpracujte doposud získané poznatky z této oblasti. Zaměřte se zejména na otázku možnosti zvýšení odolnosti vůči klimatickým vlivům a agresivním prostředím.
2. Navrhněte provedení experimentálních výzkumných prací. Proveďte návrh receptur s využitím vhodné přísady, volbu vhodných zkušebních těles a prostředí, ve kterých budou Vámi vyrobená zkušební tělesa uložena za účelem sledování jejich trvanlivosti (např. ČSN EN 1504 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí).
3. Experimentálně ověřte vlastnosti Vámi sledovaných malt a vyhodnoťte vliv vybrané přísady na trvanlivost cementové malty.
4. Za účelem objasnění Vašich experimentálních výsledků se zaměřte také na studium mikrostruktury např. pomocí analýz RDA, DTA, REM a porozimetrie.
5. Získané výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů.
6. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a rozbor problematiky s doporučením týkajícím se vhodnosti použití sekundární krystalizace cementu.

Rozsah práce 60–80 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

**VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:**

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

.....  
**doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.**

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou krystalizačních přísad používaných pro modifikaci cementových kompozitů. Je zde popsán jejich princip fungování, způsoby aplikace a zmíněni jsou také jednotliví výrobci s jejich produkty. V rámci práce byly zhotoveny zkušební vzorky s krystalizační přísadou Xypex Admix, u kterých došlo ke zkoumání mechanicko-fyzikálních vlastností v závislosti na množství krystalizační přísady, agresivním prostředí a dobou vystavení tomuto prostředí. U vybraných vzorků byly provedeny analýzy RTG, DTA, REM a porozimetrie pro podrobnější zkoumání mikrostruktury.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

krystalizační přísada, sekundární krystalizace, hydroizolace, mikrostruktura

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with crystallization additives used to modify cement composites. Describes their principle of operation, application methods and also mentions the different manufacturers with their products. In this work were made test samples with Xypex Admix crystallization additive which were tested for mechanical and physical properties depending on the amount of crystallization additives, aggressive environment and the duration of exposure in this environment. Selected samples were analyzed with RTG, DTA, SEM and porosimetry for detailed examination of the microstructure.

## **KEYWORDS**

crystallization additive, secondary crystallization, waterproofing, microstructure

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Tomáš Bařina *Studium trvanlivosti modifikovaných cementových kompozitů*. Brno, 2017. 105 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 12. 1. 2017

---

**Bc. Tomáš Bařina**  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucí diplomové práce doc. Ing. Nikol Žižkové, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování. Dále bych rád poděkoval Bc. Petru Zaťkovi a paní Blance Bártové za ochotu a výpomoc v laboratoři. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

## Obsah

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Úvod.....                                                  | 11 |
| Cíl .....                                                  | 12 |
| Teoretická část .....                                      | 13 |
| 1 TRVANLIVOST KONSTRUKCÍ NA CEMENTOVÉ BÁZI .....           | 13 |
| 1.1 Degradace cementových kompozitů .....                  | 14 |
| 1.1.1 Fyzikální koroze.....                                | 14 |
| 1.1.2 Chemická koroze.....                                 | 15 |
| 1.1.3 Biologická koroze .....                              | 21 |
| 1.2 Ochrana proti degradaci cementových kompozitů .....    | 22 |
| 1.2.1 Primární ochrana .....                               | 22 |
| 1.2.2 Sekundární ochrana.....                              | 22 |
| 2 KRYSTALIZAČNÍ PŘÍSAKY .....                              | 23 |
| 2.1 Samoregenerační schopnost .....                        | 23 |
| 2.2 Funkční princip.....                                   | 24 |
| 2.3 Způsoby použití .....                                  | 26 |
| 2.3.1 Nátěry a nástřiky .....                              | 26 |
| 2.3.2 Vsypy .....                                          | 27 |
| 2.3.3 Tmely .....                                          | 27 |
| 2.3.4 Přísady.....                                         | 28 |
| 2.4 Výrobci krystalizačních přísad a jejich produkty ..... | 29 |
| 2.4.1 Moramis s.r.o. ....                                  | 29 |
| 2.4.2 Redrock Construction s.r.o.....                      | 33 |
| 2.4.3 Sika AG.....                                         | 36 |
| 2.4.4 Nekap s.r.o. ....                                    | 38 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Praktická část .....                                                                 | 41 |
| 3 METODIKA PRÁCE .....                                                               | 41 |
| 3.1 Popis použitých surovin .....                                                    | 42 |
| 3.1.1 Balený portlandský cement CEM I 42,5 R .....                                   | 42 |
| 3.1.2 Normalizovaný křemenný písek CEN .....                                         | 42 |
| 3.1.3 Krystalizační přísada Xypex Admix .....                                        | 43 |
| 3.1.4 Polypropylenová vlákna Fibrin 3/15 .....                                       | 44 |
| 3.2 Popis prováděných zkoušek .....                                                  | 44 |
| 3.2.1 Stanovení objemové hmotnosti .....                                             | 44 |
| 3.2.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu .....                                       | 45 |
| 3.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku .....                                               | 45 |
| 3.2.4 Mrazuvzdornost .....                                                           | 46 |
| 3.2.5 Rentgenová difrakční analýza – RTG .....                                       | 46 |
| 3.2.6 Diferenční termická analýza – DTA .....                                        | 46 |
| 3.2.7 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie .....                                         | 47 |
| 3.2.8 Rastrovací elektronová mikroskopie – REM .....                                 | 47 |
| 4 1. ETAPA .....                                                                     | 48 |
| 5 2. ETAPA .....                                                                     | 50 |
| 5.1 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 28 dní v jednotlivých prostředích .....  | 50 |
| 5.2 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 90 dní v jednotlivých prostředích .....  | 56 |
| 5.3 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 180 dní v jednotlivých prostředích ..... | 62 |
| 6 3. ETAPA .....                                                                     | 69 |
| 6.1 Vyhodnocení diferenční termické analýzy .....                                    | 69 |
| 6.2 Vyhodnocení rentgenové difrakční analýzy .....                                   | 71 |
| 6.3 Vyhodnocení vysokotlaké rtuťové porozimetrie .....                               | 71 |
| 6.4 Vyhodnocení rastrovací elektronové mikroskopie .....                             | 76 |

|    |                                            |    |
|----|--------------------------------------------|----|
| 7  | DISKUZE A SHRnutí DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ..... | 81 |
| 8  | ZÁVĚR .....                                | 85 |
| 9  | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....             | 86 |
| 10 | SEZNAM PŘÍLOH.....                         | 89 |
| 11 | PŘÍLOHA Č. 1 - DTA A RTG ZÁZNAMY .....     | 90 |

## ÚVOD

Každá stavba je v určité míře vystavena nepříznivým účinkům, které mají za následek jejich postupnou korozi a degradaci. Technologie stavebního procesu se stále vyvíjejí a zlepšují, čímž dochází k vytvoření konstrukcí odolnějších proti nepříznivým vlivům. Může se jednat o atmosférické vlivy a chemické či mechanické namáhání.

Beton a malta jsou v dnešní době jedny z nejpoužívanějších stavebních materiálů. Z toho důvodu je veliký zájem o zajištění jejich dlouholeté životnosti a snížení nákladů na zhotovení. Trvanlivost těchto materiálů můžeme zajistit vhodným složením při výrobě, technologií při vlastním zhotovení a také následnou ochranou a ošetřováním.

Zatížení konstrukce korozními procesy je často s přítomností vody, která agresivní látky rozpouští a slouží jako transportní médium, čímž dochází k reakcím způsobující postupnou degradaci. Jednou z technologií, která zvyšuje vodonepropustnost a tím pomáhá tyto konstrukce chránit, jsou systémy založené na silikátových hydroizolačních materiálech s krystalizačními účinky (zkráceně sekundární krystalizace). Ta zajišťuje ochranu proti vodě a chemicky agresivním účinkům díky schopnosti pronikat do struktury materiálu a následně utěsnit volné póry a kapiláry nerozpustnými krystaly. Korodující látky poté nemohou do materiálu pronikat a následně reagovat se složkami cementového tmelu, čímž je zajištěna jejich ochrana. Různé aplikace těchto krystalizačních přísad nabízejí ochranu jak u nově dokončených konstrukcí, tak i konstrukcí starších. Jedná se o práškové směsi skládající se především z velmi jemně mletého portlandského cementu, menšího množství jemného křemenného písku a speciálních přísad. Tento podíl se mění podle jednotlivých typů výrobku a konkrétního výrobce.

## CÍL

Cílem diplomové práce je v její teoretické části vypracovat obecnou rešerši, která se týká trvanlivosti kompozitů na cementové bázi. Dále podrobněji zkoumat krystalizační přísady, které jsou v dnešní době stále více používaným materiálem ve stavebním průmyslu. Především se jedná o jejich utěsňující vlastnosti a schopnost zvyšování odolnosti vůči působení chemických látek.

Cílem praktické části diplomové práce je navržení vhodné metodiky experimentálních prací, zkušebních těles a prostředí, ve kterém budou tělesa uložena. Ověřit vlastnosti sledovaných malt s krystalizační přísadou a zkoumat vlivy přísady na odolnost malty vůči korodujícím látkám. Následně zhodnotit dosažené výsledky a vhodnost použití krystalizační přísady.

## TEORETICKÁ ČÁST

# 1 TRVANLIVOST KONSTRUKCÍ NA CEMENTOVÉ BÁZI

Při navrhování betonových konstrukcí je jednou z nejdůležitějších vlastností trvanlivost. Ta vyjadřuje schopnost odolávat všem vlivům, působícím na danou konstrukci, aniž by došlo k porušení či ztrátě pevnosti. Je to tedy určité časové období, ve kterém má stavební materiál vlastnosti nezbytné k jeho stabilitě. Hlavní roli v životnosti stavby má zejména konstrukční materiál, statický návrh, vliv prostředí a údržba objektu.[1,4]

Mezi prvky s dlouhodobou životností můžeme zařadit např.: základy a nosné konstrukce (svislé, vodorovné, střešní, schodišťové). Naopak mezi prvky s krátkodobou životností řadíme: povrchové úpravy stěn, podlahy, izolační vrstvy apod. [2]

Nejčastějšími vlivy, kterými se snižuje životnost celé stavební konstrukce, jsou účinky smršťování, dotvarování, únava materiálu, deformace, vliv agresivních látek, výrobní závady apod.

Primární úlohu, v pohledu na celkovou životnost celé stavební konstrukce, mají materiálové vlastnosti. Na materiál působí agresivní látky z okolního prostředí, které s jednotlivými složkami stavebního materiálu mohou reagovat a poškodit ho. Takový jev nazýváme degradace materiálu. Jedná se o nežádoucí poškozování struktury látek. K poškozování dochází nejčastěji vlivem chemické degradace, ale může být způsobena také fyzikálním, fyzikálně-chemickým a biologickým působením. Tyto vlivy mohou být způsobeny povětrnostními podmínkami, znečištěním prostředí, vztlínáním vody s obsahem soli v nich rozpuštěných, mohou být zapříčiněny také nevhodným stavebním zásahem, špatným výběrem materiálu atd.

V souvislosti s trvanlivostí jednotlivých stavebních materiálů je třeba zdůraznit, že k poškozování a degradaci dochází zejména na špatně provedených místech. Ani vysoce kvalitní materiál v takovém místě neodolá působení agresivních vlivů.

Je důležité tedy sledovat poškození jednotlivých složek stavebních materiálů, nejen poškození hmoty jako celku. [3,5]

## **1.1 Degradace cementových kompozitů**

Degradaci neboli korozi cementového tmelu, můžeme rozdělit do základních skupin vlivů, které na cementové kompozity v reálné praxi působí současně a navzájem se podporují.

- Fyzikální – mechanické, tepelné a vlhkostní vlivy.
- Chemickou – plynné agresivní látky, roztoky kyselin, zásad a solí, organické látky.
- Biologickou – působení produktů živočichů, mechanické rozrušování kořenů rostlin, působení mikroorganismů. [3]

### **1.1.1 Fyzikální koroze**

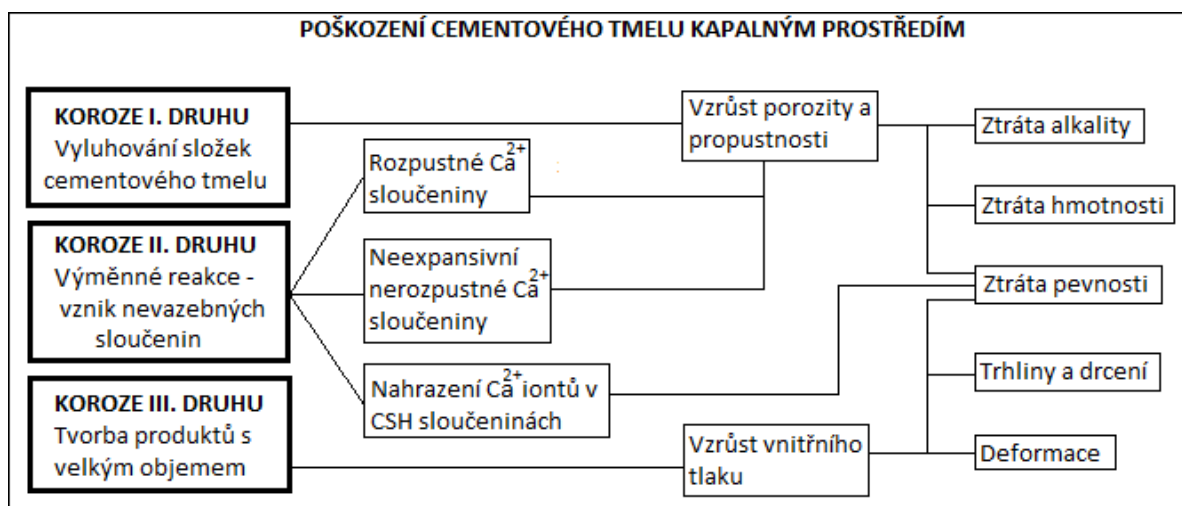
Mechanické, teplotní a vlhkostní děje porušují cementový tmel a dochází k jeho postupnému odstraňování. Materiál je vystaven různým silám a tlakům, které poškozují jeho strukturu. Jako mechanické porušení si můžeme představit nárazy, tření, vibrace, kavitaci (při proudění kapalin a následném vzniku bublin). Působením jak vysokých, tak nízkých teplot, dochází opět k rozrušování cementového tmelu. Při nízkých teplotách vznikají v pórech materiálu krystalky ledu, které vyvíjejí tlak na stěny pórů, čímž dochází k porušení. U vysokých teplot dochází k rozkladu hydratačních produktů cementu, které se projeví ztrátou pevnosti. [3,6]

### 1.1.2 Chemická koroze

Chemická koroze je nejnebezpečnější. Probíhá vždy v přítomnosti vody, která je buď v kapalně formě, nebo se vyskytuje jako vodní pára. Rychlost koroze je dána průběhem chemické reakce. Složky cementového tmelu reagují s agresivními látkami v závislosti na koncentraci agresivních látek v okolí, teplotě a porositě cementového tmelu. [3,7]

#### 1.1.2.1 Chemická koroze – kapalně agresivní prostředí

Poškození cementového tmelu agresivní vodou lze rozdělit na tři druhy, které se od sebe liší způsobem poškození a povahy vzniklých produktů. Toto schéma poškození cementového tmelu kapalným prostředím je na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1: Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [3]

Dále je možné toto rozdělení rozšířit o degradaci minerálními tuky a oleji, které obsahují slabé organické kyseliny, nebo fenolové sloučeniny. Nesmíme ani zapomenout na problematiku z pohledu prostředí. Může se jednat o vodu tekoucí či stojatou, zda jde o jednostranný nebo všestranný tlak vody, zda se konstrukce nachází v prostředí s normální, vyšší nebo nižší teplotou apod.

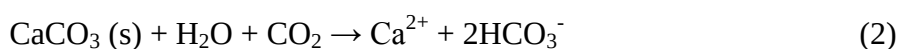
**Koroze I. druhu** se projevuje z počátku rychlým vyluhováním hydroxidu vápenatého a později dochází k pozvolnému rozkladu hydratovaných křemičitanů a hlinitanů. Tím pádem se snižuje celková koncentrace  $\text{OH}^-$  iontů a klesá hodnota pH.

Mezi vody, které mají tuto vyluhovací schopnost, se řadí vody měkké. Tyto vody se vyznačují nízkou přechodovou i trvalou tvrdostí. Jedná se o vody říční, srážkové nebo destilované. Pokud se ve vodách vyskytují stejné ionty ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ) jako v postiženém místě konstrukce, tak rozpustnost klesá. Naopak při výskytu jiných iontů ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  apod.) se rozpustnost zvyšuje. Rychlost koroze je také ovlivněna tím, zda jde o vodu proudící či stojatou, zda působí pod tlakem, zda jde o vodu teplou nebo studenou. Velký význam má množství kapilárních pórů v cementovém tmelu. Při malém obsahu pórů a mají-li malý průměr, koroze probíhá pouze na povrchu. V opačném případě se rychlost koroze zvyšuje. V konečném stádiu, tedy při úplném vyloužení hydroxidu vápenatého, dochází ke snížení stability slínkových minerálů a vznikají nepojivé sloučeniny ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). [3,8]

**Koroze II. druhu** spočívá ve vytvoření rozpustné, nebo nerozpustné sloučeniny, která nemá vazebné vlastnosti. Voda s obsahem rozpuštěných agresivních látek vniká do struktury cementového tmelu, kde probíhá výměnná reakce mezi hydroxidem vápenatým s kyselinami a louhy za vzniku rozpustných solí. Jedná se především o roztoky s obsahem  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $(\text{HCO}_3)^-$ ,  $(\text{NH}_4)^+$  iontů. Ty jsou posléze vyplavovány, což vede ke snižování hutnosti a pevnosti. Rychlost porušení závisí na intenzitě vzájemné reakce a rozpustnosti reagujících látek.

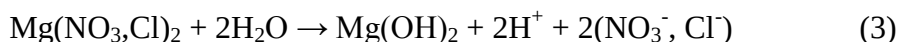
V případě *kyselinové koroze* vzniká vápenná sůl dané kyseliny. Organická či anorganická kyselina (chlorovodíková, sírová, dusičná, octová, atd.) působí na zásaditý cementový tmel. Zde probíhá reakce s hydroxidem vápenatým a dalšími složkami cementového tmele, kameniva a příměsí. Vápenná sůl je rozpustná ve vodě, a tudíž dochází k jejímu vyplavování.

V agresivních vodách se může vyskytovat také *oxid uhličitý*. Jako  $\text{CO}_2$  (aq) a  $\text{H}_2\text{CO}_3$  s  $\text{pH} < 4,5$ , dále jako  $\text{HCO}_3^-$  s  $\text{pH} 4,5$  až  $8,3$  a jako  $\text{CO}_3^{2-}$  s  $\text{pH} > 8,3$ . Agresivní oxid  $\text{CO}_2$  reaguje v cementovém tmelu s hydroxidem vápenatým a vzniká  $\text{CaCO}_3$ , který se následně rozpustí s dalšími podíly  $\text{CO}_2$  na rozpustný hydrogenuhličitan.

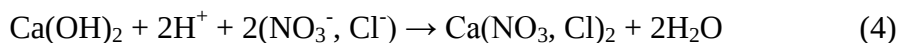


Koncentrované roztoky kovů alkalických zemin rozpouštějí silikátové a aluminátové složky cementového tmelu a dochází tak ke vzniku rozpustných křemičitanů a hlinitanů. Tímto způsobem dojde k úplnému rozkladu. Zředěné roztoky těchto alkalických kovů jsou pro cementový tmel neškodné.

*Hořečnatá koroze* je zapříčiněna reakcí hořečnatých solí (mimo  $\text{MgSO}_4$ ) s cementovým tmelem. Tyto hořečnaté soli ve vodném roztoku hydrolyzují:



$\text{Mg}(\text{OH})_2$  (brucit) nemá pojivě vlastnosti a je nerozpustný. Následně je  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  spotřebován, porušuje se struktura a vzniká rozpustná sůl, která se může vyluhovat z cementového tmelu:



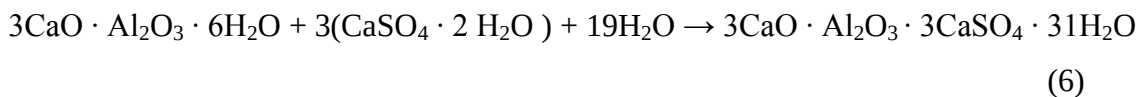
**Koroze III. druhu** nastává v případě, kdy voda obsahuje takové rozpuštěné agresivní sloučeniny (sírany a chloridy), které reakcí s cementovým tmelem vytvoří látky s větším objemem. Ty se hromadí a krystalizují v pórech cementového tmelu. Tento jev se v prvních stádiích projevuje zvýšením pevnosti, hutnosti a tím pádem i nepropustnosti. Další růst krystalů však vede k vyvozování nežádoucího tlaku na stěny pórů, čímž dochází ke vzniku trhlinek a postupně až k úplnému rozpadu.

*Sádrovcovou korozi* můžeme sledovat při vysokém obsahu alkalických síranů ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) v agresivních vodách. Ty reagují s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a dochází ke vzniku sádrovce, který je doprovázen nárůstem objemu o 17 %. Sádrovec vyplní póry cementového tmelu a vyvozuje tlak na stěny, který má za následek rozrušování struktury.



Dále sádrovec reaguje s hydratovanými i nehydratovanými alumináty a dochází k *sulfoaluminátové korozi*. Při této reakci vzniká skoro nerozpustný kalciumsulfoaluminát vápenatý neboli sekundární ettringit. Ten má jehlicovité krystaly

a přibližně 2,5 x větší objem než objem látek, ze kterých vznikl. Tato objemová expanze vede ke vzniku trhlin, protože se vytváří vnitřní napětí.



U *sulfouhličitanové koroze* dochází ke vzniku minerálu thaumasitu  $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ , který je zapříčiněn kombinovaným působením síranů a uhličitanů. Jeho krystalická struktura je velice podobná ettringitu. [3,4,8]

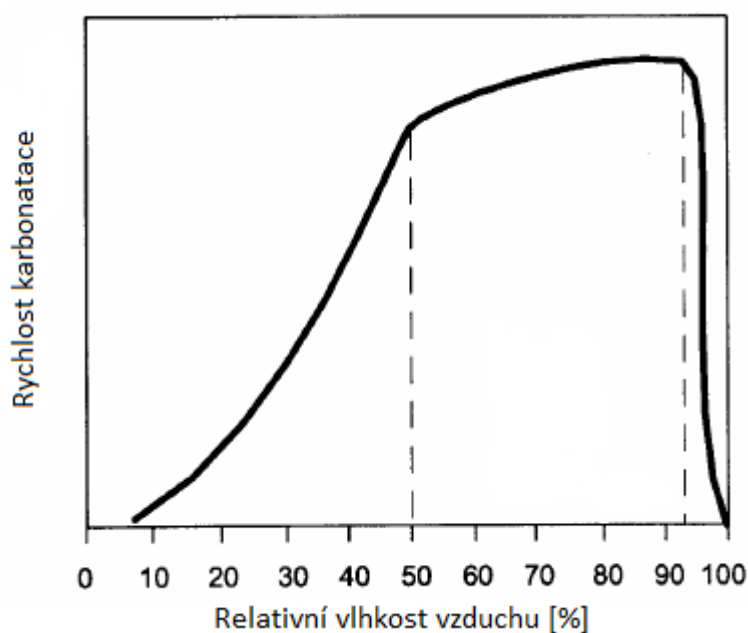
#### 1.1.2.2 Chemická koroze – plynné agresivní prostředí

Na cementový tmel také ve velké míře působí plynné agresivní látky, které můžeme rozdělit dle charakteru na:

- Plyny kyselého charakteru –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2$
- Ostatní plyny –  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Cl}_2$

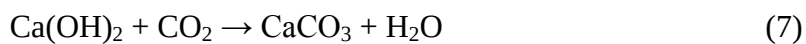
#### **$\text{CO}_2$ – karbonatace**

Koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře se mění v závislosti na jeho přírodních, průmyslových, zemědělských a komunálních zdrojích. Obvyklá hodnota se pohybuje okolo 0,04 obj. %. Při styku oxidu uhličitého s cementovým tmelem, jež tvoří hydratační produkty pojiv, dochází k neutralizaci, kterou označujeme za karbonataci. Tímto způsobem vznikají různé karbonáty. Rychlost pronikání oxidu uhličitého a vodní páry do kapilárně pórovitého systému cementových kompozitů je ovlivněna např. povrchovými úpravami, druhem a charakterem hydratačních produktů pojiv či pórovou strukturou cementového tmele. Podmínkou karbonatace je přítomnost určité vlhkosti, aby mohla reakce probíhat. Na obrázku č. 2 můžeme vidět, že nejlépe karbonatace probíhá při 50 – 90% relativní vlhkosti vzduchu.

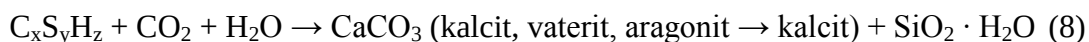


Obrázek č. 2: Závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu [8]

Průběh karbonatace můžeme sledovat pomocí měření hodnoty pH. Oxid uhličitý neutralizuje hydroxid vápenatý až do jeho úplného vyčerpání a redukce pH pórového roztoku na hodnotu 8,3.



Následně reaguje  $\text{CO}_2$  s dalšími hydratačními produkty cementu a vznikají další formy  $\text{CaCO}_3$ . Jemnozrnné krystaly kalcitu a termodynamicky nestálé formy jako vaterit a aragonit. Ty se později rekrystalizační reakcí přemění na velké krystaly kalcitu. Při těchto reakcích vzniká také gel  $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  a  $\text{Al(OH)}_3$  tzv. gibbsit. Tyto pochody jsou znázorněny v chemických rovnicích:



Po vzniku nových  $\text{CaCO}_3$  nerozpustných novotvarů se zaplňují jednotlivé kapiláry a dochází tak k poklesu přísunu nového  $\text{CO}_2$  do struktury materiálu. Tím se

zvyšuje objemová hmotnost cementového tmelu v povrchové vrstvě. Hutný beton tedy odolává působení škodlivému účinku karbonatace daleko lépe. Obvykle se ale setkáváme s běžně pórovitou strukturou materiálu, kde je propustnost pro páry a plyny velká. Na propustnosti  $\text{CO}_2$  do vnitřní struktury se podílejí veškeré póry, trhlinky a mezery. Výjimka je pouze u gelových pórů, které jsou obvykle zaplněny vodou. Ty jsou pro pronikání  $\text{CO}_2$  nepropustné a tudíž se na karbonataci nepodílejí.

Betony z portlandských cementů vytvářejí větší odpor proti karbonataci oproti cementům s přídavkem strusky, popílku apod. To je způsobeno obsahem reaktivních hydraulických oxidů, zejména  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , hydraulického vápna nebo hydraulických či pucolánových látek, které mají za následek zvýšení množství aragonitové modifikace  $\text{CaCO}_3$ . Dále je velice důležitý vodní součinitel, který ovlivňuje pórovitost materiálu.

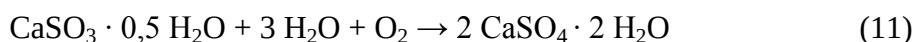
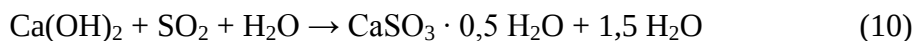
#### **Průběh karbonatace – etapy**

- I. etapa** – Přeměna  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na nerozpustný  $\text{CaCO}_3$ , který vyplňuje póry (zvětší objem o 10 %). Dochází ke zlepšení fyzikálně mechanických vlastností.
- II. etapa** – Přeměna ostatních hydratačních produktů a vznik  $\text{CaCO}_3$  modifikací. Hrubo zrnné krystalické novotvary se vyskytují pouze ojediněle. Mechanické vlastnosti se příliš nemění.
- III. etapa** – Překrystalování dříve vzniklých uhličitánů na velice objemné (až desetkrát větší) krystaly kalcitu a aragonitu. Dochází ke zhoršování mechanických vlastností a výraznému snížení hodnoty pH.
- IV. etapa** – Téměř kompletní karbonatace, kdy krystaly kalcitu a aragonitu prostupují celou strukturou cementového tmelu. Dochází ke ztrátě pevnosti a soudržnosti, klesá pH pod hodnotu 8 [3,8]

#### **$\text{SO}_2$ – sulfatace**

Nebezpečí koroze vzniklé agresivními  $\text{SO}_2$  plyny se pozoruje hlavně v silně průmyslových oblastech. Nejedná se tedy o jev plošně významný, ale i přesto je to jev pro cementový tmel nebezpečný.  $\text{SO}_2$  se dostává do struktury cementového tmelu, kde za přítomnosti vody neutralizuje  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a vzniká meziprodukt hemihydrát siřičitanu vápenatého  $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ , který následně oxiduje na síran. Ve finále můžeme

v materiálu nalézt sádrovec a rovněž může vznikat ettringit  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  či monosulfát  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Tyto finální produkty mají větší objem než látky, ze kterých vznikly, čímž vyvíjí vysoké tlaky a dochází k porušení. Se vzrůstající vlhkostí je sulfatace rychlejší a úplnější.



### Průběh sulfatace – etapy

- I. etapa** – Přeměna hydroxidu vápenatého na hemihydrát siřičitanu vápenatého, který zaplňuje póry. Dochází k nárůstu pevnosti a snižuje se hodnota pH.
- II. etapa** – Přeměna ostatních hydratačních produktů cementu společně s primárně vzniklými novotvary karbonatačními. Tyto novotvary nadále zaplňují póry a mechanické vlastnosti dosahují vyšších hodnot.
- III. etapa** – Překrystalování hemihydrátu siřičitanu vápenatého na krystaly sádrovce, které je doprovázeno výraznějším zvětšením objemu. Pevnosti dosahují maxima svých hodnot a při přechodu do čtvrté etapy nastává jejich prudký pokles.
- IV. etapa** – Dochází k naprosté ztrátě pevnosti a soudržnosti. Hrubé krystaly sádrovce prostupují celou strukturou cementového tmelu.
- V. etapa** – Může nastat v případě střídavého provlhčování. Jeho příčinou je vznik monosulfátu vápenatého a dochází ke zřetelnějšímu rozpadu. Tato etapa může nastat přímo po třetí etapě. [3,8]

### 1.1.3 Biologická koroze

Tímto názvem se označují degradační pochody způsobené živými organismy. Jejich působení může vyvolat fyzikální i chemické porušování. U *fyzikální degradace* se jedná o prorůstání kořenů rostlin, nebo zadržování kapalné vody u povrchů konstrukcí, která při nízkých teplotách zmrzne a její krystalizační tlak má ničivý charakter. *Chemickou degradaci* způsobují produkty živočišných pochodů a bakterií. V případě biokoroze je podmínkou určitá vlhkost, teplota a přítomnost kyslíku. [3,5]

## **1.2 Ochrana proti degradaci cementových kompozitů**

Na danou problematiku můžeme nahlížet ze dvou zásadních úhlů. Buď budeme stavební prvky chránit před nežádoucími vlivy ještě před docílením navrhovaných fyzikálně-mechanických vlastností, tzn. v průběhu jejich zhotovování, nebo ochranu konstrukce zajistíme až po jejím zhotovení. Takto můžeme ochranu stavebních konstrukcí rozdělit na:

- Primární ochranu
- Sekundární ochranu

### **1.2.1 Primární ochrana**

Jako primární ochrana se považuje vše, co se s konstrukcí děje od jejího složení, až po průběh zhotovení. Musí se brát ohled na volbu správného materiálu, technologii výroby, volbu geometrického tvaru (k zabránění hromadění agresivních látek na povrchu), nesmí doházet ke vzniku trhlin apod. U materiálu je velice důležitá jejich vzájemná synergie. Pojiva (cementy, vodní skla, polymerní pojiva) ve styku s přísadami (plastifikační, inhibitory koroze atd.), kamenivem, vodou a případně výztuží musí tvořit kompaktní a ve svém prostředí odolný celek.

### **1.2.2 Sekundární ochrana**

U sekundární ochrany se počítá s tím, že u dané konstrukce bude až po jejím zhotovení zabráněno působení agresivního prostředí. Používají se hmoty pro ochranu povrchu a impregnace. Jedná se o nejrůznější druhy nátěrů, fólií, obkladů a vyzdívek. Ty se volí v závislosti na druhu agresivního prostředí, stupni agresivity, na atmosférických a technologických vlivech a na druhu zatížení těchto stavebních dílů. Použité hmoty se nesmějí vzájemně poškozovat a musí zaručit potřebnou ochranu po dobu, na kterou byly navrženy. [8]

## 2 KRYSTALIZAČNÍ PŘÍSDADY

Krystalizační účinky silikátových hydroizolačních materiálů jsou relativně novým typem ochrany cementových kompozitů. První typ pro čerstvý beton byl vytvořen v roce 1979. Z důvodu jisté nedůvěry pro používání těchto materiálů, se s nimi v ČR setkáváme přibližně o dvacet let později. Od té doby se situace výrazně zlepšila a dochází k poměrně širokému rozšíření v používání.

Krystalizační technologie zvyšuje odolnost a trvanlivost konstrukcí na cementové bázi. Snižuje jejich náklady na údržbu a prodlužuje jejich životnost tím, že je chrání proti účinkům vody a agresivních chemikálií. Tyto vysoce pozitivní vlastnosti vyplývají ze způsobů, jakým tato technologie funguje při použití s veškerými typy betonových konstrukcí.

Jedná se o práškové směsi skládající se především z velmi jemně mletého portlandského cementu, menšího množství jemného křemenného písku a speciálních přísad. Tento podíl se mění podle jednotlivých typů výrobku a konkrétního výrobce. Poměr a složení těchto přísad je výrobním tajemstvím. [9,12]

### 2.1 Samoregenerační schopnost

„Samoregenerační“ (self-healing) materiály jsou ty, které mají schopnost do určité míry opětovně zacelit trhliny po jejich vzniku. Hlavním důvodem pro zkoumání vlastností těchto materiálů je ten, že mohou zvýšit životnost konstrukce. Tento jev je velice výhodný u konstrukcí s obtížnými nebo drahými opravami.

Samotný beton má vlastní „léčebný“ potenciál, který může probíhat u běžných prvků, ale jeho míra je omezená a není předvídatelná. Může se zvýšit např. přidávkou vysokopecní strusky nebo popílku, které umožňují pozdější hydrataci. Nicméně tento jev není spolehlivý pro dosažení významné regenerace v konstrukci. Obecně platí, že objem produktů hydratace cementu není dostačující k uzavření těchto trhlin. [31,32]

## 2.2 Funkční princip

Od počátku používání tohoto typu ochrany se můžeme setkat s pozitivními ohlasy nejen u nás, ale i ve světě. Ty dokazují, že krystalizační technologie zlepšuje u konstrukcí jejich nepropustnost pro vodu a vodní páru a přispívá tedy k vyšší trvanlivosti a odolnosti. Zaručena je také lepší odolnost vůči agresivním plynům. Ty totiž bez přísunu vody nemohou cementovou matici nijak poškodit, protože mezi nimi neproběhne žádná reakce.

Všechny typy krystalizačních přísad fungují na stejném principu. Dochází k vyplnění a ucpání pórů, kapilár, mikrotrhlin a jiných dutin díky nově vznikajícím nerozpustným krystalům. Toto utěsnění také zamezuje fyzikálně-mechanickému porušení struktury vlivem působení nízké teploty. Nedochází ke vzniku ledu v pórech a trhlinách u ošetřeného materiálu.

Hydroizolační účinek je založen na dvou jednoduchých postupech, chemickém a fyzikálním. Když přichází do kontaktu cement a voda, nastává proces hydratace cementových částic, která způsobí, že se z těchto dvou látek stane pevná hmota. V tomto procesu také vzniká hydroxid vápenatý. Krystalizující hydroizolační přísada přidává do této směsi další sadu chemických látek. Když se tyto dvě chemické skupiny, hydroxid vápenatý a přidané chemické látky z krystalizační přísady, smíchají dohromady, za přítomnosti vlhkosti nastává chemická reakce. Výsledkem tohoto procesu je krystalická struktura. Ta se vytvoří pouze tam, kde je přítomná voda a vyplní póry, dutiny a trhliny v materiálu.

K reakci dochází vždy ve hmotě materiálu a nikoli pouze na povrchu (i v případě použití krystalizační přísady ve formě nátěru nebo vsypu). Nezbytným katalyzátorem tohoto procesu je dostatečný přísun vody. Bez ní by krystalizační reakce neproběhla v dostatečném rozsahu. Z tohoto důvodu je velice výhodné tento systém použít ve formě nátěru při sanaci starších konstrukcí, kde dochází k neustálým průsakům vody. Zde se setkáváme s procesem chemické difúze. Tato teorie je založena na principu, že roztok s vyšší hustotou přechází do roztoku s nižší hustotou, dokud nedojde k jejich vyrovnání. Proto, když je beton nasycen vodou před použitím krystalické hydroizolace, aplikuje se rovněž roztok s nižší hustotou. Tím se po aplikaci krystalické přísady na povrchu vytvoří roztok s vysokou hustotou a dojde k procesu chemické difuze. Aktivní

látky krystalizační přísady musí migrovat společně s vodou (roztok s nízkou hustotou), dokud nedojde k vyrovnání hustot obou roztoků.

Reakce bude pokračovat do té doby, než dojde k vyčerpání všech aktivních látek krystalizační přísady, nebo dojde k vyčerpání vody. Chemická difuze je schopná dosáhnout s těmito látkami přibližně 30 cm od povrchu betonu. Pokud voda nasákla pouze 10 cm od povrchu, krystalické látky se budou šířit do této hloubky a zastaví se, ale stále mají potenciál dalšího rozvoje. Pokud se do materiálu znovu dostane voda, tento proces bude pokračovat

Protože jsou tyto krystalické útvary uvnitř materiálu a nejsou vystaveny na povrchu, nemohou být nijak proraženy nebo jinak poškozeny jako membrány či fólie. Krystalická hydroizolace je vysoce odolná vůči chemikáliím, u kterých je hodnota pH v rozmezí 3 až 11 pod neustálým působením a pH 2 až 12 u střídavého působení. Dále je odolná teplotnímu zatížení od -25 po 130 °C. Na schopnost plnit svou funkci u krystalických novotvarů, už nadále nemá žádný vliv úroveň vlhkosti, kyslík ani ultrafialové světlo. [9,12]

Velice známým výrobcem těchto materiálů je firma Xypex Chemical Corporation. Jedním z výrobků, které na svém trhu nabízí, je Xypex Concentrate, používaný pro nátěry. Složení tohoto krystalizačního materiálu bylo předmětem podrobnějšího výzkumu, kde bylo uvedeno jeho chemické složení. To můžeme vidět v tabulce č. 1. [11]

Tabulka č. 1 Chemické složení - Xypex concentrate [11]

| Složka                         | Obsah [%] |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 39 - 46   |
| CaO                            | 25 - 34   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4 - 5     |
| MgO                            | 3 - 5     |
| Na <sub>2</sub> O              | 4 - 7     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,5 - 3   |

## 2.3 Způsoby použití

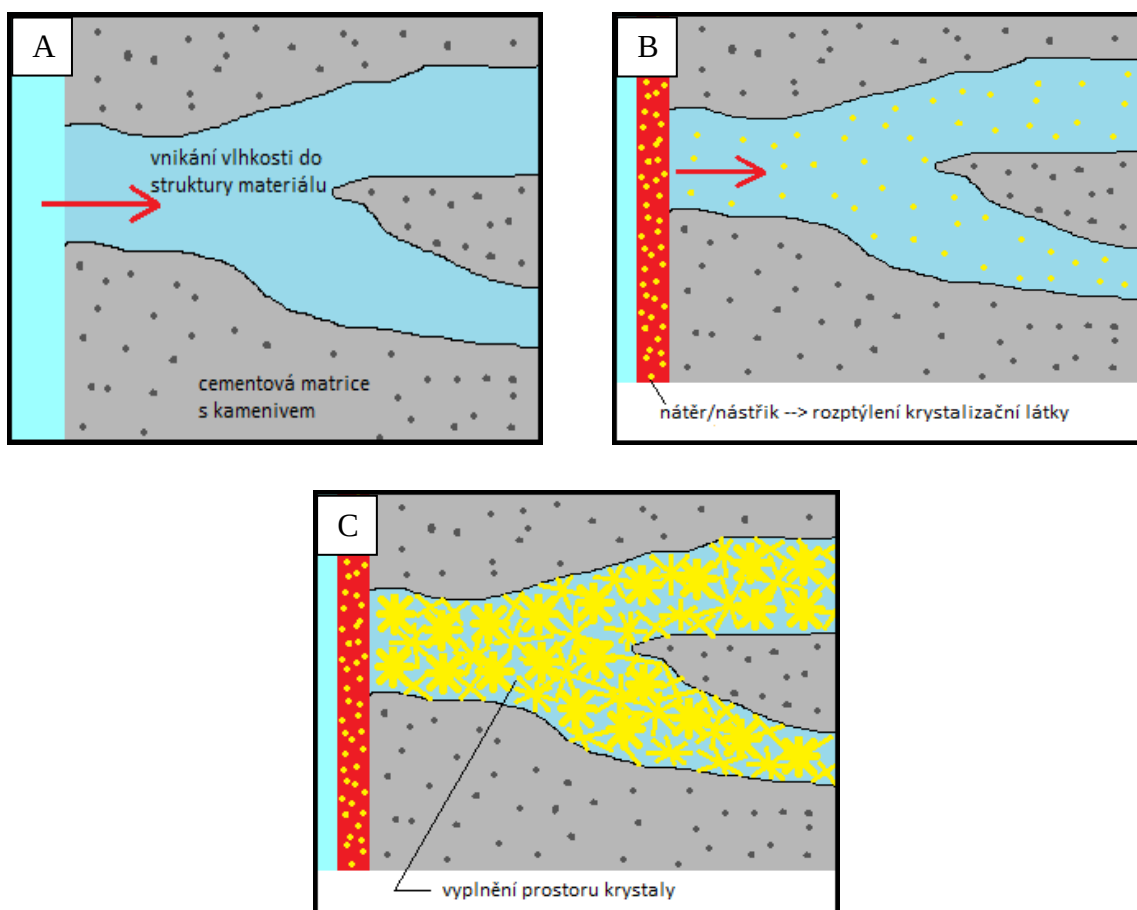
Můžeme se setkat se čtyřmi základními způsoby, které výrobci těchto krystalizačních přísad nabízejí. Tento typ použití, jakým budeme přísadu aplikovat, se volí s ohledem na druh konstrukce.

- Nátěry, nástřiky
- Vsypy
- Tmely
- Přísady

### 2.3.1 *Nátěry a nástřiky*

Aplikace formou nátěru či nástřiku na povrch konstrukce je nejvíce používána při plošném způsobu sanace starších betonových konstrukcí. Zde se předpokládá zvýšené zatížení vlhkostními vlivy.

V první řadě je nutné povrch konstrukce očistit od prachu a nečistot (např. ocelovým kartáčem). To se provádí z důvodu otevření povrchových pórů. Tím pádem do nich mohou krystalizační hmoty po aplikaci prorůstat a vznikat nové těsnící krystalické struktury. Nesmíme zapomenout, že povrch konstrukce musí být dostatečně vlhký. Dále je důležitá pečlivá příprava nanášecí hmoty. Práškový krystalizační materiál se rozmíchá v určeném množství vody (dle výrobce). V případě, kdy se nepředpokládá zatížení tlakovou vodou, postačuje pouze jedna vrstva nátěru. Pokud víme, že konstrukce je zatížena tlakovou vodou, aplikujeme alespoň dvě vrstvy. Obvyklá tloušťka nanesené vrstvy se pohybuje v rozmezí 1 až 1,5 mm. Následně je nutno po určitou dobu povrch s nátěrem dostatečně ošetřovat. To se provádí z důvodu kompletního utěsnění všech pórů. Ošetřování je pro zdárné utěsnění nezbytné. Povrch konstrukce by měl být vlhčen pravidelně po dobu dvou dnů od nanesení. Zanedbání tohoto finálního postupu by mohlo mít negativní vliv na vodotěsné vlastnosti celého systému. V případě korektního provedení, které výrobci předepisují, je možno takto ošetřenou konstrukci vystavit tlaku vody či jiné kapaliny po 5 až 21 dnech.



Obrázek č. 3 Schéma účinku krystalizační látky formou nátěru či nástřiku

### 2.3.2 Vsypy

Tento typ provedení se používá pro vodorovné konstrukce z důvodu technologie provádění při samotné aplikaci krystalizační přísady. Suchý prášek se nanáší na vlhký povrch čerstvého betonu. Jedná se o velmi podobný materiál, který se používá pro nátěrovou formu aplikace. Po nanesení na celý povrch takto připravené konstrukce se tato vrstva rotační hladičkou s kotoučem zapracovává do podkladní vrstvy. To je prováděno z důvodu lepšího spojení. Nadále je nutno provádět důkladné ošetřování vodou, podobně jako u technologie pomocí nátěru.

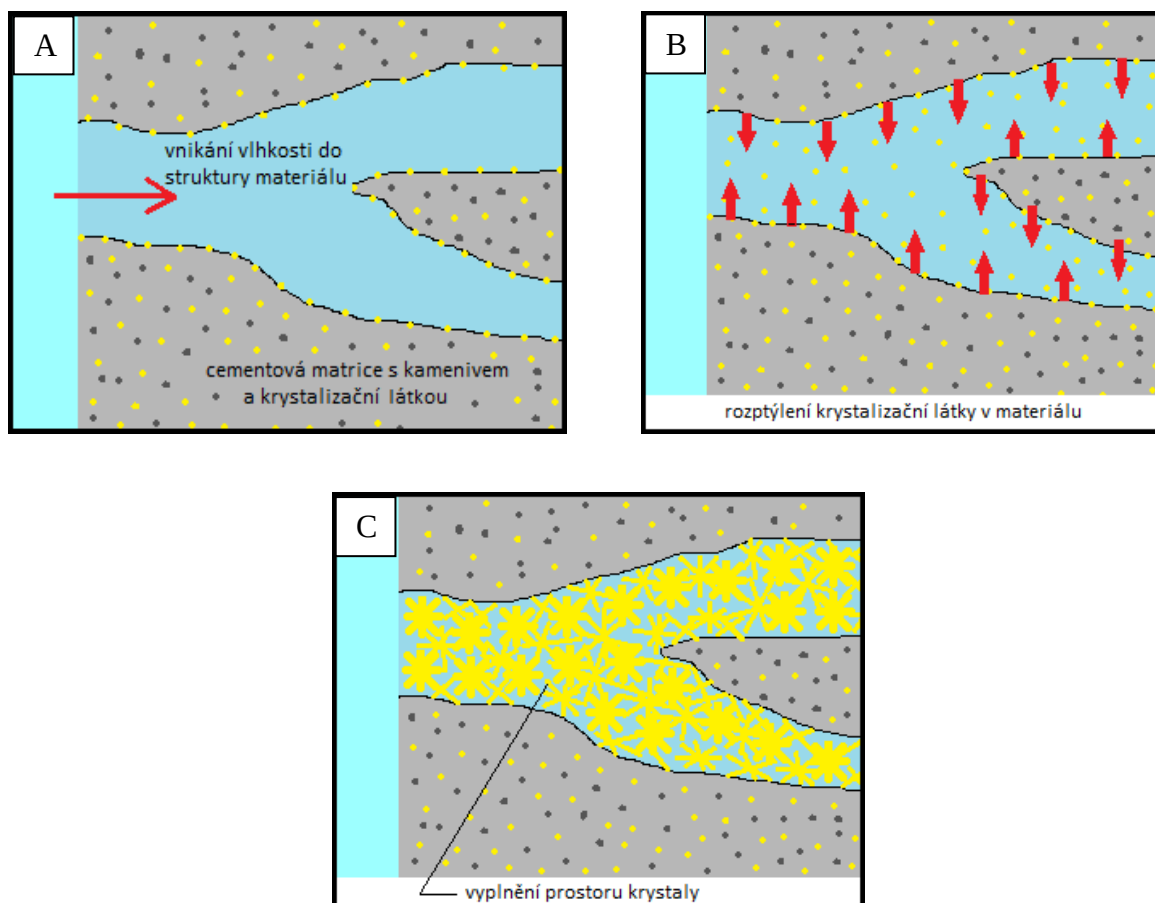
### 2.3.3 Tmelý

Použitím krystalizačních tmelů se zabráňuje lokálním průsakům trhlinami v konstrukci. Výrobce může nabízet přímo druh krystalizačního prášku, který je vhodný k takovému použití. Případně se může použít typ pro nátěrovou aplikaci, u kterého

použijeme menší vodní součinitel. Tyto tmely je vždy nutné použít v kombinaci s nátěrovou krystalizační hydroizolací. Jako první je potřeba vysekat po celém obvodu trhliny prostor pro uložení tmelu. Ten se natře krystalizačním nátěrem a až poté je aplikován rychletuhnoucí tmel, který zaplní celý obnažený prostor. Po zatumnutí tmelu se opět použije krystalizační nátěr.

#### **2.3.4 Přísady**

Krystalizační materiál se může používat i ve formě přísady do čerstvé směsi. Tento typ se dá využít pouze u nových konstrukcí, kde krystalizační reakce přísady probíhá společně s hydratací cementu. Takto obohacený beton či malta má lepší hydroizolační vlastnosti v celém svém objemu. Dávkování těchto práškových přísad se provádí společně se záměsovou vodou. Přísada se v ní nejprve rozmíchá a až poté vstupuje do kontaktu s ostatními složkami celého procesu. Tento technologický postup je nutný z důvodu rovnoměrného rozptýlení krystalizační přísady. Samotný krystalizační proces těchto přísad je záměrně vytvořen s mírným zpožděním a nastává až ve chvíli, kdy je vytvořena základní struktura cementového tmelu. Opět je velice důležité provádět ošetřování vodou. Pokud by se tak nestalo, cement by veškerou vodu spotřeboval. Finální vodonepropustné vlastnosti jsou lepší než u povrchových aplikací díky krystalizačnímu procesu, který prostupuje celou hmotou. [9,10]



Obrázek č. 4 Schéma účinku krystalizační látky formou přísady

## 2.4 Výrobci krystalizačních přísad a jejich produkty

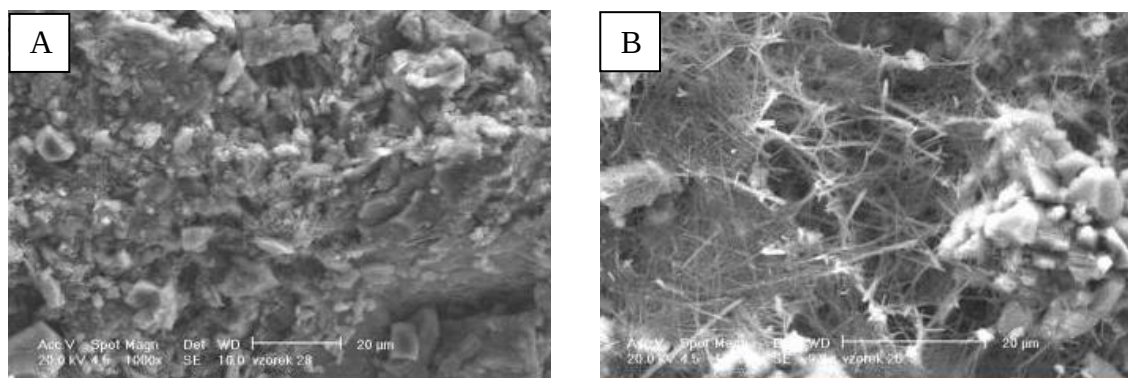
### 2.4.1 Moramis s.r.o.

Společnost byla založena v roce 2005 jako pokračovatel firmy Moramis – holding, a.s. Sídli v Ostravě a je majitel patentu na výrobu hydroizolačního systému *Akvatron*.

Jedná se o kompozitní materiál, který se skládá z portlandských cementů, velmi jemně mletých a speciálně upravených křemenných písků a dalších přísad. Většina produktů *Akvatronu*, se po smíchání s vodou nanáší formou nátěru, nástřiku nebo stěrkováním. Dochází ke katalytické reakci aktivované přísady z těchto nátěrů za vzniku nerozpustných krystalů. Tyto krystaly prorůstají do pórů, kapilár a trhlinek betonové konstrukce. Dochází k trvalému zacelení betonu proti průniku vody a dalších kapalin s hodnotou pH 3 až 11. Zároveň dochází k vytvoření trvalé ochrany betonové

konstrukce proti korozi. Výrobce uvádí, že bez ohledu na zvyšující se hutnost malty či zmenšující se rozměry pórů, zůstává zachována propustnost pro vodní páru a tím pádem i schopnost vysychání vlhkého betonu.

Z pozorování uskutečněných při testování jejich výrobků deklarují, že s každým cyklem, kdy betonovou konstrukci zatěžovali působením vody, dochází k urychlené chemické reakci a proces utěsnění struktury materiálu se prohlubuje.



Obrázek č. 5 Snímek betonu (A) neošetřený Akvatronem, (B) ošetřený Akvatronem [13]

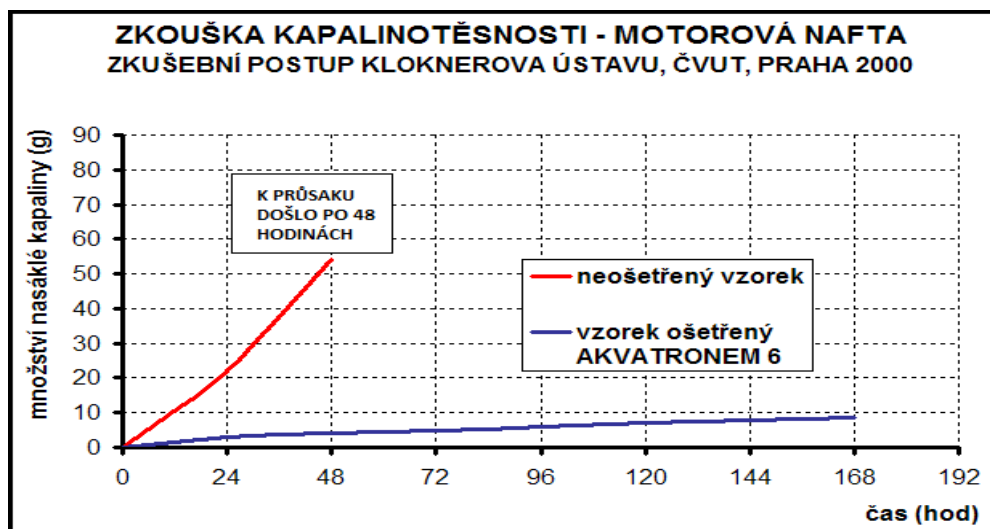
Akvatron se dá použít všude, kde je potřeba zaručit vodonepropustnost stavební konstrukce a také v případě ochrany proti vlivům urychlujícím korozi betonu. Může se jednat o kyselé deště, hladové vody apod. Lze je rovněž aplikovat proti pozitivnímu i negativnímu tlaku kapalin. Zacelí vlasové trhliny do 0,4 mm a nemůže dojít k roztržení, jako u fóliové izolace.

Kvalita provedení tohoto ošetření stavební konstrukce je velice důležitá pro celý systém. Trvanlivost nátěru se rovná trvanlivosti vlastní konstrukce. Ošetření Akvatronem se nemusí provádět opakovaně a tím dochází k významné ekonomické úspoře.

Tabulka č. 2 Vliv nepříznivého prostředí na krystalickou strukturu Akvatronu [13]

|                  |                       |                      |
|------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>pH</b>        | Při stálém styku      | 3,0 až 11,0          |
|                  | Při periodickém styku | 2,0 až 13,0          |
| <b>teplota</b>   | Při stálém styku      | -40 °C až +150 °C    |
|                  | Při periodickém styku | -160 °C až + 1400 °C |
| <b>vlhkost</b>   | Žádný vliv            |                      |
| <b>UV záření</b> | Žádný vliv            |                      |
| <b>oxidace</b>   | Žádný vliv            |                      |

U správně a kvalitně připraveného podkladu je možné aplikovat Akvatron jak na čerstvý, tak na ztvrdlý beton. Dochází k zabránění propustnosti vody a také dalším roztokům i ropným produktům.



Graf č. 1 Porovnání průsaku motorové nafty neošetřeným a ošetřeným vzorkem s Akvatronem [13]

Použitelnost je velmi široká a s úspěchem se používá u vodohospodářských staveb, zejména při rekonstrukcích čistíren odpadních vod. Také u oprav nádrží v průmyslových zařízeních. Tam se můžeme setkat s kapalinami s různým stupněm pH, které jsou agresivní vůči betonu. Díky odolnosti vůči průniku ropných látek se naskytuje možnost aplikace u betonových ploch čerpacích stanic, základových jímek pod lis, výtahových šachet v obytných domech, tunelů, podchodů, mostů, plaveckých bazénech apod. [13]

#### Produkty s krystalizačním účinkem:

- **Akvatron 6** – Základní výrobek této řady, který obsahuje modifikovanou suchou směs vytvářející krystalický hydroizolační efekt. Nanáší se nátěrem a stěrkováním na předem upravený a zvlhčený povrch konstrukce. [13]

Jako první se provádí základní nátěr štětcem, nebo tvrdým kartáčem v poměru mísení s vodou 1 : 1. Dále se aplikuje hlavní nátěr, který je složen ze dvou vrstev. První vrstva se provádí po 3 až 5 minutách od nanesení základního nátěru štětcem nebo stěrkou v jednom směru. Druhou vrstvu hlavního nátěru

naneseme po 5 až 6 hodinách štětcem nebo stěrkou kolmým směrem na předchozí vrstvu. Zde je poměr mísení 1 : 4 až 4,5 podle způsobu nanášení. [28]

Tabulka č. 3 Technické parametry - Akvatron 6 [28]

|                                                          |                               |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Pevnost v tlaku</b>                                   | > 35 MPa (ČSN 7224450)        |
| <b>Pevnost v tahu za ohybu</b>                           | > 4,5 MPa (ČSN 7224450)       |
| <b>Přídržnost k podkladu</b>                             | > 1,2 MPa (ČSN 732577)        |
| <b>Součinitel mrazuvzdornosti (50 cyklů)</b>             | > 0,8 (ČSN 732579)            |
| <b>Vodotěsnost</b>                                       | Min. 0,8 MPa (ČSN 731321)     |
| <b>Odolnost vůči kyselinám a jiným agresivním látkám</b> | Vyhovuje (zk. Postup KU ČVUT) |

- **Akvatron 8** – Produkt určený pro sanaci stavebních konstrukcí s aktivním průsakem vody. Je připraven ze speciálního druhu hlinitanového cementu a dalších modifikačních přísad. U tohoto výrobku dochází k rychlému tuhnutí a tvrdnutí, čímž se stává náročným na rychlost zpracování. [13]

Utěšňování spár se provádí vysekáním žlábků ve tvaru „U“ (široký 20 mm a hluboký min. 40 mm) a následným vtlačení homogenní směsi, která se míchá s vodou v poměru 3 : 1. Povrch musí být očištěný a nasycený vodou. Následně se doporučuje aplikovat nátěr Akvatron 6. [29]

Tabulka č. 4 Technické parametry - Akvatron 8 [29]

|                                           |                            |
|-------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Pevnost v tlaku po 24 hod.</b>         | Min. 7,0 MPa (ČSN 7224450) |
| <b>Pevnost v tahu za ohybu po 24 hod.</b> | Min. 1,5 MPa (ČSN 7224450) |
| <b>Přídržnost k podkladu po 24 hod.</b>   | Min. 0,5 MPa (ČSN 732577)  |
| <b>Vodotěsnost – tlaková voda</b>         | Min. 0,8 MPa (ČSN 73321)   |
| <b>Doba tuhnutí</b>                       | Max. 180 sec               |

- **Akvatron 12** – velice koncentrovaná hydroizolační směs s krystalickým účinkem. Používá se především jako přísada do čerstvého betonu. Zajišťuje vodotěsnost a odolnost vůči agresivním kapalinám. Je možné ji použít i při utěšňování kritických míst konstrukce jako jsou pracovní spáry, spoje dvou konstrukčních prvků apod. [13]

Při dávkování do čerstvého betonu se krystalizační hmota rozmíchá s co nejmenším množstvím vody do pastové konzistence. Ta se následně důkladně vmíchá do čerstvého betonu, u kterého je nutno po dobu 3 dnů vlhčit povrch. [30]

Tabulka č. 5 Technické parametry - Akvatron 12 [30]

|                                        |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| <b>Přídavek Akvatronu 12 na cement</b> | 0,4 – 1,0 %       |
| <b>Vodotěsnost min. V8</b>             | 0 mm (ČSN 731209) |
| <b>Přídavek vody na 1 kg směsi</b>     | 250 ml            |

#### 2.4.2 Redrock Construction s.r.o.

Společnost se zabývá vývojem, výrobou, distribucí, prodejem a poradenstvím v oblasti produktů, materiálů a technologických řešení ve stavebnictví. Pohybuje se na českém i zahraničním trhu přibližně 25 let a sídlí v Praze. Ve své nabídce má produkty pro penetraci a přípravu podkladů, sanace betonů, těsnění proti vodě, ochranné nátěry apod. [17]

#### Produkty s krystalizačním účinkem:

- **Krystol S-25** – Hydroizolační stěrka s obsahem migrační krystalizační přísady. Aktivní látky osmotickým tlakem pozvolna pronikají do hloubky betonu a vytvářejí ve vlhkém prostředí kapilár krystaly. Dochází k zaplňování pórů na molekulární úrovni a tím k zabránění prostupu vlhkosti. Ošetřený beton nepropouští ani jiné kapaliny, jako benzín, naftu a oleje. Dá se použít i při působení hydrostatického tlaku. Zvyšuje odolnost proti chloridům (u výztuže) a agresivním vodám. Stěrka se dá použít pro reprofilaci a izolaci všech povrchů z betonu např: bazény, vodní nádrže, záchytné jímky, podzemní konstrukce apod.

Při zatuhnutí hmoty namíchaného materiálu je povoleno jej znovu krátce domíchat míchadlem. To ale platí pouze v době zpracovatelnosti.

Výrobek se nesmí používat při teplotách menších než +5 °C a v případě deště. Neměl by být aplikován na přímém slunečním svitu. Nesmí se přidávat dodatečné pojiva, kameniva a přísady. [14]

Tabulka č. 6 Technické parametry - Krystol S-25 [14]

|                                      |                       |                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Barva</b>                         |                       | Šedá                                            |
| <b>Složení</b>                       |                       | Portlandský cement, křemičité kamenivo, přísady |
| <b>Zpracovatelnost při 20 °C</b>     |                       | 30 min.                                         |
| <b>Pevnost v tlaku</b>               |                       | > 25 MPa                                        |
| <b>Pevnost v tlaku za ohybu</b>      |                       | > 5 MPa                                         |
| <b>Objemová hmotnost</b>             | <b>Sypná</b>          | 1450 kg/m <sup>3</sup>                          |
|                                      | <b>Čerstvé malty</b>  | 2100 kg/m <sup>3</sup>                          |
|                                      | <b>Zatvrdlé malty</b> | 2000 kg/m <sup>3</sup>                          |
| <b>Tloušťka vrstvy</b>               |                       | Min. 2 mm, max. 5 mm                            |
| <b>Odolnost tlaku vody</b>           |                       | Min. 4 bar (při tl. Stěrky min 4 mm)            |
| <b>Obsah chloridových iontů</b>      |                       | < 0,05 %                                        |
| <b>Soudržnost</b>                    |                       | > 1,5 MPa                                       |
| <b>Odolnost proti karbonataci</b>    |                       | < d <sub>k</sub> - vyhovuje                     |
| <b>Modul pružnosti</b>               |                       | > 15 GPa                                        |
| <b>Vázané smršťování / rozpínání</b> |                       | > 1,5 MPa                                       |
| <b>Reakce na oheň</b>                |                       | Třída A1                                        |

- **Krystol Mix** – Prášková těsnicí přísada, která se přidává do čerstvého betonu. Je vyrobena na bázi portlandských cementů a chemikálií, které v masě betonu vytváří nerozpustné krystaly. Chemicko-fyzikálním procesem dochází k zaplňování pórů a zabránění prostupu vlhkosti a ostatních kapalin. Krystol Mix snižuje potřebu vody v betonové směsi, zlepšuje zpracovatelnost a zvyšuje pevnost betonu. Nadále není potřeba hotovou konstrukci opatřovat těsnícím nátěrem. Příklad je určená pro použití u všech betonových konstrukcí.

Krystol Mix zlepšuje zpracovatelnost a čerpatelnost betonové směsi. Má plastifikační účinky, které snižují spotřebu vody (při stejné zpracovatelnosti) o 5 až 10 % a také zvyšuje finální pevnost betonu. Dávkuje se v 1,5 až 2% množství cementu. [15]

Tabulka č. 7 Technické parametry - Krystol Mix [15]

|                                                   |                                     |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Barva</b>                                      | Šedá                                |
| <b>Objemová hmotnost</b>                          | 1480 kg/m <sup>3</sup>              |
| <b>Hrubost</b>                                    | Jemný prášek 45 – 150 µm            |
| <b>pH (po smíchání s vodou)</b>                   | 13                                  |
| <b>Obsah vodou rozpustných chloridů</b>           | < 0,1 % hmotnostně                  |
| <b>Obsah alkálií (ekvivalent Na<sub>2</sub>O)</b> | < 5,0 % hmotnostně                  |
| <b>Kapilární absorpce (90 denní uložení)</b>      | < 60 % hmotnostně (kontrolní směsi) |
| <b>Pevnost v tlaku</b>                            | > 85 % kontrolní směsi              |
| <b>Obsah vzduchu v čerstvém betonu</b>            | < 2 %                               |

- **Krystol T1 a T2** – Zde se jedná o krystalizační nátěr. Aktivní látky přípravku osmotickým tlakem penetrují do betonové hmoty a vytvářejí krystaly. Opět dochází k zabránění prostupu vlhkosti, tlakové vody a ropných látek. Beton je chráněn i proti agresivním vodám a chloridům.

Krystol T1 se používá jako primární nátěr pro docílení maximálního efektu. Krystol T2 slouží jako druhá vrstva, nebo se dá použít i jako samostatná ochrana před vzdušnou vlhkostí. Jeho povrch je abrazivzdorný a uzavřený. Nátěr je nutno aplikovat na očištěný beton zbavený prachu, všech nečistot a kontaminací. Povrch musí být důkladně provlhčen. Oba typy se mohou aplikovat pomocí nástříku, nátěru, stěrkováním a dá se použít jako vysyp do čerstvého betonu. Použití je vhodné pro všechny betonové konstrukce. [16]

Tabulka č 8 - Technické parametry - Kystol T1 a T2 [16]

|                                       |                       |                        |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Barva</b>                          | Šedá                  |                        |
| <b>Objemová hmotnost – Krystol T1</b> | <b>Sypná</b>          | 1100 kg/m <sup>3</sup> |
|                                       | <b>Čerstvé malty</b>  | 1700 kg/m <sup>3</sup> |
|                                       | <b>Zatvrdlé malty</b> | 1250 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Objemová hmotnost – Krystol T2</b> | <b>Sypná</b>          | 1250 kg/m <sup>3</sup> |
|                                       | <b>Čerstvé malty</b>  | 1900 kg/m <sup>3</sup> |
|                                       | <b>Zatvrdlé malty</b> | 1950 kg/m <sup>3</sup> |

|                            |                   |                           |
|----------------------------|-------------------|---------------------------|
| <b>Hrubost</b>             |                   | Jemný prášek 45 – 150 µm  |
| <b>pH po namíchání</b>     | <b>Krystol T1</b> | 13                        |
|                            | <b>Krystol T2</b> | 11 ± 1                    |
| <b>Rychlost penetrace</b>  |                   | Cca 2 mm / týden          |
| <b>Odolnost tlaku vody</b> |                   | Min. 50 m vodního sloupce |
| <b>Reakce na oheň</b>      |                   | Třída A2-s1, d0           |

### 2.4.3 Sika AG

Společnost byla založena v roce 1910 a postupně si upevňovala svoji pozici na trhu stavební chemie a průmyslových tmelů. Dnes nabízí velice rozsáhlý sortiment zboží, ve kterém můžeme najít i takové produkty, které účinkují principem sekundární krystalizace. [18]

#### Produkty s krystalizačním účinkem:

- **Sika WT-200 P** – Přísada speciálně vyvinutá pro výrobu vodonepropustných betonů. Jedná se o kombinovanou těsnící a krystalizační přísadu se schopností překlenovat trhliny. Skládá se z cementu, funkčních aditiv a plniva, jejichž reakcí dochází k hydrofobizaci a vyplnění soustavy pórů a kapilár v betonu. Krystalizační přísada reaguje za přítomnosti hydroxidu vápenatého spolu s dalšími vedlejšími produkty hydratace a s vlhkostí. Dochází k přeměně na uhličitán vápenatý a je docíleno vyplnění a blokování malých pórů a mikrotrhlin v betonu. Tím dochází k trvalému utěsnění proti vodě a dalším kapalinám. Výrobce uvádí, jako výhody při použití, snížení průniku tlakové vody a kapilární absorpce betonu, dále uvádí samoregenerační schopnost a zvýšenou odolnost vůči chemickému namáhání. Přísadu doporučuje použít pro základové konstrukce, garáže, tunely, přehrady, čistírny odpadních vod apod.

Přísada je určena pro použití do betonových směsí s minimálním obsahem cementu  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a maximálním vodním součinitelem 0,45. Konzistence čerstvé směsi by měla být S3/S4, kterou lze docílit přidáním superplastifikačních přísad.

Dávkování probíhá společně se záměsovou vodou, ve které se předem rozmíchá, nebo se přidává do kameniva a míchá se alespoň 120 sekund před přidáním cementu a záměsové vody. [19,20]

Tabulka č. 9 Technické parametry - Sika WT-200 P [19]

|                                                         |                                         |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Chemická báze</b>                                    | Směs cementu, funkčních aditiv a plniva |
| <b>Objemová hmotnost</b>                                | $750 \pm 50 \text{ kg/m}^3$             |
| <b>Obsah chloridových iontů</b>                         | < 0,10 %                                |
| <b>Obsah alkálií (<math>\text{Na}_2\text{O}</math>)</b> | < 4,0 %                                 |

- **SikaSeal-210 Migrating** – Cementová hydroizolační stěrka, která obsahuje migrační a krystalizační příměsi. Utěšňuje beton proti průniku vody a je vhodná pro přímý styk s pitnou vodou. Po procesu kapilární migrace do struktury betonu dojde k vytvoření minerální krystalické struktury, která utěšňuje póry a kapiláry před pronikáním vody a jiných kapalin. Dochází ke snižování kapilární nasákavosti stěrky vlivem povrchově aktivních látek.

Běžně se aplikuje ve dvou vrstvách, ale v oblastech se zvýšeným rizikem se doporučuje aplikovat třetí vrstvu. Podklad musí být neporušený, čistý a bez výkvětů. Dávkování se pohybuje mezi 5,1 až 5,6 l vody na 25 kg stěrky a míchání by mělo probíhat za nízko-rychlostních otáček. Aplikovat se může ručně i strojně pomocí pistole. Není vhodné aplikovat na přímém slunci, silném větru nebo dešti. [21]

Tabulka č. 10 Technické parametry - SikaSeal-210 Migrating [21]

|                                 |                                                                        |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Chemická báze                   | Portlandský cement, křemičité plnivo, příměsi a specializované přísady |
| Objemová hmotnost čerstvé malty | $1900 \text{ kg/m}^3$                                                  |
| Zrnitost                        | $D_{\max}$ : 1 mm                                                      |
| Tloušťka vrstvy                 | Min. 2 mm / max. 5 mm                                                  |
| Doba zpracovatelnosti           | ~ 60 min. při +20 °C                                                   |
| Pevnost v tlaku                 | ~ 35 MPa (po 28 dnech)                                                 |
| Pevnost v tahu za ohybu         | ~ 6 MPa (po 28 dnech)                                                  |

#### 2.4.4 Nekap s.r.o.

Od roku 1992 společnost Nekap s.r.o. distribuuje v České republice výrobky kanadské společnosti *Xypex Chemical Corporation*, od nichž v roce 1999 získali povolení tyto produkty vyrábět. Výrobky řady Xypex byly použity při sanacích spodních staveb průmyslových objektů, administrativních budov, bytových i rodinných domů, při dotěšňování tunelů a jiných staveb. [22]

#### Produkty s krystalizačním účinkem:

- **Xypex Concentrate** – Nátěrový systém složený ze směsi portlandského cementu s velmi jemným křemenným pískem a aktivní chemickou bází. V kapilárním systému betonu dochází k růstu vláknitých krystalů na molekulární úrovni. Z běžného betonu vytváří trvale nepropustný pro tlakovou vodu, odolný naftě, olejům a jejich derivátům.

Pro zpracování se používá pitná voda v objemovém poměru 2 : 5 pro aplikaci nátěrem a 3 : 5 pro aplikaci nástřikem. Nanáší se v tloušťce vrstvy 1 mm na předem očištěný, zdrsňený a vodou nasycený podklad, který nesmí být mastný a zatížený stojící vodou. Zpracovatelnost čerstvé hmoty je 30 minut a nepřipouští se dodatečné přidávání vody. [23]

Tabulka č. 11 Technické parametry - Xypex Concentrate [23]

|                                                |                                              |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Nepropustnost pro vodu</b>                  | Min. 0,8 MPa (ČSN EN 12390-8)                |
| <b>Sypná hmotnost suché směsi</b>              | 1,100 ± 50 kg/m <sup>3</sup> (ČSN EN 1097-3) |
| <b>Doba zpracovatelnosti</b>                   | Max. 0,3 hod (+20 °C, 50 % R.V.)             |
| <b>Teplotní zátěž trvalá</b>                   | -32 °C až 130 °C                             |
| <b>Teplotní zátěž periodická</b>               | -185 °C až 1530 °C                           |
| <b>Odolnost proti chemikáliím (trvalá)</b>     | pH = 3 až 11                                 |
| <b>Odolnost proti chemikáliím (periodická)</b> | pH = 2 až 12                                 |

- **Xypex Modified** – Jedná se o sekundární vrstvu pro Xypex Concentrate pro zesílení účinnosti. Nepropustnost pro vodu se zvýší na hodnotu min. 1,2 MPa. Může se ale také použít samostatně na méně zatížené podklady. Má obdobné

vlastnosti jako Xypex Concentrate. Míchá se v poměru 5 : 2 a zpracovatelnost čerstvé směsi je 20 minut. [24]

- **Xypex Admix C-1000 (NF)** – Prášková přísada s obsahem aktivních látek, která se přidává již při výrobě čerstvého betonu. Dochází k zvýšení vodonepropustnosti a pevnosti ztvrdlého betonu a současně pozitivně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Tvorba těsnících krystalů ve struktuře betonu je totožná, jako u nátěrových hmot Xypex.

Přísada se dává buď v suchém stavu do směsi kameniva bez cementu, nebo se aktivuje v záměsové vodě. Ošetřování povrchu takto připraveného čerstvého betonu se provádí trvale vlhkým stavem minimálně 48 hodin. [25]

Tabulka č. 12 Technické parametry - Xypex Admix C-1000 (NF) [25]

|                                                         |                                              |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Vodotěsnost betonu</b>                               | Min. V12 (ČSN EN 12390-8)                    |
| <b>Zvýšení pevnosti betonu (2 % z <math>m_c</math>)</b> | Min. 15 %                                    |
| <b>Sypná hmotnost suché směsi</b>                       | 1,100 ± 50 kg/m <sup>3</sup> (ČSN EN 1097-3) |
| <b>Dávkování Admix C-1000 (z <math>m_c</math>)</b>      | 1 – 3 %                                      |
| <b>Dávkování Admix C-1000 NF (z <math>m_c</math>)</b>   | 0,5 – 1,5 %                                  |

- **Xypex Concentrate DS1** – Kompozitní směs portlandského cementu s velmi jemným křemičitým pískem a aktivní chemickou bází. Používá se jako suchý vsyp do povrchové vrstvy čerstvého betonu. Je určený k utěšňování horizontálních betonových ploch (podlah) proti působení vody a jiných kapalných agresivních látek, včetně průmyslových chemikálií a ropných látek. Zvyšuje ochranu ocelové výztuže v betonu a prodlužuje fyzickou životnost konstrukce.

Aplikuje se přímým sypáním na mírně zavadlý povrch ztuhlého čerstvého betonu. Tento zvlhlý vsyp se mechanicky zapracovává do čerstvého betonu rotační hladičkou s kotoučem a vrtulí. Stane se tak neoddělitelnou součástí povrchu. [26]

Tabulka č. 13 Technické parametry - Xypex Concentrate DS1 [26]

|                                                |                                              |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Vodotěsnost betonu</b>                      | Min. V12 (ČSN EN 12390-8)                    |
| <b>Sypná hmotnost suché směsi</b>              | 1,100 ± 50 kg/m <sup>3</sup> (ČSN EN 1097-3) |
| <b>Teplotní zátěž trvalá</b>                   | -32 °C až 130 °C                             |
| <b>Teplotní zátěž periodická</b>               | -185 °C až 1530 °C                           |
| <b>Odolnost proti chemikáliím (trvalá)</b>     | pH = 3 až 11                                 |
| <b>Odolnost proti chemikáliím (periodická)</b> | pH = 2 až 12                                 |

- Xypex Patch'n Plug** – Speciální tmel pro opravy betonových konstrukcí porušených zejména průsakem vody. Je složen z modifikovaného a vysoce rychlovazného cementu s obsahem aktivní chemické báze. Tento tmel je po aplikaci schopný během několika sekund zastavit jak negativní, tak pozitivní tlak vody do 0,8 MPa. Tmel je dlouhodobě trvanlivý, má velmi dobrou přídržnost k podkladu a v krátkém čase dosahuje vysokých pevností. Oprava spár a trhlin se provádí vysekáním žlábků ve tvaru „U“ v jejich trase (šířkový 25 mm a hluboký 45 mm), v místech průsaku vody je žlábek větší.

Tmel se nanáší opět na očištěný a vodou nasycený povrch. Míchá se s pitnou vodou v objemovém poměru 3,5 : 1 a je ho nutno zpracovat do 3 minut. Z tohoto produktu lze vytvořit i rychle tuhnoucí maltu přidáním písku s velikostí zrna do 1 mm ve hmotnostním poměru 1 : 2. Ošetřování je podobné jako u běžného čerstvého betonu minimálně po dobu 48 hodin. [27]

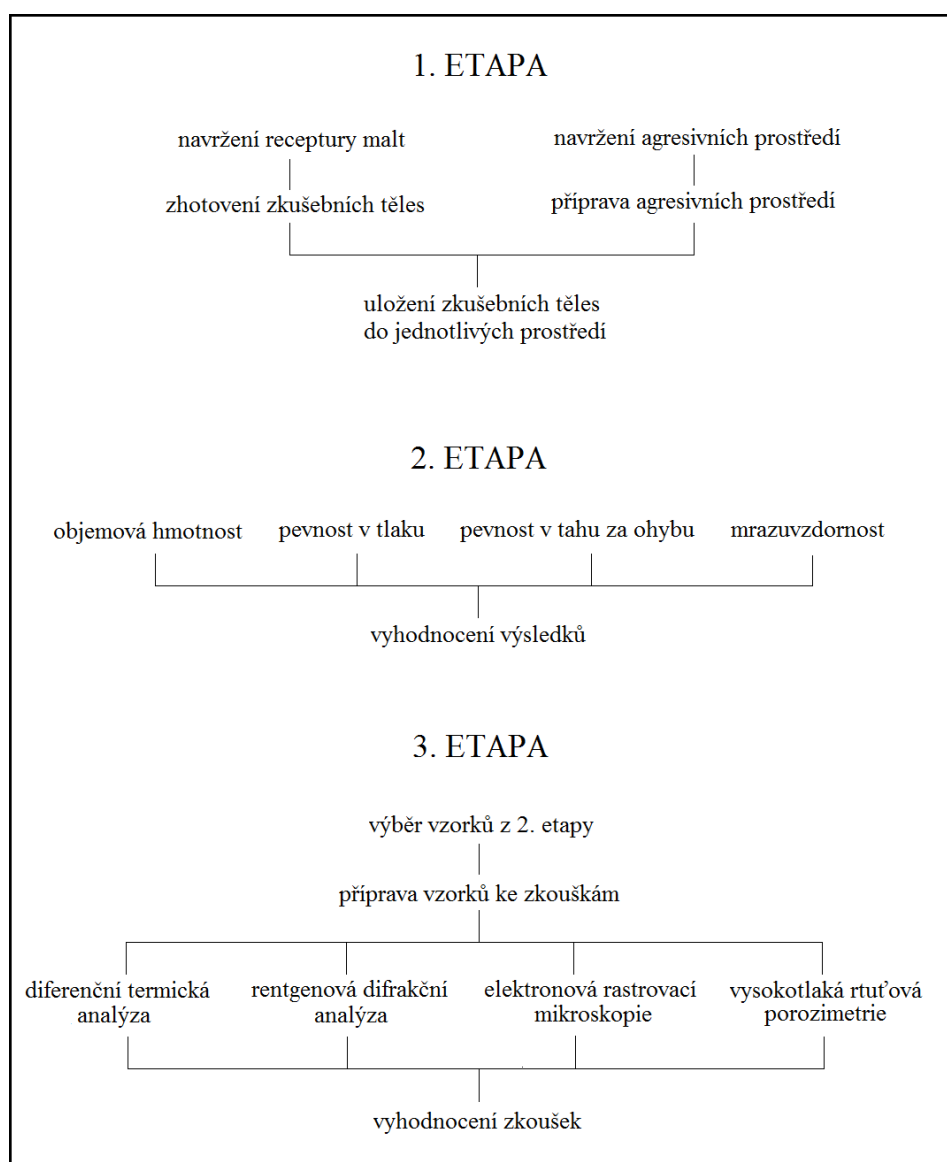
Tabulka č. 14 Technické parametry - Xypex Patch'n Plug [27]

|                                    |                                              |
|------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Pevnost v tlaku – 1 hod.</b>    | Min. 5,0 MPa (ČSN EN 12390-3)                |
| <b>Pevnost v tlaku – 24 hod.</b>   | Min. 15,0 MPa (ČSN EN 12390-3)               |
| <b>Doba tuhnutí</b>                | Max. 3 min. (ČSN P 722115)                   |
| <b>Vodotěsnost malty na betonu</b> | Min. V8 (ČSN EN 12390-8)                     |
| <b>Přídržnost k podkladu</b>       | Min. 1,5 MPa (ČSN EN 1542)                   |
| <b>Sypná hmotnost</b>              | 1,150 ± 50 kg/m <sup>3</sup> (ČSN EN 1097-3) |

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 3 METODIKA PRÁCE

Metodika praktické části je rozdělena do tří etap, ve kterých se řeší problematika vhodného složení zkušebních směsí a uložení do agresivních prostředí, jednotlivé zkušební metody a zpracování výsledků. Grafické zobrazení je uvedeno na obrázku č. 6.



Obrázek č. 6 Grafické zobrazení etapizace praktické části diplomové práce

### 3.1 Popis použitých surovin

#### 3.1.1 Balený portlandský cement CEM I 42,5 R

Použitý byl portlandský cement, jehož hlavní složka je portlandský slínek (95 – 100 %). Má rychlý nárůst pevností, vysokou počáteční i konečnou pevnost a rychlý vývin hydratačního tepla. V tabulkách č. 15 a 16 jsou uvedeny vlastnosti cementu z technického listu výrobce.

Tabulka č. 15 Mechanické vlastnosti cementu dle technického listu výrobce

| Doba od zhotovení [den] | Pevnost v tlaku [MPa] | Pevnost v tahu za ohybu [MPa] | Metoda   |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------|
| 7                       | 51                    | 8                             | EN 196-1 |
| 28                      | 61                    | 9                             | EN 196-1 |
| 90                      | 67                    | 9                             | EN 196-1 |

Tabulka č. 16 Chemické vlastnosti cementu dle technického listu výrobce

| Parametr                       | Průměrná hodnota [%] | Metoda   |
|--------------------------------|----------------------|----------|
| CaO                            | 64,2                 | EN 196-2 |
| SiO <sub>2</sub>               | 19,5                 | EN 196-2 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,7                  | EN 196-2 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,2                  | EN 196-2 |
| MgO                            | 1,3                  | EN 196-2 |
| SO <sub>3</sub>                | 3,2                  | EN 196-2 |
| Cl <sup>-</sup>                | 0,047                | EN 196-2 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,78                 | EN 196-2 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,09                 | EN 196-2 |
| Na <sub>2</sub> O ekvivalent   | 0,6                  | EN 196-2 |
| Nerozpustný zbytek             | 0,7                  | EN 196-2 |
| Ztráta žíháním                 | 3,3                  | EN 196-2 |

#### 3.1.2 Normalizovaný křemenný písek CEN

Pro zhotovení všech směsí cementových malt bylo použito normalizovaného křemenného písku CEN, dodaný v sáčcích s hmotností  $1350 \pm 5$  g o velikosti zrn 0 – 2 mm od výrobce Filtrační písky, spol. s r.o. Složení a vlastnosti odpovídají EN 196-1.

### 3.1.3 Krystalizační přísada Xypex Admix

Jedná se o práškovou přísadu, která vytváří nerozpustné krystaly díky aktivní chemické bázi při reakci s vedlejšími produkty hydratace cementu. Ty utěsní póry a kapiláry, čímž dochází k zvýšení vodonepropustnosti. Podrobnější informace jsou uvedeny v teoretické části této práce.

V tabulce č. 17 můžeme vidět výsledky chemického rozboru této přísady provedené v akreditované laboratoři LABTECH s.r.o., Brno.

Tabulka č. 17 Chemický rozbor krystalizační přísady Xypex Admix

| Parametr                 | Jednotka   | Obsah          | Nejistota měření |
|--------------------------|------------|----------------|------------------|
| Sušina                   | %          | 97,64          | 10%              |
| Ztráta sušením (105 °C)  | %          | 2,36           | 10%              |
| Ztráta žíháním (1100 °C) | % suš.     | 23,7           | 10%              |
| Chloridy                 | mg/kg suš. | 258            | 20%              |
| Sírany                   | mg/kg suš. | 20500          | 20%              |
| Organické látky          | % suš.     | 7,03           | 20%              |
| Oxid vápenatý            | % suš.     | 45,7           | 10%              |
| Oxid hořečnatý           | % suš.     | 0,734          | 10%              |
| Oxid draselný            | % suš.     | 0,387          | 10%              |
| Oxid hlinitý             | % suš.     | 2,34           | 10%              |
| Oxid fosforečný          | % suš.     | 0,048          | 10%              |
| Oxid železitý            | % suš.     | 1,74           | 10%              |
| FeO                      | % suš.     | nelze stanovit |                  |
| Chrom                    | mg/kg suš. | 120            | 20%              |
| Oxid chromitý            | % suš.     | 0,017          | 10%              |
| Oxid barnatý             | % suš.     | 0,028          | 10%              |
| Oxid manganatý           | % suš.     | 0,102          | 10%              |
| Oxid sodný               | % suš.     | 6,61           | 10%              |
| Oxid titaničitý          | % suš.     | 0,129          | 10%              |
| Oxid zirkoničitý         | % suš.     | 0,019          | 10%              |

Poznámka:

Vzorek byl pro stanovení oxidů vystaven s LiBO<sub>2</sub>

Nejistota měření je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95% s koeficientem rozšíření  $k = 2$  a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod spodní a nad horní mezí stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

### 3.1.4 Polypropylenová vlákna Fibrin 3/15

Polypropylenová vlákna byla přidávána do maltových směsí pro posouzení jejich vlivu na výsledné vlastnosti díky jejich schopnosti snižovat riziko vzniku smršťovacích trhlin. Výrobce je společnost KrampeHarex CZ s.r.o. V tabulce č. 18 jsou uvedeny vlastnosti z technického listu výrobce.

Tabulka č. 18 Vlastnosti vláken Fibrin 3/15 dle technického listu výrobce

| Délka [mm] | Průměr [μm] | Průřez | Materiál     | Pevnost v tahu [MPa] |
|------------|-------------|--------|--------------|----------------------|
| 3 ± 10 %   | 15 ± 10 %   | kulatý | polypropylen | 300 ± 15 %           |

## 3.2 Popis prováděných zkoušek

### 3.2.1 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost je definována jako poměr hmotnosti tělesa k celkovému objemu tělesa včetně pórů, mezer a dutin, tedy objemu stanoveného z vnějších rozměrů.

Zkušební trámečky byly po vytažení z vodného agresivního prostředí otřeny vlhkou textilií a následně zváženy s přesností na 0,01 g. Dále byly posuvným měřítkem zjištěny jejich rozměry s přesností na 0,01 mm. Poté se z těchto hodnot vypočítala objemová hmotnost každého trámečku.

Objemová hmotnost se vypočítá ze vztahu:  $D = \frac{m}{V}$

Kde:

D objemová hmotnost ztvrdlé malty [kg/m<sup>3</sup>]

m hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V objem zkušebního tělesa [m<sup>3</sup>]

### 3.2.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška byla prováděna dle ČSN EN 1015-11. Zatěžování vzorků bylo uskutečněno na zkušebním stroji pro materiál (VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig), jako třibodový tah za ohybu. Umístění zkušebního tělesa do lisu bylo centrické a směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění směsí. Zatěžování probíhalo plynule, bez nárazu. Tato

Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá ze vztahu:  $R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$

Kde:

|       |                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------|
| $R_f$ | pevnost v tahu za ohybu ztvrdlé malty [MPa]                         |
| $F$   | zatížení vyvolané lisem potřebné pro porušení zkušebního tělesa [N] |
| $b$   | šířka průřezu zkušebního tělesa [mm]                                |
| $h$   | výška průřezu zkušebního tělesa [mm]                                |
| $l$   | rozpětí podpor [mm]                                                 |

### 3.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla prováděna dle ČSN EN 1015-11 na polovinách hranolů, které byly rozlomeny při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. K této zkoušce se použil opět zkušební přístroj na materiál (VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig). Zlomky vzorků se umístily mezi dvě vodorovné destičky lisu, opět kolmo na směr hutnění a zatěžovaly se plynule až do porušení.

Pevnost v tlaku se vypočítá ze vztahu:  $R_c = \frac{F}{S}$

Kde:

|       |                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------|
| $R_c$ | pevnost v tlaku ztvrdlé malty [MPa]                                 |
| $F$   | zatížení vyvolané lisem potřebné pro porušení zkušebního tělesa [N] |
| $S$   | tlačná plocha [mm]                                                  |

### 3.2.4 Mrazuvzdornost

Zkouška byla provedena dle ČSN 72 2452 na zkušebních tělesech velikosti 40 x 40 x 160 mm. Ty byly ponechány v laboratorním prostředí a 24 hod před zmrazovacími a rozmrazovacími cykly se umístily do vody. Po vyjmutí z vody byly uloženy do cyklovacího zařízení, v němž byly vystaveny 25 cyklům. Jeden cyklus sestává z dvou hodin postupného ochlazování na teplotu -20 °C, dvou hodin udržování této teploty a následným zaplněním chladicí jednotky vodou, která se udržuje po dobu dvou hodin na teplotě +20 °C. Po uplynutí 25 cyklů se tělesa vyjmula a zkoušela se jejich pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Následně se vypočítal součinitel mrazuvzdornosti. Pokud je tento součinitel nižší než 0,75, materiál je považován za nemrazuvzdorný.

Součinitel mrazuvzdornosti se vypočítá ze vztahu:  $s_m = \frac{R_{f,mr\acute{a}z}}{R_{f,p\acute{o}r}}$

Kde:

|                      |                                                      |
|----------------------|------------------------------------------------------|
| $s_m$                | součinitel mrazuvzdornosti [-]                       |
| $R_{f,mr\acute{a}z}$ | pevnost v tahu za ohybu zmrazovaných trámečků [MPa]  |
| $R_{f,p\acute{o}r}$  | pevnost v tahu za ohybu porovnávacích trámečků [MPa] |

### 3.2.5 Rentgenová difrakční analýza – RTG

Každá krystalická látka má jedinečné uspořádání svých částic. Tyto částice tvoří rovnoběžné plochy, které mají určitou vzdálenost a ta je typická pro krystal dané látky. Po dopadu rentgenového záření o známé vlnové délce na vzorek a následné interferenci tohoto záření, lze určit mezimřížkovou vzdálenost dané krystalické látky. Analýzou záznamu z tohoto měření (difraktogramu) lze identifikovat krystalické látky, které jsou ve vzorku přítomny.

### 3.2.6 Diferenční termická analýza – DTA

Diferenční termická analýza je dynamická tepelně analytická metoda založena na sledování teplotních rozdílů, při plynulém ohřevu nebo ochlazování, mezi zkoumaným vzorkem a inertním standardem. Ve vzorku dochází ke změnám

fyzikálních a někdy také chemických vlastností. Tyto změny se projevují uvolněním nebo spotřebováním tepelné energie (endotermické a exotermické pochody). DTA je často spojována s termogravimetrií (TG), u které sledujeme změnu hmotnosti vzorku na měnící se teplotě. Dále je zde znázorněna i křivka derivační termogravimetrie (DTG), která neobsahuje prodlevy a zlomy, ale píky, obdobně jak tomu je u DTA. Inflexní body zlomů TG křivky odpovídají vrcholům píků u křivky DTG na teplotní ose.

### **3.2.7 *Vysokotlaká rtuťová porozimetrie***

Je to metoda studia struktury pórovitých látek, založena na jevu kapilární deprese. Při ponoření pórovitého materiálu do kapaliny, která ho špatně smáčí – rtuť, může tato kapalina vniknout do jeho pórů pouze působením vnějšího tlaku. Vzorek se vloží do měřicí nádoby, ze které se odčerpá vzduch. Následně se zaplní rtutí do požadované výšky a začne se vyvíjet tlak. Podle poklesu rtuti vzhledem k tlakovému zatížení můžeme určit velikost a objem pórů.

### **3.2.8 *Rastrovací elektronová mikroskopie – REM***

Používá se k pozorování povrchů látek. Primární elektrony jsou urychleny potenciálem mezi katodou a anodou. Ty mají ve svém středu kruhový otvor, kterým se primární elektrony dostávají do soustavy elektromagnetických čoček. Čočky mají za úkol co nejvíce zmenšit průměr svazku elektronů. Tento paprsek je před dopadem na povrch vzorku rozpohybován vychylovacími cívkami tak, že pokryje řádky – rastruje. Počet řádků je možné měnit. K zobrazení povrchu se využívají sekundární a odražené elektrony. Z vyvýšenin na povrchu vzorku se do detektoru dostane více sekundárních elektronů, ty se zobrazí jako světlé místo. Naopak prohlubeniny se zobrazí tmavěji. Produkce odražených elektronů je závislá na středním atomovém čísle. Oblasti tvořené těžšími prvky budou světlé a oblasti s lehčími prvky naopak tmavé.

## 4 1. ETAPA

V první etapě proběhlo navržení receptury maltových směsí. Nejvhodnější se jevila varianta použití normalizovaného písku CEN, portlandského cementu CEM I 42,5 R, krystalizační přísady typu Xypex Admix a polypropylenových vláken Fibrin 3/15. V tabulce č. 19 je uvedené použité množství surovin potřebné k vyrobení jedné trojformy vzorků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

Tab. č. 19 Množství surovin na přípravu jedné trojformy vzorků

| Surovina                          | Množství [g]      |
|-----------------------------------|-------------------|
| Normalizovaný písek CEN           | 1350              |
| Portlandský cement CEM I 42,5 R   | 450               |
| Záměsová voda                     | 225               |
| Krystalizační přísada Xypex Admix | 2,25 (0,5 % z mc) |
|                                   | 6,75 (1,5 % z mc) |
| Vlákna Fibrin 3/15                | 0,9 (0,05 %)      |

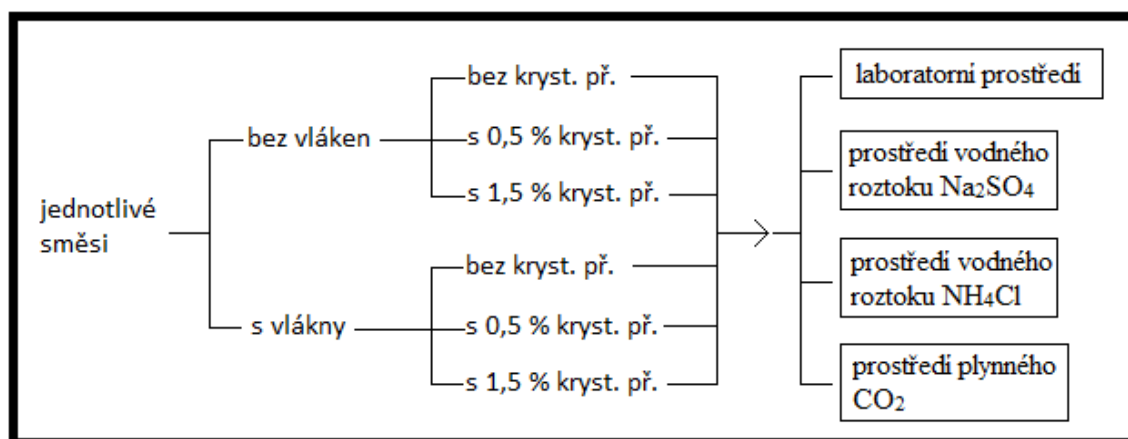
Zhotovení zkušebních trámeček probíhalo pomocí míchacího zařízení (MEZ MOHELNICE – MOT1), následným plněním a vibračním hutněním směsí v ocelových formách. Před vložením směsi do míchacího zařízení, se z důvodu lepší homogenizace jednotlivých surovin provádělo ruční míchání. Postupně se do míchací nádoby umístil písek, cement, vlákna a směs se homogenizovala. Následně se přidala voda s předem rozmísenou krystalizační přísadou a opět se směs ručně promíchala.

Takto zhotovené formy se nechaly 24 hodin v laboratoři, poté se trámečky odformovaly a umístily na 48 hodin do vlhkého uložení z důvodu povrchového ošetřování. Po tomto procesu se všechny vzorky nechaly zrát v laboratorním prostředí o teplotě  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu  $(50 \pm 5) \%$  po dobu 25 dní, čili 28 dní od zhotovení. Následně byly uloženy do různých prostředí.

Jednotlivé vzorky byly uloženy celkem ve čtyřech prostředích. První sada byla ponechána v laboratorních podmínkách bez působení agresivních vlivů. Druhá sada byla uložena ve vodném roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  o koncentraci 36 000 mg/l  $\text{SO}_4$  iontů. Třetí

sada zkušebních těles ve vodném roztoku  $\text{NH}_4\text{Cl}$  o koncentraci 3 000 mg/l  $\text{NH}_4$  iontů a čtvrtá sada v prostředí plynného  $\text{CO}_2$  o koncentraci 65 % a relativní vlhkosti 75 %.

Sady vzorků byly v těchto prostředích uloženy po dobu 28, 90 a 180 dní. Následně na nich byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.



Obrázek č. 7 Grafické zobrazení složení zkušebních směsí a jejich uložení do jednotlivých prostředí

## 5 2. ETAPA

Po dosažení požadované doby uložení v jednotlivých prostředích se u vzorků stanovila objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a mrazuvzdornost.

### 5.1 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 28 dní v jednotlivých prostředích

V následujících tabulkách č. 20 – 24 jsou uvedeny průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu pro zkušební vzorky uložené 28 dní v jednotlivých prostředích po předešlém uložení 28 dní v laboratorních podmínkách. Grafické znázornění těchto pevností je uvedeno v grafech č. 2 – 7.

Tabulka č. 20 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 28 dní v laboratorním prostředí

| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z $m_c$ ) [%] | $\emptyset D$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\emptyset R_f$ [MPa] | $\emptyset R_c$ [MPa] |
|----------------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| LAB            | 0                | 0                                          | 2160                               | 8,85                  | 49,4                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2160                               | 9,53                  | 49,2                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2180                               | 7,80                  | 50,4                  |
|                | 0,05             | 0                                          | 2060                               | 7,38                  | 39,3                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2100                               | 8,65                  | 40,1                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2020                               | 7,04                  | 34,0                  |

Tabulka č. 21 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 28 dní ve vodném prostředí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

| Ozn. prostředí                  | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z $m_c$ ) [%] | $\emptyset D$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\emptyset R_f$ [MPa] | $\emptyset R_c$ [MPa] |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0                | 0                                          | 2250                               | 9,92                  | 44,9                  |
|                                 |                  | 0,5                                        | 2240                               | 9,58                  | 44,0                  |
|                                 |                  | 1,5                                        | 2200                               | 10,12                 | 42,6                  |
|                                 | 0,05             | 0                                          | 2130                               | 8,91                  | 30,6                  |
|                                 |                  | 0,5                                        | 2070                               | 7,84                  | 28,9                  |
|                                 |                  | 1,5                                        | 2100                               | 8,30                  | 27,9                  |

Tabulka č. 22 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 28 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$

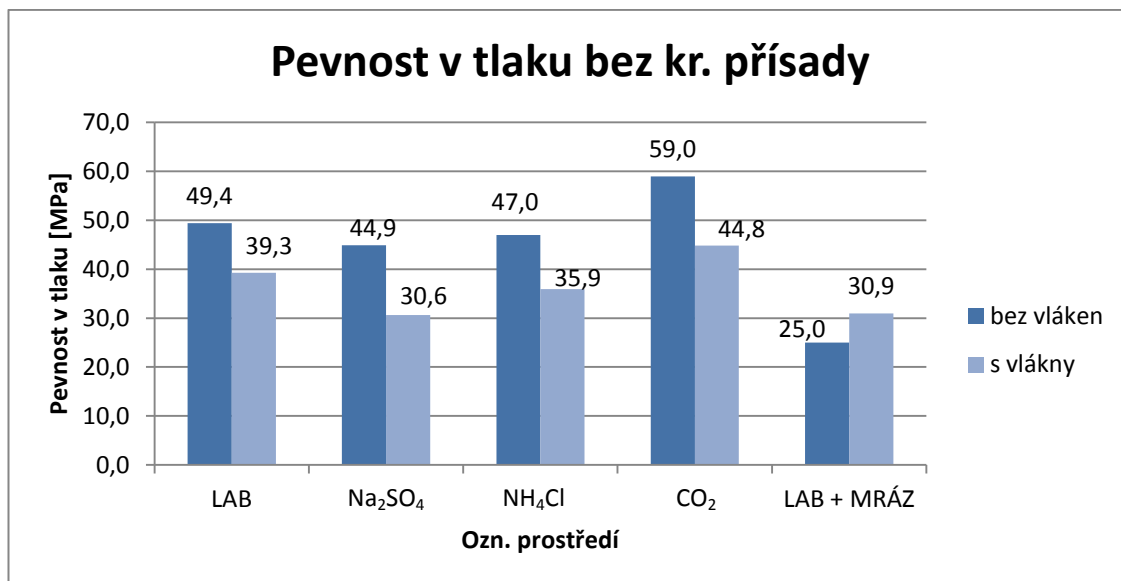
| Ozn. prostředí         | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z $m_c$ ) [%] | $\emptyset D$ [ $\text{kg/m}^3$ ] | $\emptyset R_f$ [MPa] | $\emptyset R_c$ [MPa] |
|------------------------|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\text{NH}_4\text{Cl}$ | 0                | 0                                          | 2240                              | 8,19                  | 47,0                  |
|                        |                  | 0,5                                        | 2260                              | 8,32                  | 47,9                  |
|                        |                  | 1,5                                        | 2220                              | 7,92                  | 50,4                  |
|                        | 0,05             | 0                                          | 2100                              | 7,52                  | 35,9                  |
|                        |                  | 0,5                                        | 2120                              | 7,34                  | 39,0                  |
|                        |                  | 1,5                                        | 2130                              | 7,52                  | 36,9                  |

Tabulka č. 23 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 28 v plynném prostředí  $\text{CO}_2$

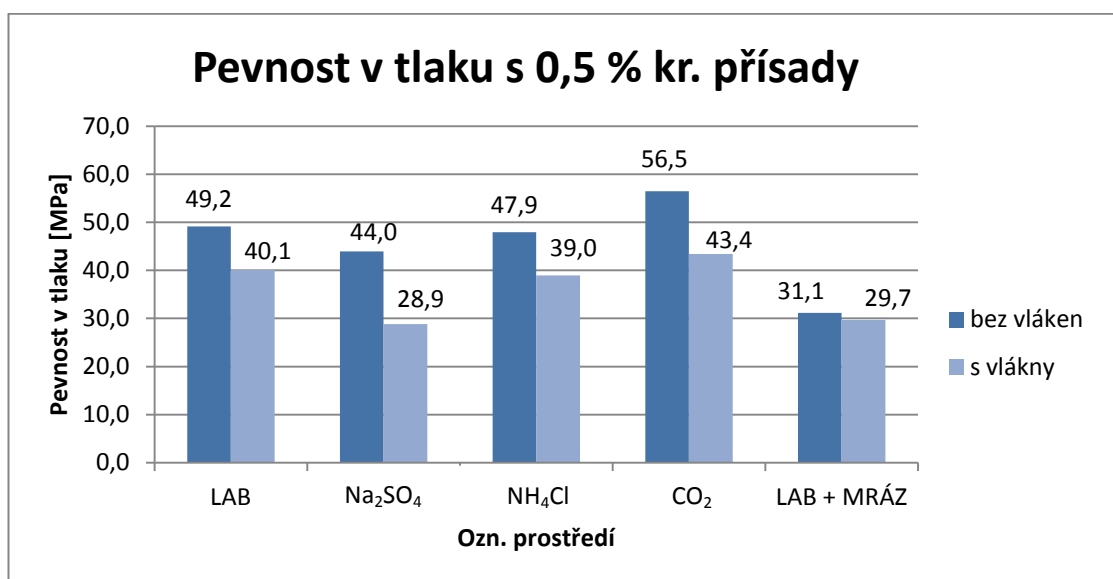
| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z $m_c$ ) [%] | $\emptyset D$ [ $\text{kg/m}^3$ ] | $\emptyset R_f$ [MPa] | $\emptyset R_c$ [MPa] |
|----------------|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\text{CO}_2$  | 0                | 0                                          | 2230                              | 6,74                  | 59,0                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2220                              | 6,84                  | 56,5                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2220                              | 7,65                  | 57,7                  |
|                | 0,05             | 0                                          | 2110                              | 6,40                  | 44,8                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2090                              | 6,73                  | 43,4                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2100                              | 6,50                  | 43,5                  |

Tabulka č. 24 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 28 dní v laboratorním prostředí a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

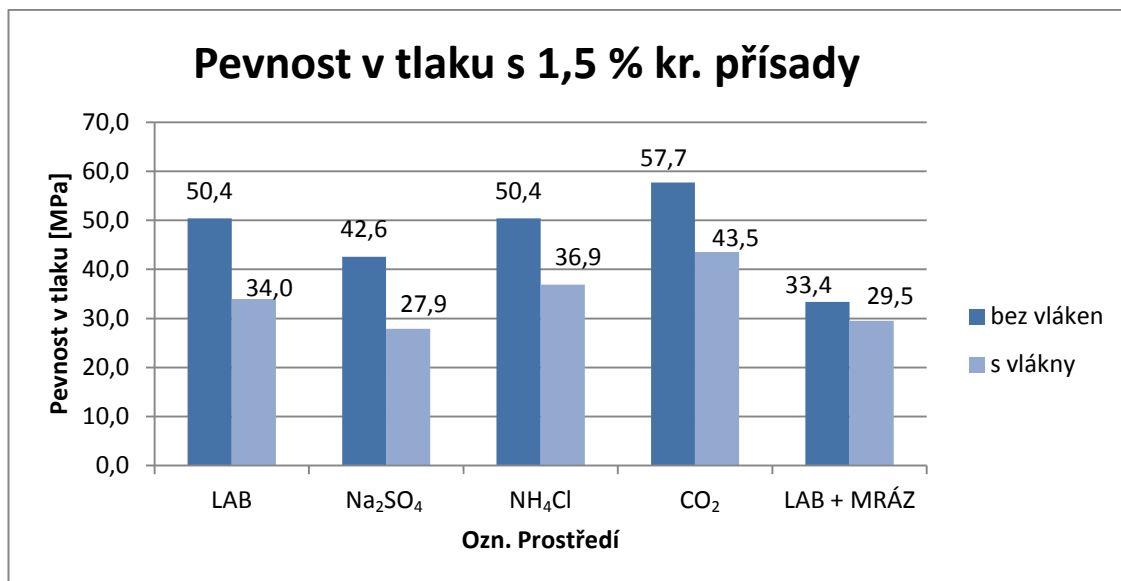
| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z $m_c$ ) [%] | $\emptyset D$ [ $\text{kg/m}^3$ ] | $\emptyset R_f$ [MPa] | $\emptyset R_c$ [MPa] |
|----------------|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| MRÁZ           | 0                | 0                                          | 2220                              | 2,83                  | 25,0                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2210                              | 3,84                  | 31,1                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2190                              | 3,53                  | 33,4                  |
|                | 0,05             | 0                                          | 2120                              | 6,36                  | 30,9                  |
|                |                  | 0,5                                        | 2100                              | 6,50                  | 29,7                  |
|                |                  | 1,5                                        | 2060                              | 6,08                  | 29,5                  |



Graf č. 2 Pevnost v tlaku u vzorků bez krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích

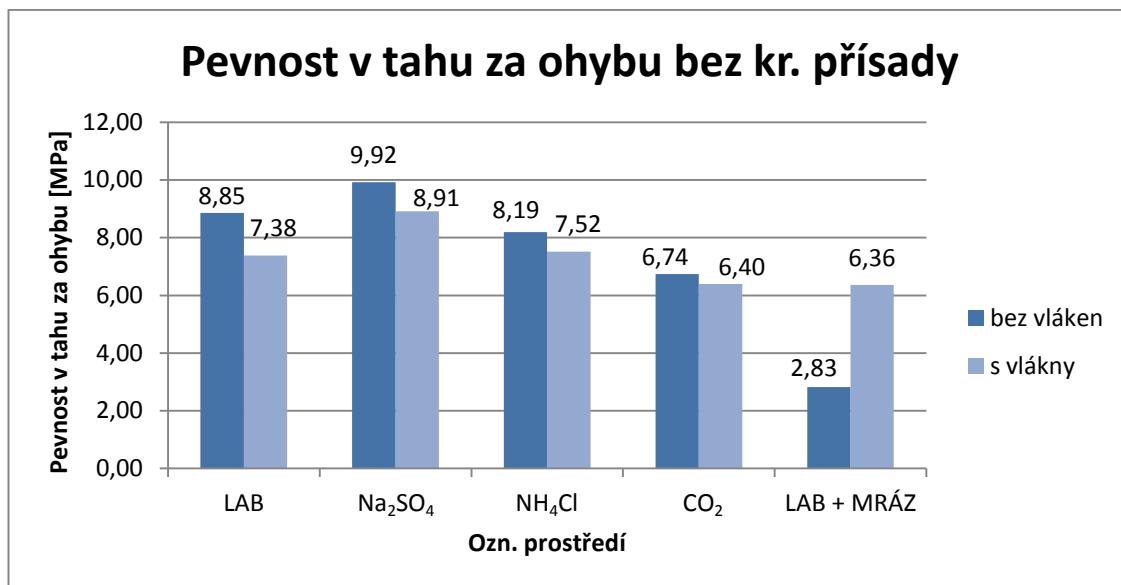


Graf č. 3 Pevnost v tlaku u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích

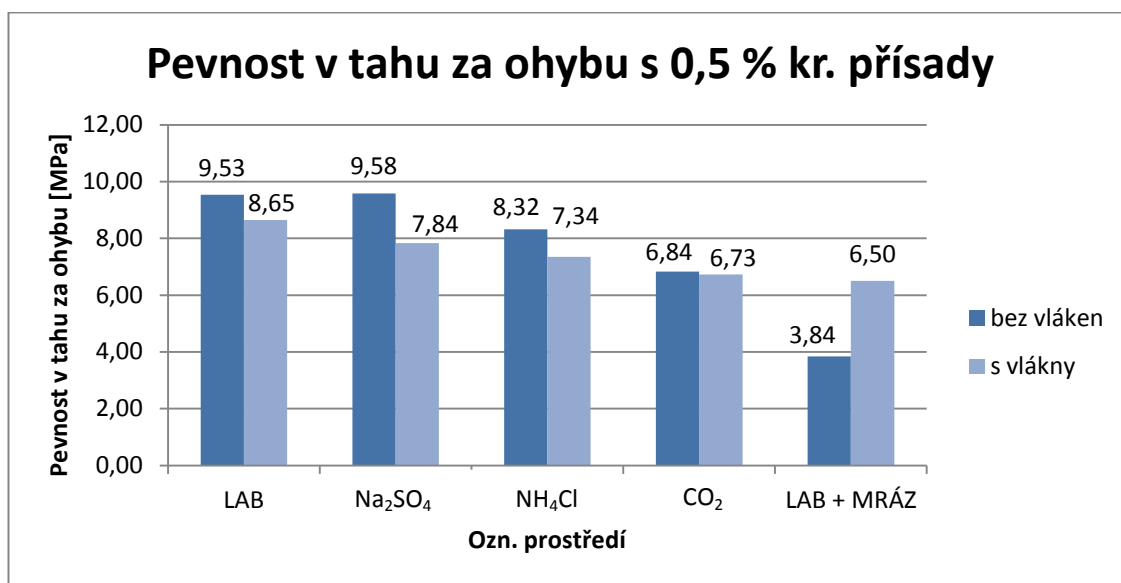


Graf č. 4 Pevnost v tlaku u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích

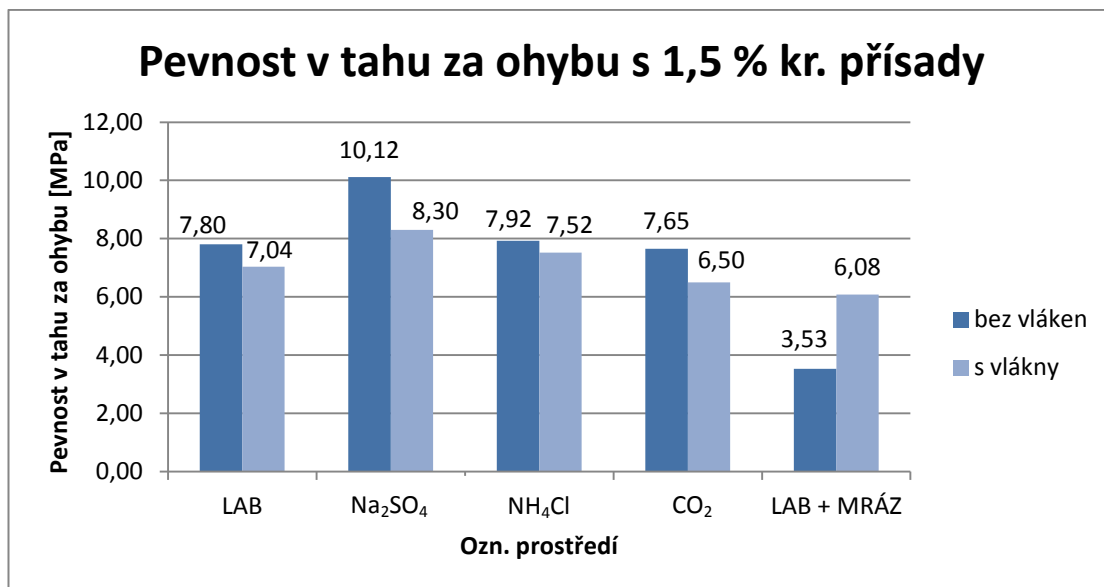
Po 28 denním uložení můžeme u vzorků uložených v laboratorních podmínkách pozorovat stejné, či mírné nárůsty pevností v tlaku (o 2 %) vlivem zvyšujícího se množství krystalizační přísady. Tento efekt ale nenastal při použití 1,5 % této přísady společně s vlákny a došlo ke snížení pevnosti. V prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> došlo k postupnému snižování pevnosti v tlaku s rostoucím množstvím krystalizační přísady. V případě vodného prostředí NH<sub>4</sub>Cl naopak dochází ke zvyšování pevnosti v tlaku s rostoucím množstvím přísady (o 7 %). Pouze u přechodu z 0,5 % na 1,5 % krystalizační přísady u malty s vlákny se pevnost sníží, ale je stále vyšší, než u vzorků bez krystalizační přísady. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku dosáhly vzorky bez přísady a bez vláken uložené v plynném prostředí CO<sub>2</sub>. Následným přidáním krystalizační přísady došlo ke snížení těchto pevností asi o 2 % a to v případě jak s vlákny, tak i bez nich. U vzorků vystavených 25 zmrazovacím cyklům bez vláken došlo k postupným zvyšováním pevností v tlaku (celkově o 30 %) v závislosti na rostoucím množství krystalizační přísady při porovnání s referenční směsí. U takto zatěžovaných vzorků s vlákny se pevnost v tlaku výrazně neliší v závislosti na množství přísady.



Graf č. 5 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků bez krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 6 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 7 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 28 dní v jednotlivých prostředích

Pevnost v tahu za ohybu u vzorků v laboratorním prostředí se po přidání 0,5 % krystalizační přísady zvýšila (o 8 %), ale následně u 1,5 % se oproti vzorkům bez přísady snížila (o 12 %). V prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> došlo k mírnému poklesu pevnosti v tahu za ohybu při použití 0,5 % krystalizační přísady, ale u 1,5 % se tato pevnost opět zvýšila. Prostředí vodného NH<sub>4</sub>Cl se neprojevilo žádnými výraznými rozdíly v závislosti na množství krystalizační přísady. V případě působení plynného CO<sub>2</sub> můžeme pozorovat nárůst pevnosti v tahu za ohybu (o 13 %) až při použití 1,5 % kr. přísady. Při použití 0,5 % se výrazná změna neprojevila. Po zatížení mrazem se u vzorků obsahujících vlákna dosáhlo vyšších pevností v tahu za ohybu, než u vzorků, která vlákna neobsahovala. Pevnost v tahu za ohybu se u těchto vzorků s vlákny při použití 0,5 % krystalizační přísady mírně zvýšila (o 2 %), u použití 1,5 % lehce snížila (o 4 %). U vzorků bez vláken došlo k nárůstu pevnosti vlivem přítomnosti krystalizační přísady.

Tabulka č. 24 Vyhodnocení mrazuvzdornosti u vzorků uložených 28 + 28 dní v laboratorním prostředí a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

| Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø R <sub>f,mráz</sub> [MPa] | Ø R <sub>f,por</sub> [MPa] | s <sub>m</sub> [-] | vyhovělo |
|------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|----------|
| 0                | 0                                                   | 2,83                        | 8,85                       | 0,32               | ne       |
|                  | 0,5                                                 | 3,84                        | 9,53                       | 0,40               | ne       |
|                  | 1,5                                                 | 3,53                        | 7,80                       | 0,45               | ne       |
| 0,05             | 0                                                   | 6,36                        | 7,38                       | 0,86               | ano      |
|                  | 0,5                                                 | 6,50                        | 8,65                       | 0,75               | ano      |
|                  | 1,5                                                 | 6,08                        | 7,04                       | 0,86               | ano      |

V tabulce č. 24 můžeme vidět, že mrazuvzdorné jsou ty vzorky, které obsahovaly polypropylenová vlákna.

## 5.2 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 90 dní v jednotlivých prostředích

V tabulkách č. 25 – 29 jsou uvedeny průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu pro zkušební vzorky uložené 90 dní v jednotlivých prostředích po předešlém uložení 28 dní v laboratorních podmínkách. Grafické znázornění těchto pevností je uvedeno v grafech č. 8 – 13.

Tabulka č. 25 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 90 dní v laboratorním prostředí

| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| LAB            | 0                | 0                                                   | 2110                     | 6,91                   | 41,3                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2110                     | 7,30                   | 40,6                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2140                     | 7,10                   | 42,9                   |
|                | 0,05             | 0                                                   | 2050                     | 7,73                   | 35,8                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2050                     | 7,57                   | 35,5                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2030                     | 7,40                   | 36,1                   |

Tabulka č. 26 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 90 dní ve vodném prostředí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

| Ozn. prostředí                  | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0                | 0                                                   | 2230                     | 9,96                   | 53,6                   |
|                                 |                  | 0,5                                                 | 2230                     | 10,23                  | 49,9                   |
|                                 |                  | 1,5                                                 | 2260                     | 10,41                  | 48,8                   |
|                                 | 0,05             | 0                                                   | 2140                     | 10,06                  | 40,6                   |
|                                 |                  | 0,5                                                 | 2100                     | 8,36                   | 40,0                   |
|                                 |                  | 1,5                                                 | 2100                     | 9,52                   | 41,9                   |

Tabulka č. 27 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 90 dní ve vodném prostředí NH<sub>4</sub>Cl

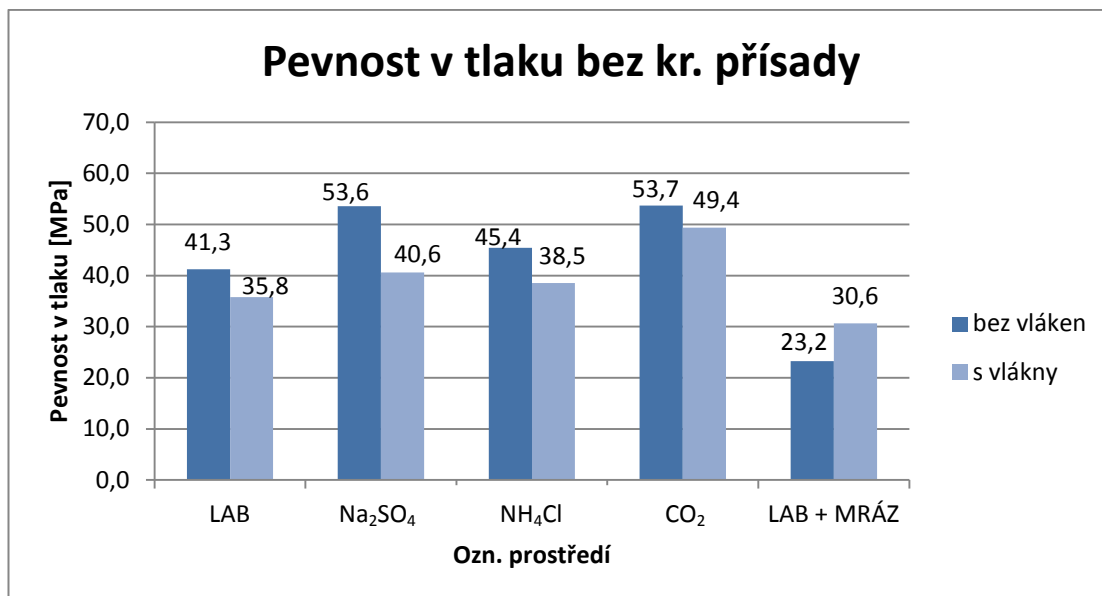
| Ozn. prostředí     | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|--------------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| NH <sub>4</sub> Cl | 0                | 0                                                   | 2200                     | 7,98                   | 45,4                   |
|                    |                  | 0,5                                                 | 2200                     | 7,78                   | 48,6                   |
|                    |                  | 1,5                                                 | 2230                     | 8,61                   | 52,6                   |
|                    | 0,05             | 0                                                   | 2130                     | 7,13                   | 38,5                   |
|                    |                  | 0,5                                                 | 2110                     | 7,17                   | 37,7                   |
|                    |                  | 1,5                                                 | 2140                     | 7,42                   | 38,6                   |

Tabulka č. 28 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 90 v plynném prostředí CO<sub>2</sub>

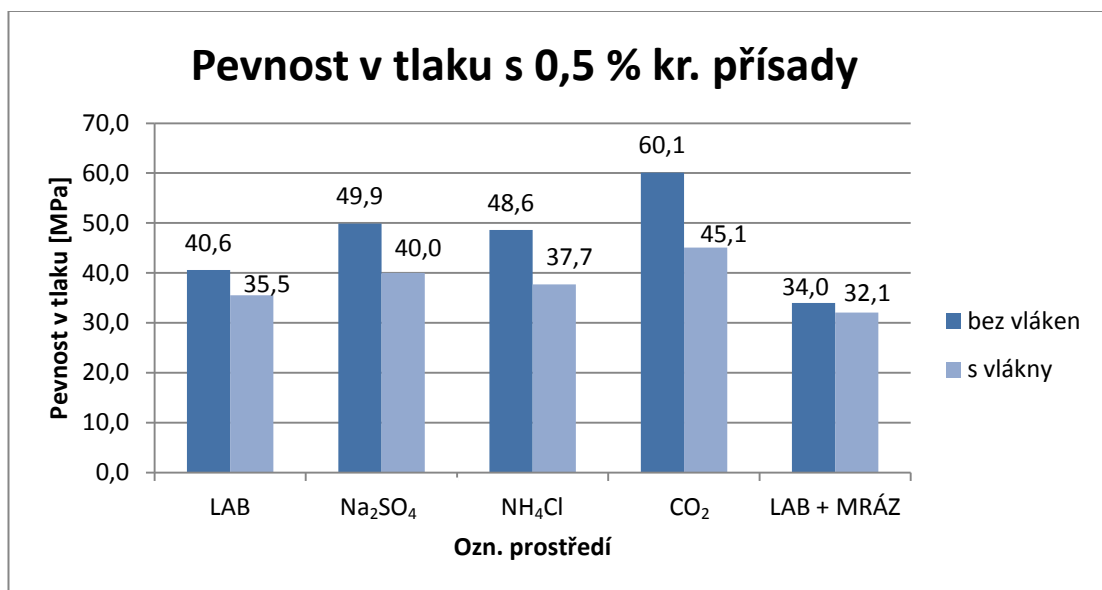
| Ozn. prostředí  | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|-----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| CO <sub>2</sub> | 0                | 0                                                   | 2190                     | 8,94                   | 53,7                   |
|                 |                  | 0,5                                                 | 2200                     | 7,80                   | 60,1                   |
|                 |                  | 1,5                                                 | 2180                     | 8,47                   | 58,1                   |
|                 | 0,05             | 0                                                   | 2100                     | 8,98                   | 49,4                   |
|                 |                  | 0,5                                                 | 2080                     | 8,33                   | 45,1                   |
|                 |                  | 1,5                                                 | 2100                     | 8,39                   | 46,6                   |

Tabulka č. 29 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 90 dní v laboratorním prostředí a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

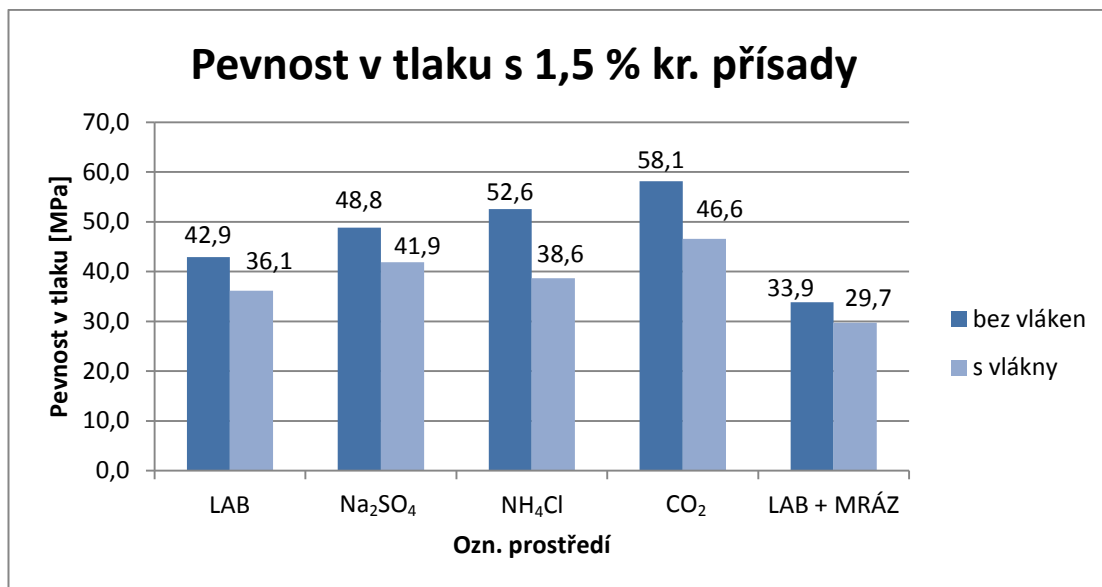
| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| MRÁZ           | 0                | 0                                                   | 2190                     | 1,81                   | 23,2                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2220                     | 3,35                   | 34,0                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2230                     | 3,34                   | 33,9                   |
|                | 0,05             | 0                                                   | 2120                     | 5,06                   | 30,6                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2130                     | 7,09                   | 32,1                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2110                     | 5,57                   | 29,7                   |



Graf č. 8 Pevnost v tlaku u vzorků bez krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích

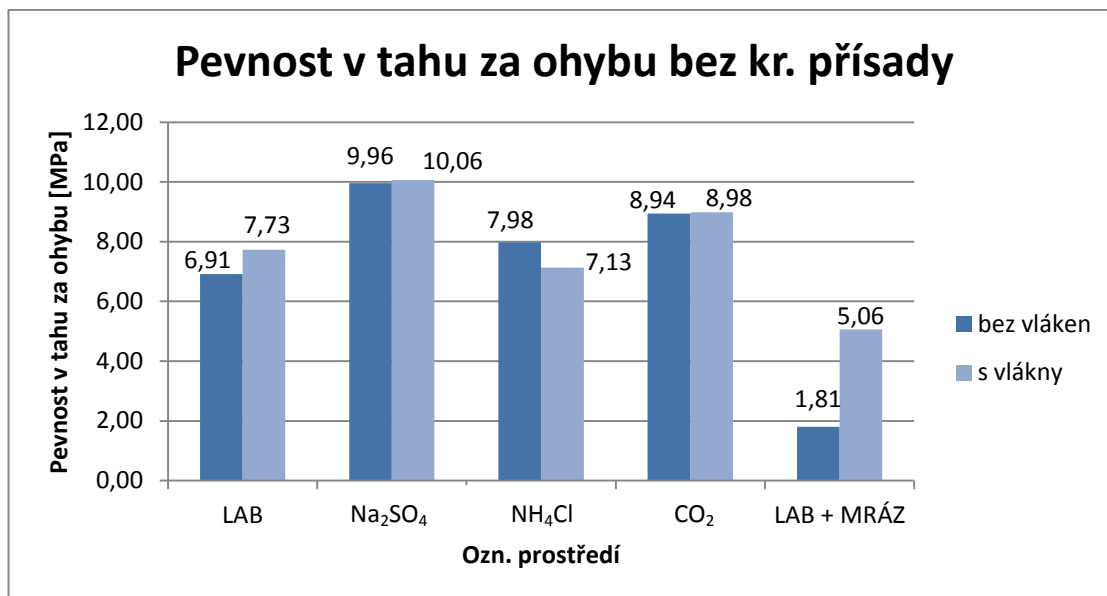


Graf č. 9 Pevnost v tlaku u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích

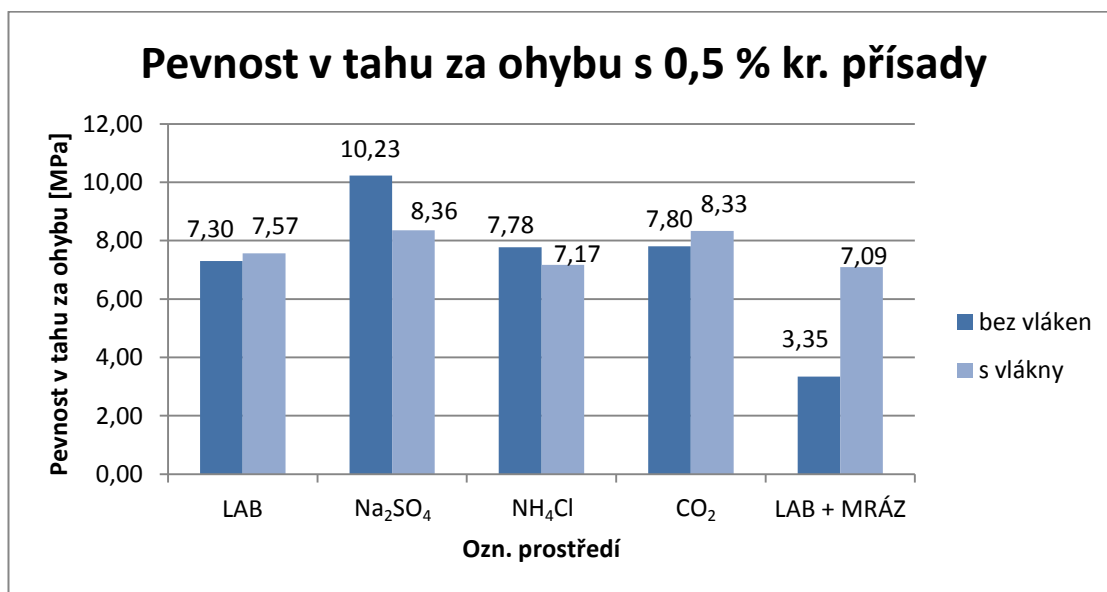


Graf č. 10 Pevnost v tlaku u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích

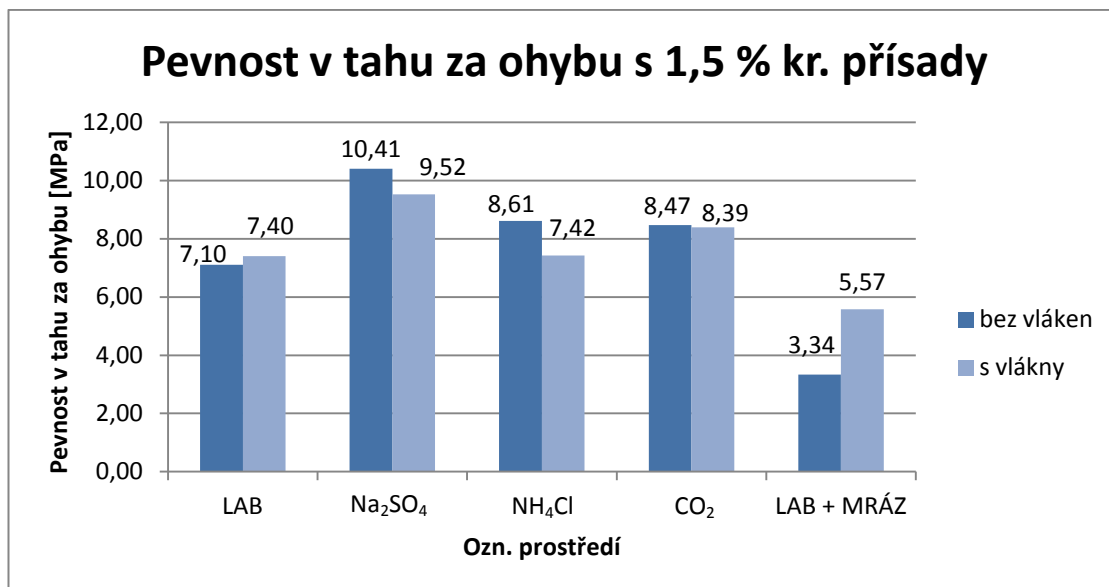
Po 90 denním uložení vzorky ponechané v laboratorním prostředí nevykazovaly výrazné změny v pevnosti v tlaku vlivem zvyšujícího se množství krystalizační přísady. V prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> docházelo u vzorků bez vláken k postupnému snižování pevnosti v tlaku vlivem vyšší dávky krystalizační přísady. V případě použití vláken společně s 1,5 % krystalizační přísady se při porovnání s referenční směsí pevnost mírně zvýšila (o 3 %). Rostoucí množství krystalizační přísady mělo za následek zvyšování pevnosti v tlaku ve vodném prostředí NH<sub>4</sub>Cl, ale pouze u vzorků bez vláken. Společně s vlákny nedocházelo k výrazným změnám v pevnosti. V prostředí plynného CO<sub>2</sub> u vzorků bez vláken můžeme vidět nárůst pevnosti v tlaku (o 10 %). Nejvyšší hodnotu měly vzorky s 0,5% množstvím krystalizační přísady, které dosáhly až 60 MPa. Naopak u vzorků s vlákny docházelo ke snižování pevnosti v tomto prostředí, kde vzorky s 0,5% množstvím přísady měly nejmenší pevnost v tlaku (45 MPa). Po zatížení 25 zmrazovacími cykly se pevnost v tlaku u vzorků bez polypropylenových vláken vlivem vyššího množství krystalizační přísady zvyšuje až o 47 %. U vzorků s vlákny k výrazným změnám nedochází.



Graf č. 11 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků bez krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 12 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 13 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 90 dní v jednotlivých prostředích

Pevnost v tahu za ohybu u vzorků v laboratorním prostředí se s množstvím krystalizační přísady viditelně nemění. Mírný nárůst pevností (o 4,5 %) byl zaznamenán u vzorků bez vláken ve vodném prostředí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. U takto exponovaných vzorků společně s vlákny došlo s 0,5 % krystalizační přísady při porovnání se vzorky bez kr. přísady k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o 17 %, při použití 1,5 % krystalizační přísady o 5 %. Ve vodném prostředí NH<sub>4</sub>Cl se s přidavkem 0,5 % krystalizační přísady pevnost v tahu za ohybu výrazně neliší. S použitím 1,5 % došlo k mírnému zvýšení této pevnosti nezávisle na obsahu vláken (o 6 %). Lehký pokles pevnosti v tahu za ohybu byl zaznamenán u vzorků obsahující krystalizační přísadu při porovnání se vzorky bez přísady po vystavení plynnému CO<sub>2</sub>. V případě zatížení 25 zmrazovacími cykly se pevnost v tahu za ohybu zvyšuje díky přítomnosti krystalizační přísady. Ve směsi bez polypropylenových vláken až o 85 %.

Tabulka č. 30 Vyhodnocení mrazuvzdornosti u vzorků uložených 28 + 90 dní v laboratorním prostředí a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

| Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø R <sub>f,mráz</sub> [MPa] | Ø R <sub>f,por</sub> [MPa] | s <sub>m</sub> [-] | vyhovělo |
|------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|----------|
| 0                | 0                                                   | 1,81                        | 6,91                       | 0,26               | ne       |
|                  | 0,5                                                 | 3,35                        | 7,30                       | 0,46               | ne       |
|                  | 1,5                                                 | 3,34                        | 7,10                       | 0,47               | ne       |
| 0,05             | 0                                                   | 5,06                        | 7,73                       | 0,65               | ne       |
|                  | 0,5                                                 | 7,09                        | 7,57                       | 0,94               | ano      |
|                  | 1,5                                                 | 5,57                        | 7,40                       | 0,75               | ano      |

Z tabulky č. 30 vyplývá, že mrazuvzdorné jsou vzorky s 0,5 a 1,5 % krystalizační přísady společně s vlákny. Překvapivé bylo vyhodnocení vzorků bez krystalizační přísady s obsahem vláken, které nevyhověly.

### 5.3 Vyhodnocení zkušebních vzorků uložených 180 dní v jednotlivých prostředích

Vyhodnocení objemových hmotností, pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu zkušebních vzorků po uložení 180 dní v jednotlivých prostředích je uvedeno v tabulkách č. 31 – 35. Dále jsou pro přehlednější znázornění pevnosti převedeny do grafů č. 14 – 19.

Tabulka č. 31 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 180 dní v laboratorním prostředí

| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| LAB            | 0                | 0                                                   | 2120                     | 7,50                   | 38,9                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2130                     | 8,46                   | 37,3                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2130                     | 9,45                   | 44,6                   |
|                | 0,05             | 0                                                   | 2030                     | 8,21                   | 37,2                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2020                     | 8,64                   | 35,8                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2000                     | 7,03                   | 31,6                   |

Tabulka č. 32 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 180 dní ve vodném prostředí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

| Ozn. prostředí                  | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0                | 0                                                   | 2200                     | 9,17                   | 51,9                   |
|                                 |                  | 0,5                                                 | 2180                     | 9,54                   | 47,6                   |
|                                 |                  | 1,5                                                 | 2180                     | 10,58                  | 51,3                   |
|                                 | 0,05             | 0                                                   | 2110                     | 9,98                   | 40,8                   |
|                                 |                  | 0,5                                                 | 2050                     | 7,16                   | 23,6                   |
|                                 |                  | 1,5                                                 | 2100                     | 9,45                   | 37,9                   |

Tabulka č. 33 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 180 dní ve vodném prostředí NH<sub>4</sub>Cl

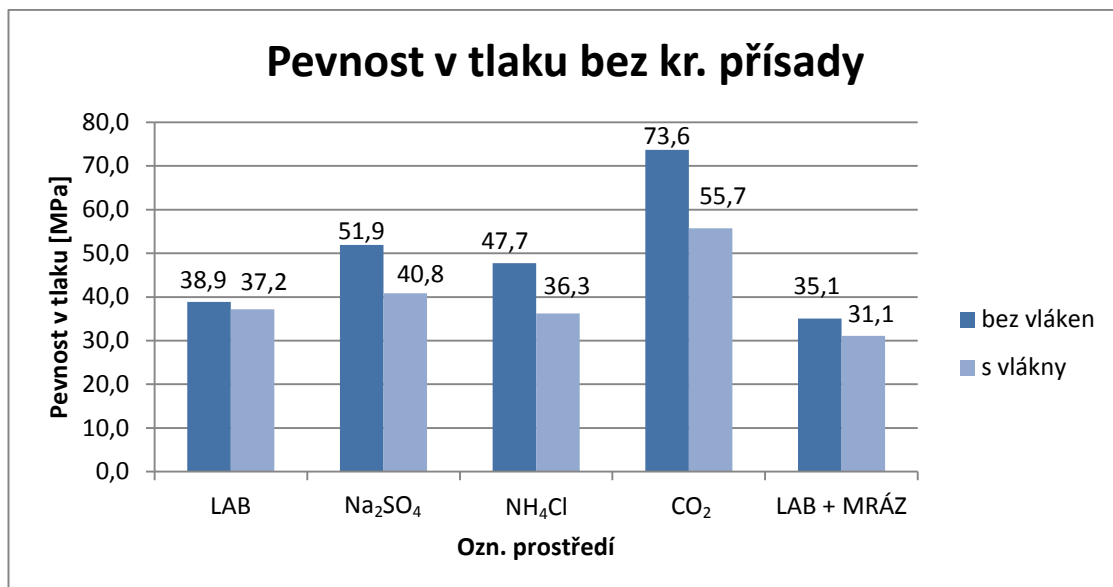
| Ozn. prostředí     | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|--------------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| NH <sub>4</sub> Cl | 0                | 0                                                   | 2210                     | 8,08                   | 47,7                   |
|                    |                  | 0,5                                                 | 2220                     | 8,51                   | 49,4                   |
|                    |                  | 1,5                                                 | 2180                     | 7,89                   | 46,3                   |
|                    | 0,05             | 0                                                   | 2150                     | 8,41                   | 36,3                   |
|                    |                  | 0,5                                                 | 2160                     | 7,99                   | 37,7                   |
|                    |                  | 1,5                                                 | 2090                     | 7,43                   | 34,6                   |

Tabulka č. 34 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 180 v plynném prostředí CO<sub>2</sub>

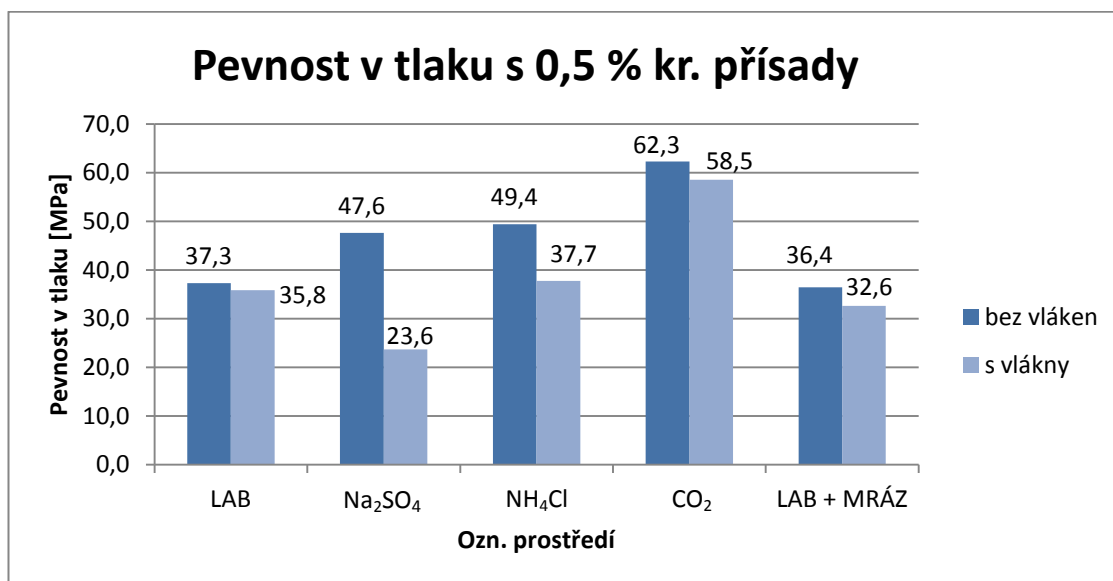
| Ozn. prostředí  | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|-----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| CO <sub>2</sub> | 0                | 0                                                   | 2200                     | 9,62                   | 73,6                   |
|                 |                  | 0,5                                                 | 2170                     | 8,17                   | 62,3                   |
|                 |                  | 1,5                                                 | 2160                     | 8,35                   | 59,6                   |
|                 | 0,05             | 0                                                   | 2080                     | 10,17                  | 55,7                   |
|                 |                  | 0,5                                                 | 2130                     | 9,20                   | 58,5                   |
|                 |                  | 1,5                                                 | 2060                     | 8,23                   | 48,0                   |

Tabulka č. 35 Výsledné hodnoty vzorků uložených 28 + 180 dní v laboratorním prostředí a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

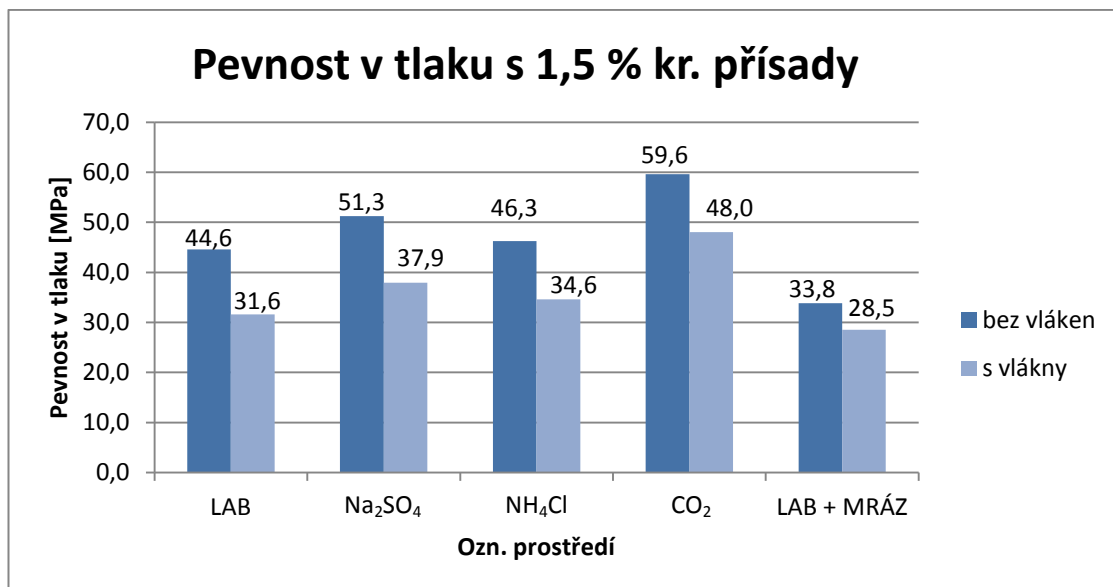
| Ozn. prostředí | Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| MRÁZ           | 0                | 0                                                   | 2220                     | 3,53                   | 35,1                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2210                     | 3,73                   | 36,4                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2200                     | 3,14                   | 33,8                   |
|                | 0,05             | 0                                                   | 2110                     | 6,25                   | 31,1                   |
|                |                  | 0,5                                                 | 2120                     | 6,52                   | 32,6                   |
|                |                  | 1,5                                                 | 2110                     | 6,22                   | 28,5                   |



Graf č. 14 Pevnost v tlaku u vzorků bez krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích

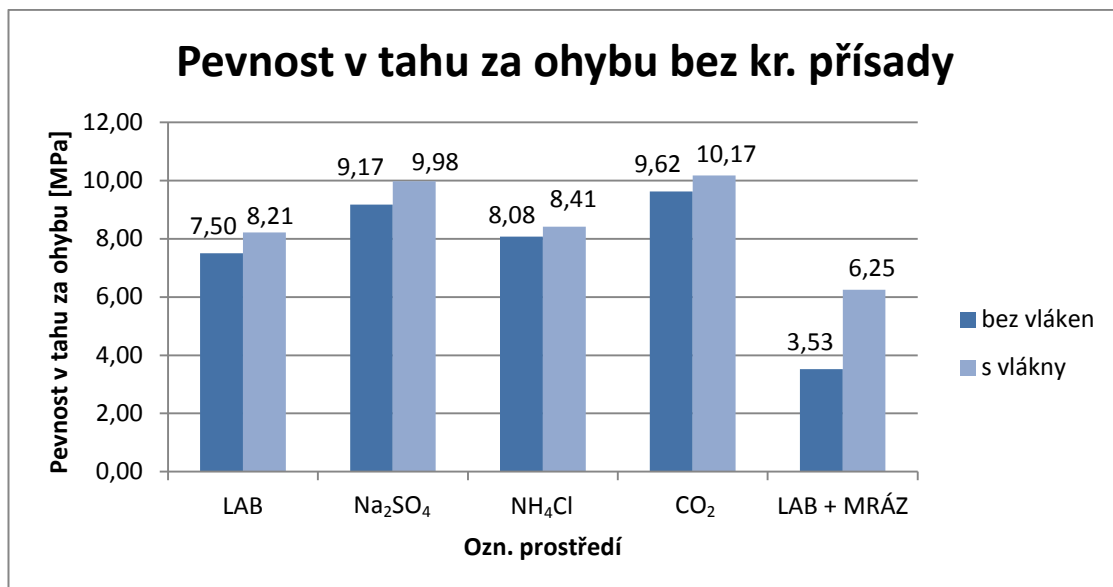


Graf č. 15 Pevnost v tlaku u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích

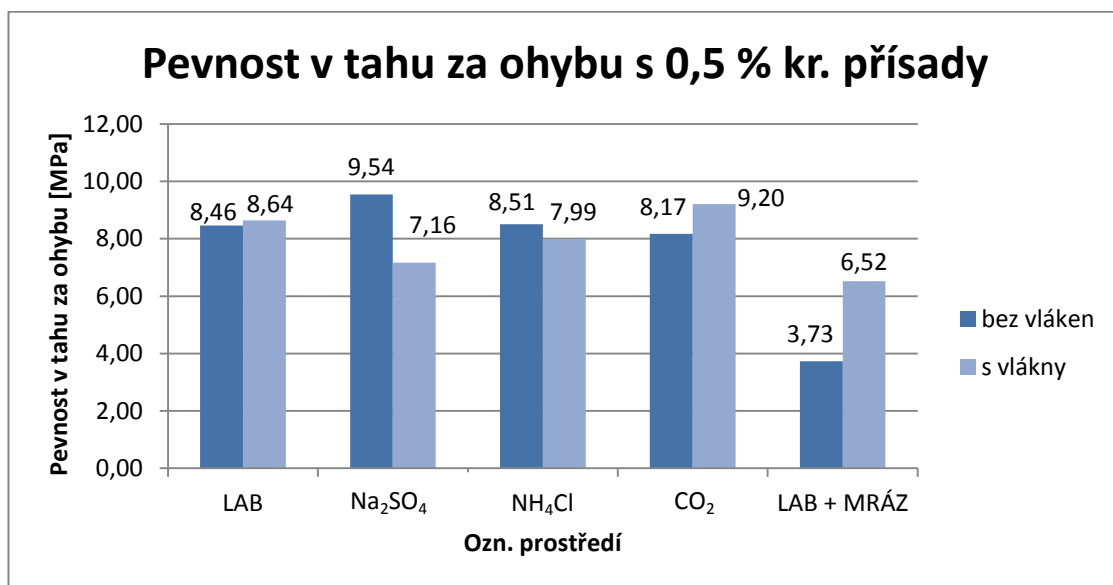


Graf č. 16 Pevnost v tlaku u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích

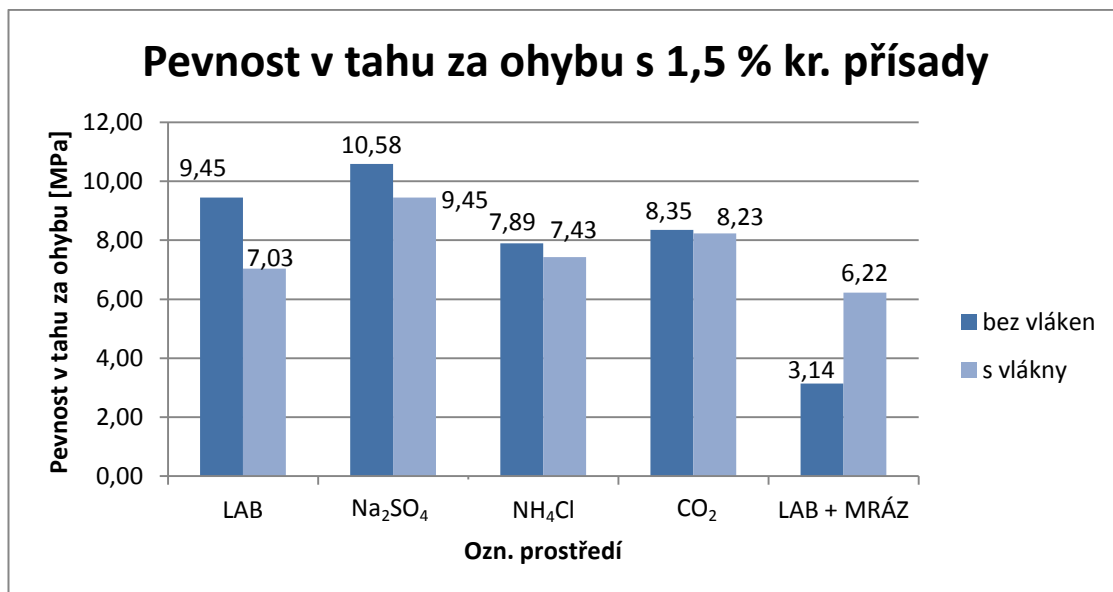
Po 180 denním uložení došlo u vzorků uložených v laboratorním prostředí společně s přidavkem krystalizační přísady ke snížení pevností v tlaku (o 10 %). Pouze u použití 1,5 % přísady ve směsi bez vláken se pevnost v tlaku, při porovnání se směsí bez krystalizační přísady, zvýšila (o 11,5 %). V kapalném prostředí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dosáhly největších pevností v tlaku vzorky bez krystalizační přísady. S použitím 0,5 % této přísady nastal výrazný pokles (téměř o 60 %) u směsi obsahující vlákna. S použitím 1,5 % krystalizační přísady se pevnosti velice podobaly směsi, která kr. přísadu neobsahovala. V prostředí kapalného NH<sub>4</sub>Cl došlo s použitím 0,5 % krystalizační přísady k lehkému nárůstu pevnosti v tlaku (o 4 %). Postupné snižování pevnosti v závislosti na rostoucím množství krystalizační přísady můžeme pozorovat i u vystavení zkušebních vzorků plynnému prostředí CO<sub>2</sub>. Výjimkou je směs obsahující 0,5 % krystalizační přísady společně s vlákny, u které došlo k mírnému zvýšení pevnosti v tlaku (o 5 %). Po 25 zmrazovacích cyklech došlo u směsi s 0,5 % kr. přísady k lehkému nárůstu pevností v tlaku, ale společně s 1,5 % se tyto pevnosti lehce snížily, při porovnání s referenční směsí.



Graf č. 17 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků bez krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 18 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 0,5 % krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích



Graf č. 19 Pevnost v tahu za ohybu u vzorků s 1,5 % krystalizační přísady uložených 180 dní v jednotlivých prostředích

Pevnost v tahu za ohybu se v laboratorním prostředí v závislosti na zvyšujícím se množství krystalizační přísady zvyšovala, pouze u použití 1,5 % krystalizační přísady ve směsi společně s vlákny došlo k poklesu této pevnosti (o 17 %). V prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se u směsí bez vláken pevnost v tahu za ohybu zvyšuje s rostoucím množstvím krystalizační přísady. U směsí, která vlákna obsahovala, došlo naopak ke snížení pevnosti v tahu za ohybu. Pokles byl větší v případě použití 0,5 % krystalizační přísady (o 30 %). Klesající pevnost jsme rovněž zaznamenali u vodného prostředí NH<sub>4</sub>Cl, výjimkou byla směs s 0,5 % krystalizační přísady, která neobsahovala vlákna, u které se pevnost v tahu za ohybu lehce zvýšila (o 5 %) díky přítomnosti této přísady. Nižší pevnosti v závislosti na množství krystalizační přísady byly zjištěny i u plynného prostředí CO<sub>2</sub>. Směs s vlákny měla menší pevnost v tahu za ohybu společně s 1,5 % přísady, směs bez vláken v kombinaci s 0,5 %. Po zatížení 25 zmrazovacími cykly se pevnost v tahu za ohybu při použití 0,5 % krystalizační přísady v porovnání se vzorky bez této přísady lehce zvýšila (o 5 %), při použití 1,5 % ve směsi bez vláken snížila (o 10 %).

Tab. č. 36 Vyhodnocení mrazuvzdornosti pro vzorky uložené 180 dní v laboratorním prostředí  
a poté zatíženy 25 zmrazovacími cykly

| Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø R <sub>f,mraz</sub> [MPa] | Ø R <sub>f,por</sub> [MPa] | s <sub>m</sub> [-] | vyhovělo |
|------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|----------|
| 0                | 0                                                   | 3,53                        | 7,50                       | 0,47               | ne       |
|                  | 0,5                                                 | 3,73                        | 8,46                       | 0,44               | ne       |
|                  | 1,5                                                 | 3,14                        | 9,45                       | 0,33               | ne       |
| 0,05             | 0                                                   | 6,25                        | 8,21                       | 0,76               | ano      |
|                  | 0,5                                                 | 6,52                        | 8,64                       | 0,75               | ano      |
|                  | 1,5                                                 | 6,22                        | 7,03                       | 0,88               | ano      |

Na základě výsledků uvedených v tabulce č. 36 můžeme konstatovat, že mrazuvzdorné jsou pouze ty vzorky, které obsahovaly vlákna.

Z důvodu nízkých pevností vzorků uložených v laboratorním prostředí (pevnost v tlaku u vzorků bez vláken průměrně 40 MPa celkového stáří 28 + 180 dní) byly zhotoveny nové vzorky a ihned po odformování (po 24 hodinách) se uložily do vody, kde byly ponechány do celkového stáří 28 dní. Tímto se sledovalo, jestli námi zvolené uložení 48 hodin ve vlhku u ostatních vzorků bylo nedostačující. V tabulce č. 37 můžeme vidět, že při uložení ve vodě bylo dosaženo (při porovnání se vzorky uloženými ve stáří 28 dní na dalších 180 dní v laboratoři) vyšších pevností v tlaku (o 23 %) i v tahu za ohybu (o 12 %). Nutno říct, že u vzorků s vlákny se pevnost v tahu za ohybu výrazně neměnila.

Tab. č. 37 Výsledné hodnoty pro vzorky uložené 28 dní ve vodě

| Obsah vláken [%] | Obsah krystalizační přísady (z m <sub>c</sub> ) [%] | Ø D [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 0                | 0                                                   | 2230                     | 9,41                   | 48,3                   |
|                  | 0,5                                                 | 2260                     | 9,79                   | 49,9                   |
|                  | 1,5                                                 | 2270                     | 9,55                   | 48,3                   |
| 0,05             | 0                                                   | 2110                     | 7,29                   | 31,3                   |
|                  | 0,5                                                 | 2160                     | 8,46                   | 37,0                   |
|                  | 1,5                                                 | 2140                     | 8,08                   | 36,8                   |

## 6 3. ETAPA

Ve třetí etapě proběhlo studium mikrostruktury vybraných vzorků. Ty byly vybrány na základě výsledků z druhé etapy.

Ze vzorků exponovaných 90 dní v agresivních prostředích bylo vybráno celkem 12, u kterých se provedla podrobnější analýza. Jednalo se o vzorky bez a s 1,5% množstvím krystalizační přísady, bez i s vlákny uložené ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a v prostředí plynného  $\text{CO}_2$

Ze vzorků po 180 denním uložení v agresivních prostředích se vybraly 4 vzorky uložené v plynném prostředí  $\text{CO}_2$ . Byly to směsi bez a s 1,5 % krystalizační přísady, bez a s obsahem vláken.

### 6.1 Vyhodnocení diferenční termické analýzy

Vyhodnocené záznamy diferenční termické analýzy jednotlivých vzorků jsou zobrazeny na grafech č. 20 – 35, které se nacházejí v příloze č. 1. Následně jsou v tabulkách č. 38 a 39 vyhodnocené hodnoty z těchto záznamů.

V DTA záznamech se vyskytuje několik teplotních efektů, které popisují chování daného vzorku při postupném zahřívání. Do teploty kolem 150 °C je vyhodnocení poměrně komplikované. Při těchto teplotách dochází k několika jevům, které probíhají současně. Dochází k uvolňování fyzikálně vázané (absorbované) vody, začínají se rozkládat kalciumhydrosilikátové gely a rovněž se projevuje dehydratace ettringitu. Polypropylenová vlákna se začínají tavit při teplotě cca 160 °C. Významný endotermní efekt se nachází v rozmezí teplot 450 až 500 °C. Zde se jedná o rozklad (dehydrataci) portlanditu. Dále můžeme ve všech vzorcích pozorovat reakci křemene při teplotě 573 °C. Následně při teplotě od cca 650 °C dochází k rozkladu různých fází uhličitánů vápenatých. Prvně se rozkládají tzv. jemnozrnné modifikace (aragonit, vaterit) a následně cca od 725 do 825 °C hrubozrnné formy uhličitánů vápenatých (kalcit).

Tab. č. 38 Vyhodnocení DTA analýz pro vzorky uložené 90 dní v jednotlivých prostředích

| Ozn.<br>Prostředí               | Obsah<br>vláken | Obsah<br>krystalizační<br>přísky [%] | Ztráta<br>žháním<br>[%] | Obsah<br>portlanditu<br>[%] | Obsah<br>uhličitanu<br>vápenatého<br>[%] |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | ne              | 0                                    | 8,54                    | 3,54                        | 3,82                                     |
|                                 | ano             | 0                                    | 8,78                    | 4,48                        | 3,27                                     |
|                                 | ne              | 1,5                                  | 8,36                    | 4,19                        | 3,50                                     |
|                                 | ano             | 1,5                                  | 8,10                    | 2,92                        | 3,93                                     |
| NH <sub>4</sub> Cl              | ne              | 0                                    | 8,50                    | 3,54                        | 3,80                                     |
|                                 | ano             | 0                                    | 9,00                    | 4,07                        | 3,80                                     |
|                                 | ne              | 1,5                                  | 8,48                    | 3,82                        | 3,39                                     |
|                                 | ano             | 1,5                                  | 9,31                    | 3,04                        | 4,52                                     |
| CO <sub>2</sub>                 | ne              | 0                                    | 9,60                    | 1,93                        | 7,89                                     |
|                                 | ano             | 0                                    | 9,36                    | 1,69                        | 8,00                                     |
|                                 | ne              | 1,5                                  | 10,48                   | 1,07                        | 9,75                                     |
|                                 | ano             | 1,5                                  | 8,90                    | 1,11                        | 7,64                                     |

Tab. č. 39 Vyhodnocení DTA analýz pro vzorky uložené 180 dní v prostředí plynného CO<sub>2</sub>

| Ozn.<br>Prostředí | Obsah<br>vláken | Obsah<br>krystalizační<br>přísky [%] | Ztráta<br>žháním<br>[%] | Obsah<br>portlanditu<br>[%] | Obsah<br>uhličitanu<br>vápenatého<br>[%] |
|-------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>   | ne              | 0                                    | 12,84                   | 0,49                        | 11,68                                    |
|                   | ano             | 0                                    | 12,91                   | 0,53                        | 12,45                                    |
|                   | ne              | 1,5                                  | 13,01                   | 1,89                        | 10,89                                    |
|                   | ano             | 1,5                                  | 13,15                   | 1,15                        | 12,27                                    |

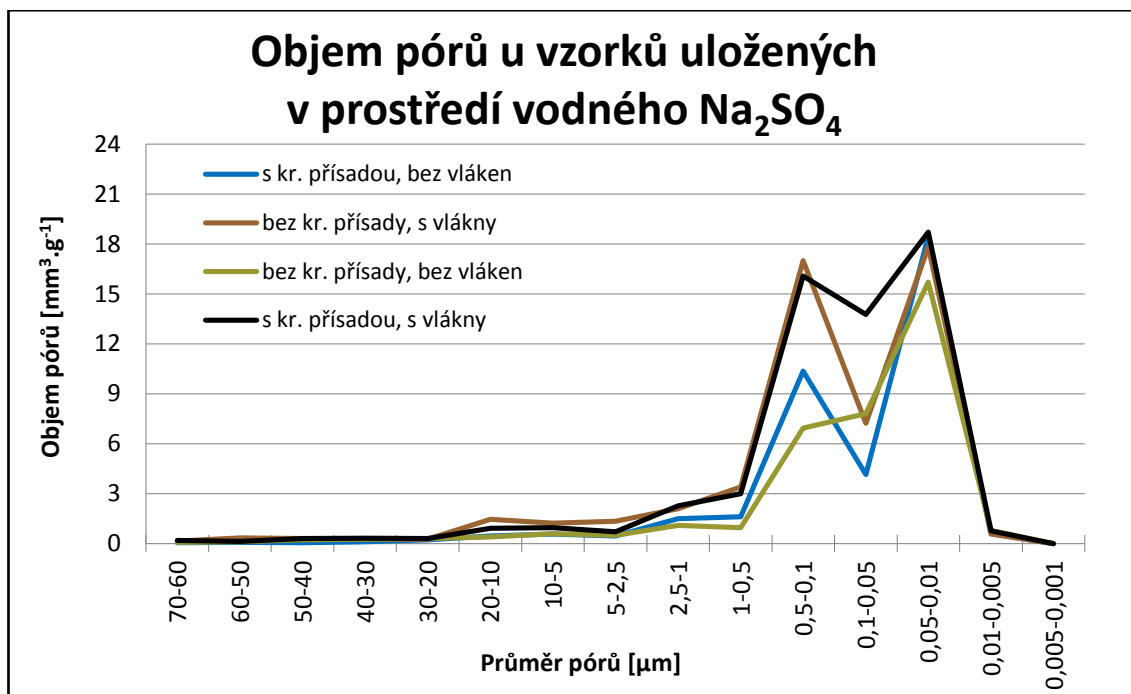
## 6.2 Vyhodnocení rentgenové difrakční analýzy

V grafech č. 36 – 51, které se nacházejí v příloze č. 1, jsou zobrazeny difraktogramy jednotlivých vzorků. Ty byly zhotoveny k zjištění mineralogického složení směsí.

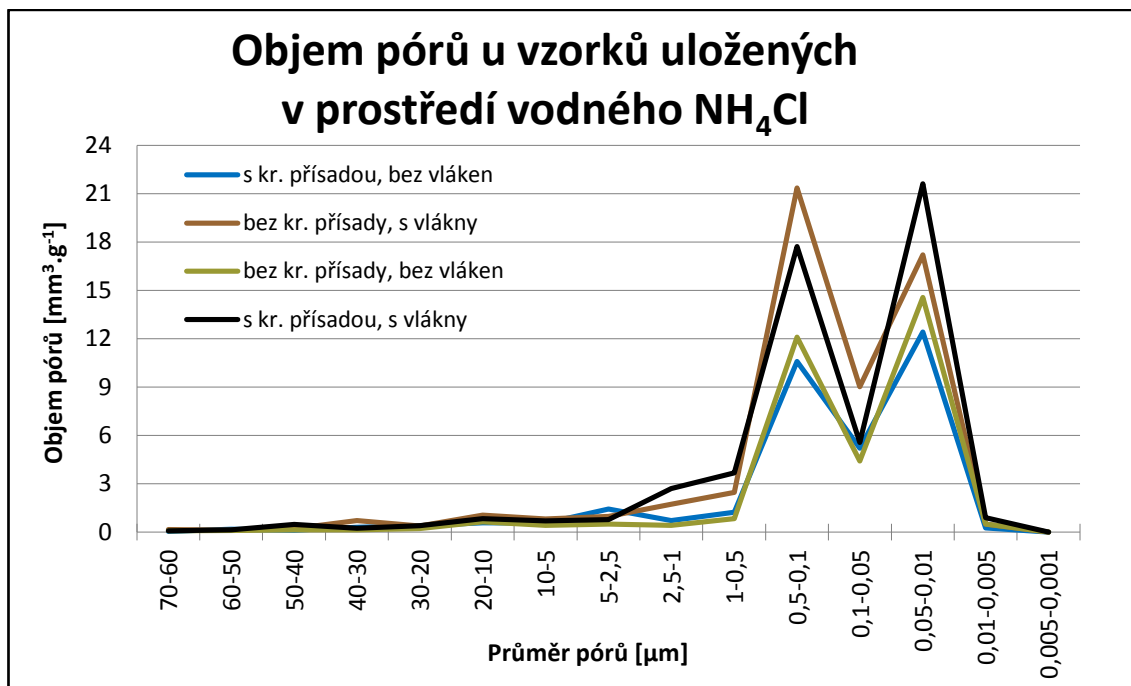
Na základě vyhodnocení jednotlivých difraktogramů lze říct, že se mineralogicky jednotlivé záznamy příliš neliší. Shodné mineralogické složení bylo zjištěno u většiny hmot, kde byla identifikována přítomnost  $\beta$  křemene, kalcitu, portlanditu a ettringitu. U vzorků uložených 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  bez krystalizační přísady se na RTG záznamu zobrazil portlandit velice nevýrazně. Z tohoto důvodu není v difraktogramech znázorněn.

## 6.3 Vyhodnocení vysokotlaké rtuťové porozimetrie

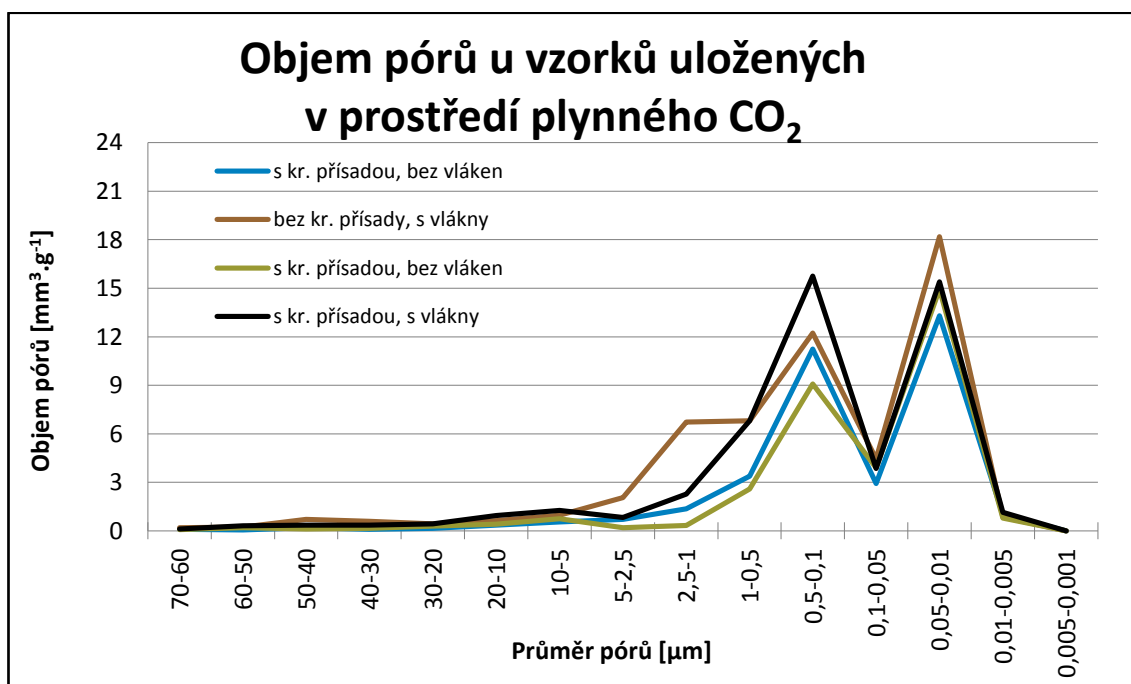
Výsledné hodnoty ze stanovení vysokotlaké rtuťové porozimetrie jsou zobrazeny na grafech č. 52 – 57 a v tabulce č. 40.



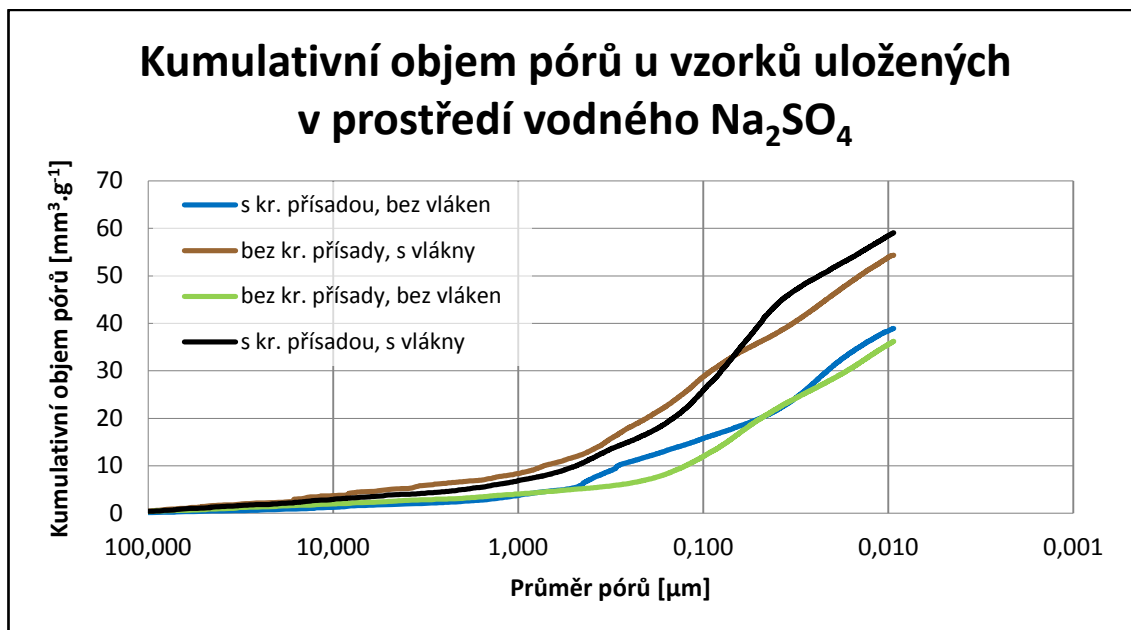
Graf č. 52 Objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí vodného  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



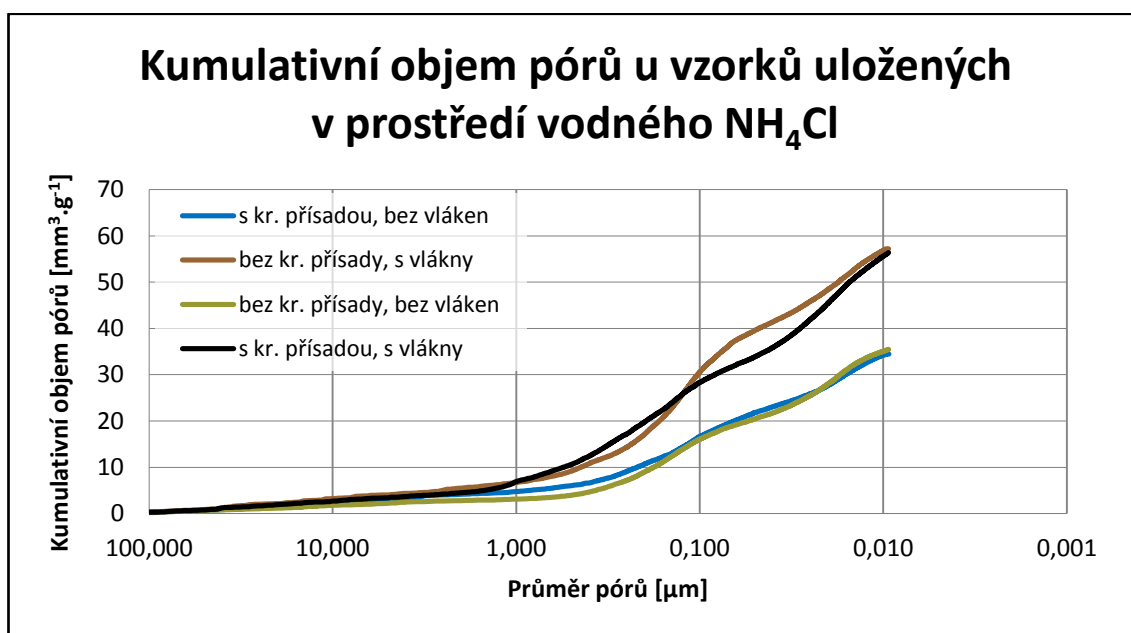
Graf č. 53 Objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$



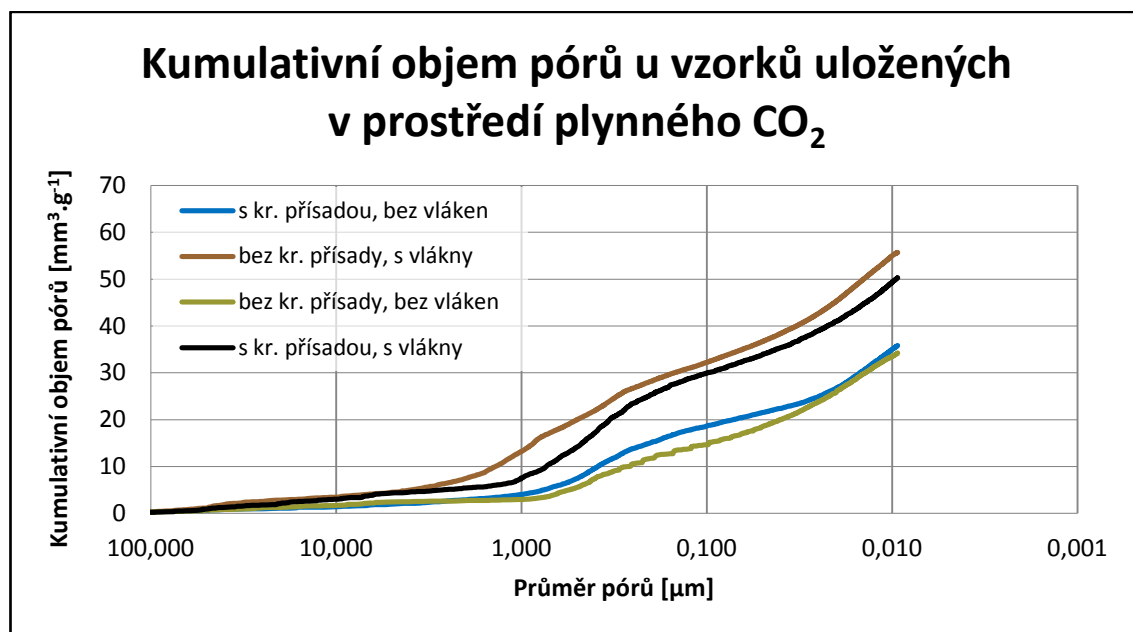
Graf č. 54 Objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí plynného  $\text{CO}_2$



Graf č. 55 Kumulativní objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí vodného  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



Graf č. 56 Kumulativní objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$



Graf č. 57 Kumulativní objem pórů u vzorků uložených 90 dní v prostředí plynného CO<sub>2</sub>

U všech vzorků můžeme pozorovat nezávisle na prostředí, ve kterých byly uloženy, opakující se tendenci v rozložení velikosti pórů. U vzorků bez vláken dojde při velikosti pórů 0,5 – 0,1 μm k navýšení objemu pórů průměrně o 8 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>, následně dojde k poklesu objemu pórů asi o 5 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup> u průměru 0,1 – 0,05 μm. Poté se při velikosti 0,05 – 0,01 μm objem znovu zvýší cca o 10 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup> a následně u velikosti 0,01 – 0,005 μm klesne téměř na nulovou hodnotu. U vzorků s vlákny je tento trend velice podobný, ale jednotlivé nárůsty a poklesy objemů pórů jsou vyšší přibližně o 10 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>. Výjimkou byl vzorek z prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bez vláken, u kterého nebyl zaznamenán pokles objemu pórů při velikosti 0,1 – 0,05 μm. U vzorku s krystalizační přísadou a vlákny v tomtéž prostředí byl pokles objemu póru při velikosti póru 0,1 – 0,05 μm výrazně nižší než u ostatních.

Při zkoumání kumulativních objemů pórů je na první pohled viditelný vyšší celkový objem pórů u směsí, které obsahovaly vlákna. Vzorky s vlákny dosahovaly celkového objemu pórů, nezávisle na prostředí, přibližně 56 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup> a vzorky bez vláken asi 36 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>. U vzorků s vlákny uložených v plynném prostředí CO<sub>2</sub> je vlivem krystalizační přísady kumulativní objem pórů nižší přibližně o 5 mm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>. Vzorek s vlákny a krystalizační přísadou z prostředí vodného NH<sub>4</sub>Cl vykazoval nižší kumulativní objem pórů od velikosti přibližně 0,2 μm oproti vzorku bez kr. přísady. V prostředí vodného Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> měl naopak vzorek s vlákny a krystalizační přísadou od

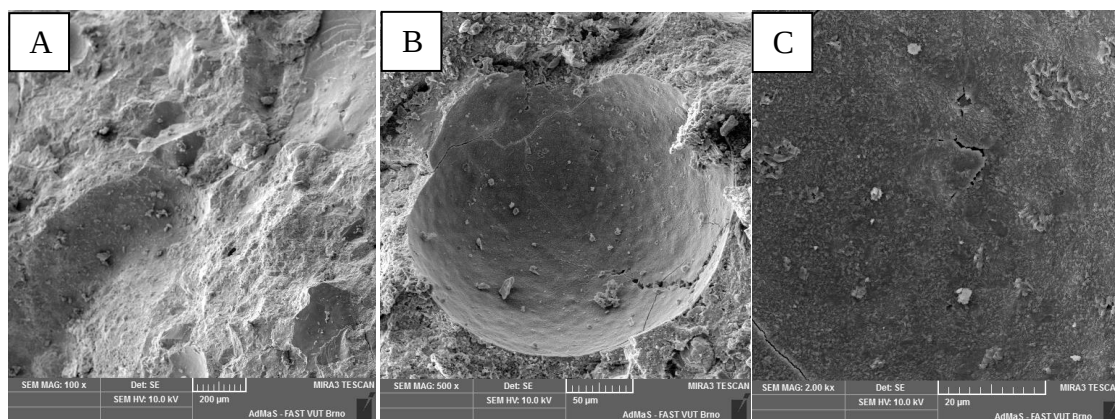
průměru pórů asi 0,08  $\mu\text{m}$  vyšší kumulativní objem než vzorek bez krystalizační přísady.

Tab. č. 40 Výsledné hodnoty vysokotlaké rtuťové porozimetrie

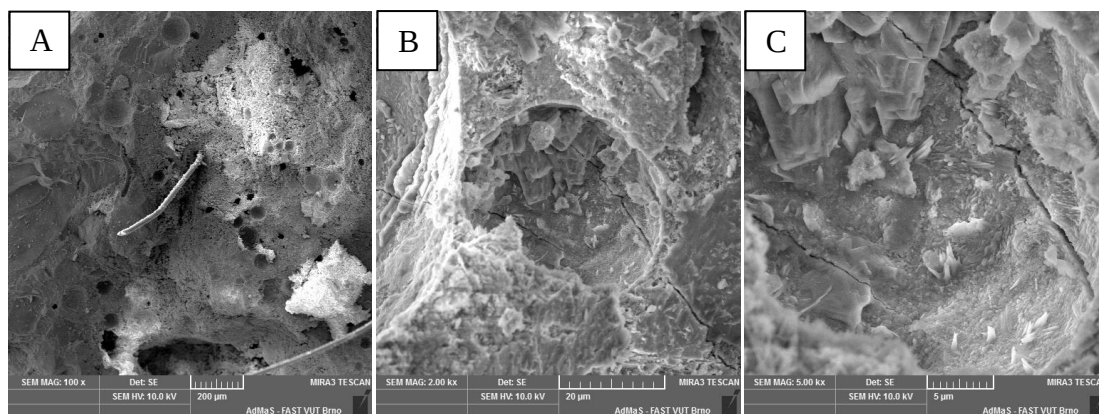
| Ozn. prostředí           | Obsah vláken | Obsah krystalizační přísady [%] | Celkový objem pórů [ $\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ] | Celková plocha pórů [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ] | Celková pórovitost [%] |
|--------------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------|
| $\text{Na}_2\text{SO}_4$ | ne           | 0                               | 36,23                                                    | 4,14                                                     | 9,66                   |
|                          | ano          | 0                               | 54,36                                                    | 4,61                                                     | 11,92                  |
|                          | ne           | 1,5                             | 38,9                                                     | 4,27                                                     | 8,86                   |
|                          | ano          | 1,5                             | 59,11                                                    | 4,92                                                     | 12,55                  |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$   | ne           | 0                               | 35,49                                                    | 3,7                                                      | 9,3                    |
|                          | ano          | 0                               | 57,22                                                    | 4,78                                                     | 12,36                  |
|                          | ne           | 1,5                             | 34,46                                                    | 3,3                                                      | 7,64                   |
|                          | ano          | 1,5                             | 56,38                                                    | 5,5                                                      | 11,98                  |
| $\text{CO}_2$            | ne           | 0                               | 34,23                                                    | 3,87                                                     | 8,59                   |
|                          | ano          | 0                               | 55,71                                                    | 4,82                                                     | 12,35                  |
|                          | ne           | 1,5                             | 35,86                                                    | 3,90                                                     | 8,08                   |
|                          | ano          | 1,5                             | 50,32                                                    | 4,39                                                     | 11,04                  |

## 6.4 Vyhodnocení rastrovací elektronové mikroskopie

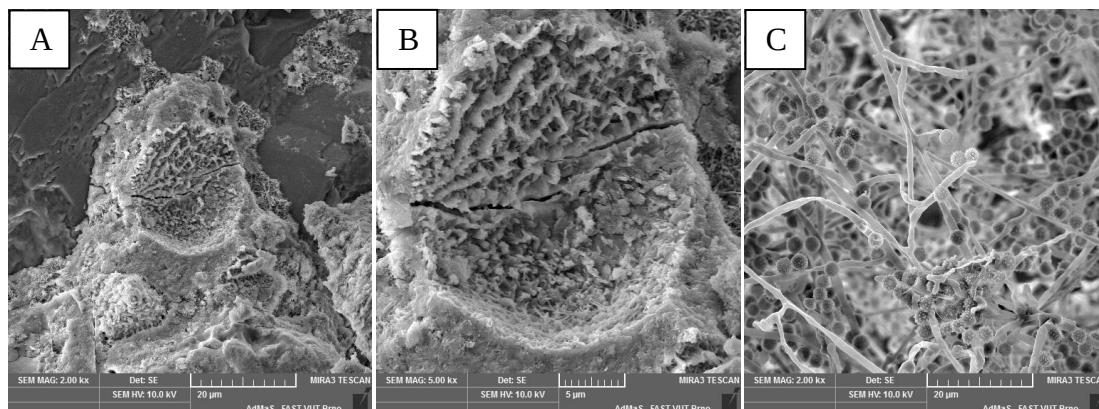
Na obrázcích č. 8 – 19 jsou znázorněny snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu jednotlivých směsí.



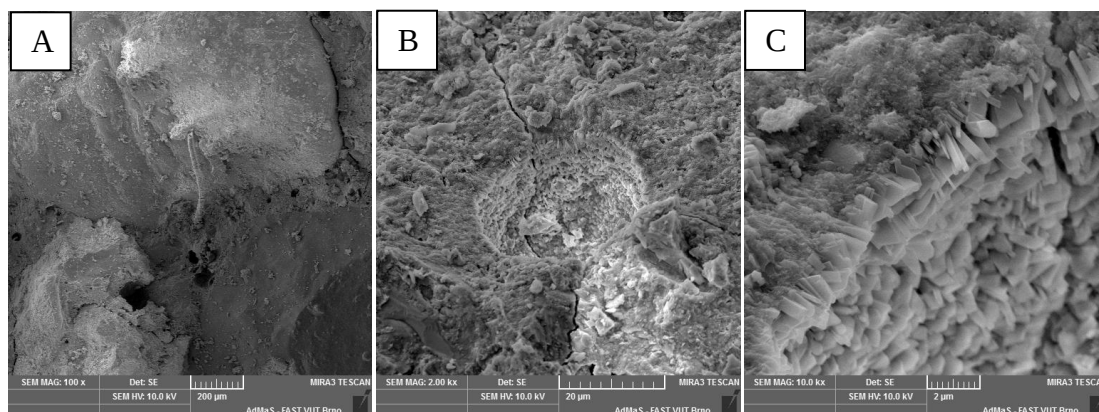
Obrázek č. 8 Snímek hmoty po uložení 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  bez krystalizační přísady a bez vláken. (A) pohled na strukturu vzorku při zvětšení 100x, (B) detail póru při zvětšení 500x, (C) povrch v oblasti póru při zvětšení 2000x.



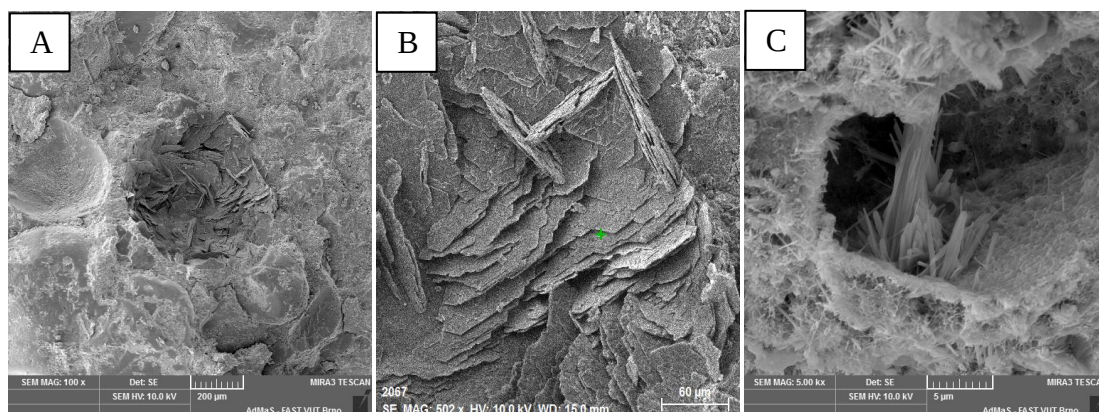
Obrázek č. 9 Snímek hmoty po uložení 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  bez krystalizační přísady s vlákny. (A) detail vlákna zakotveného v cementové matici při zvětšení 100x, (B) pohled na hmotu s viditelným  $\text{CaCO}_3$  (produkt karbonatace) při zvětšení 2000x, (C)  $\text{CaCO}_3$  při zvětšení 5000x.



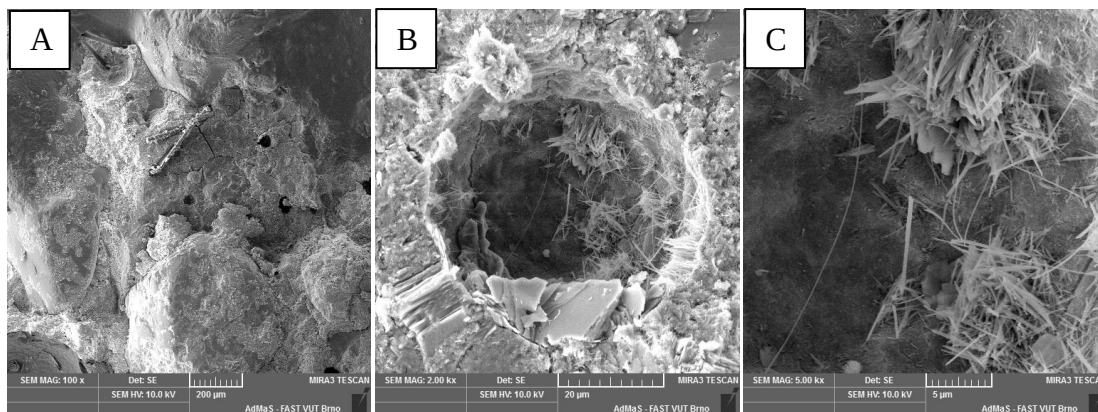
Obrázek č. 10 Snímek hmoty po uložení 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  s krystalizační přísadou, bez vláken. (A) pohled na pór vyplněný vrstvou krystalizační přísady při zvětšení 2000x, (B) detail póru při zvětšení 5000x, (C) zárodky plísně vzniklé při přepravě vzorků při zvětšení 2000x.



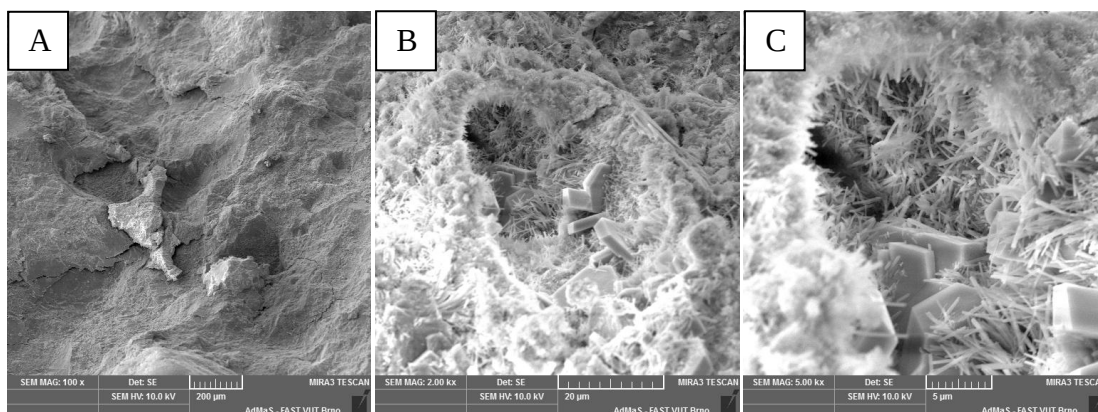
Obrázek č. 11 Snímek hmoty po uložení 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  s krystalizační přísadou a s vlákny. (A) kamenivo a cementová matrice s viditelným vláknem při zvětšení 100x, (B) pohled na pór ve struktuře materiálu při zvětšení 2000x, (C) detail stěny póru pokryté krystalizačními novotvory při zvětšení 10000x.



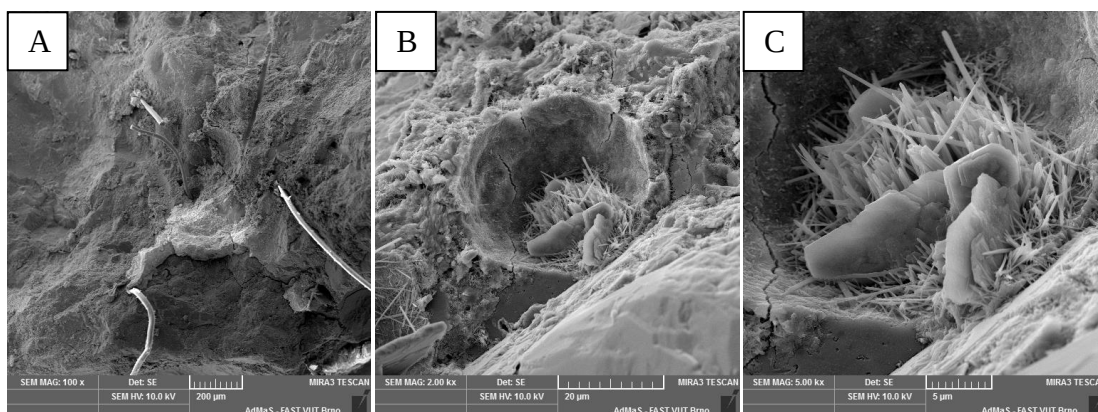
Obrázek č. 12 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$  bez krystalizační přísady a bez vláken. (A) pohled na povrch vzorku při zvětšení 100x, (B) detailnější snímek povrchu a zaostření na vrstvy krystalů  $\text{CaCO}_3$  při zvětšení 500x (C), pohled do prostoru póru a přiblížení krystalu ettringitu při zvětšení 5000x.



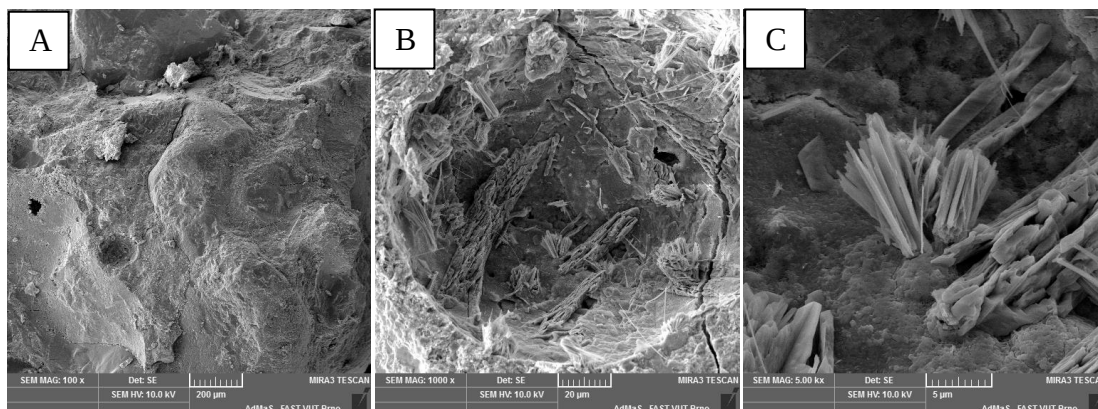
Obrázek č. 13 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$  bez krystalizační přísady s vlákny. (A) pohled na povrch vzorku se zaměřením na ukotvené vlákno při zvětšení 100x, (B) zobrazení póru v matrici při zvětšení 2000x, (C) detail povrchu póru s krystaly ettringitu při zvětšení 5000x.



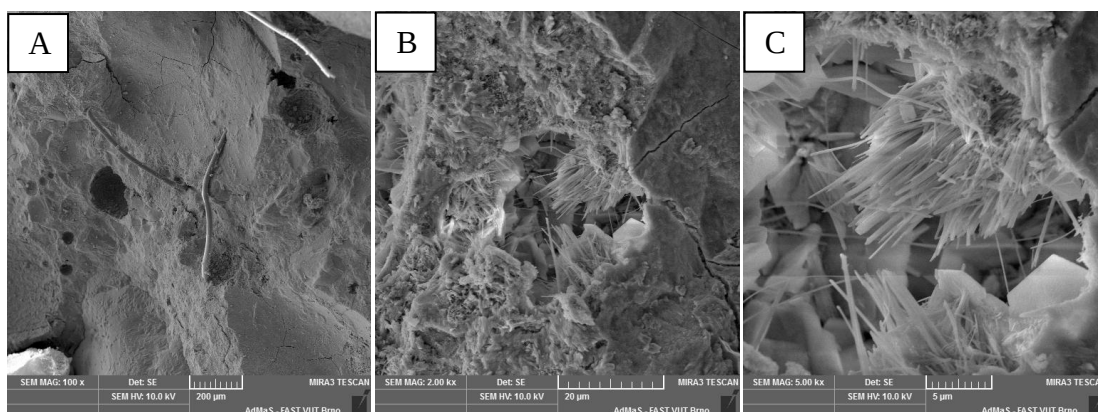
Obrázek č. 14 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$  s krystalizační přísadou, bez vláken. (A) zobrazení povrchu struktury vzorku při zvětšení 100x, (B) krystaly portlanditu obklopené jehlicovitými krystaly ettringitu při zvětšení 2000x, (C) krystaly portlanditu společně s krystaly ettringitu a jemnými novotvory vzniklými z krystalizační přísady při zvětšení 5000x.



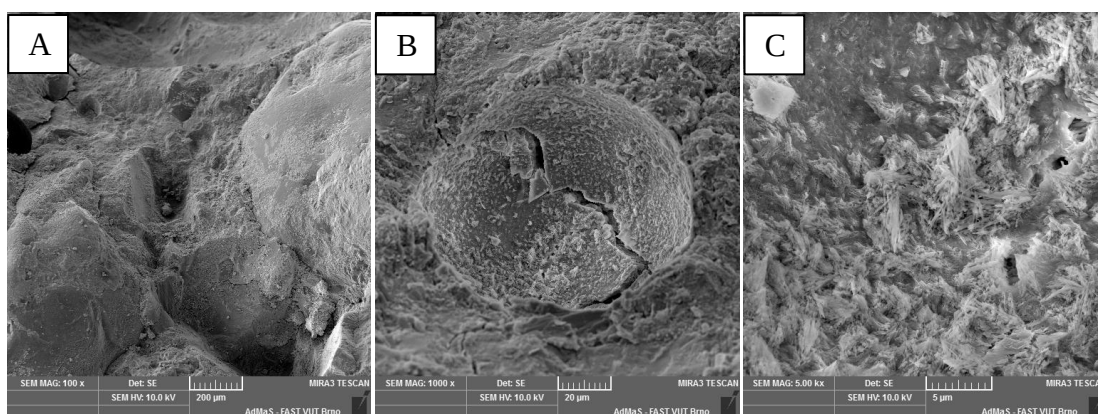
Obrázek č. 15 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$  s krystalizační přísadou a s vlákny. (A) pohled na vystupující vlákna z hmoty při zvětšení 100x, (B) zobrazení póru s krystaly  $\text{CaCO}_3$  a ettringitu při zvětšení 2000x, (C) detail krystalů  $\text{CaCO}_3$  a ettringitu v póru při zvětšení 5000x



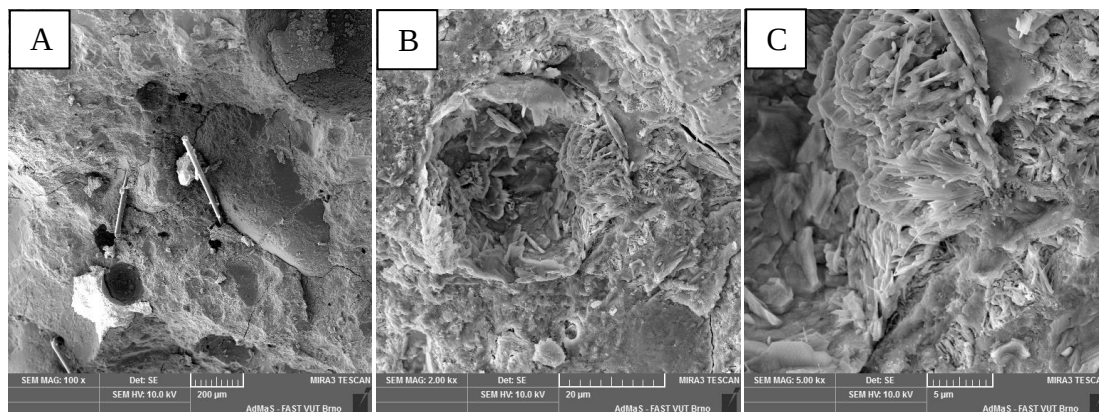
Obrázek č. 16 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  bez krystalizační přísady a bez vláken. (A) pohled na strukturu povrchu vzorku při zvětšení 100x, (B) snímek póru s krystaly ettringitu při zvětšení 1000x, (C) detail krystalu ettringitu při zvětšení 5000x.



Obrázek č. 17 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  bez krystalizační přísady s vlákny. (A) zobrazení vláken v matrici vzorku při zvětšení 100x, (B) pohled na dutinu v povrchu vzorku vyplněnou krystaly ettringitu při zvětšení 2000x, (C) detail krystalů ettringitu při zvětšení 5000x.



Obrázek č. 18 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  s krystalizační přísadou, bez vláken. (A) zakomponování zrna písku v cementové matrici při zvětšení 100x, (B) zobrazení póru ve struktuře materiálu při zvětšení 1000x, (C) detail povrchu póru pokrytého jemnými krystaly krystalizační přísady při zvětšení 5000x.



Obrázek č. 19 Snímek hmoty po uložení 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  s krystalizační přísadou a s vlákny. (A) zobrazení vláken v cementové matrici společně se zrnem písku při zvětšení 100x, (B) pohled na pór v matrici při zvětšení 2000x, (C) detail hrany póru s krystaly  $\text{CaCO}_3$  a novotvary vzniklémi z krystalizační přísady při zvětšení 5000x.

## 7 DISKUZE A SHRNUÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Výsledné hodnoty dosažené u provedených zkoušek by měly vést ke zhodnocení zkoumaných receptur z pohledu trvanlivosti v chemicky agresivním prostředí.

V první části této práce bylo navrženo šest receptur maltových směsí, které obsahovaly portlandský cement, křemenný písek a vodu. Lišily se v množství krystalizační přísady typu: Xypex Admix, která byla dávkována jako doporučené minimum a maximum výrobce, tedy 0,5 % a 1,5 % z množství cementu. Dále byla maltová směs obohacena o polypropylenová vlákna Fibrin 315, která mohou snížit riziko vzniku počátečních smršťovacích trhlin. Pro porovnání byly zhotoveny i směsi, které krystalizační přísadu a vlákna neobsahovaly. Zhotovené a odformované vzorky z takto navržených směsí, byly pro vyvrání vloženy na 48 hodin do vlhkého uložení a následně ponechány v laboratorních podmínkách do celkového stáří 28 dní. Následně byly uloženy do prostředí vodného  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , plynného  $\text{CO}_2$  a laboratorního prostředí, kde byly exponovány po dobu 28, 90 a 180 dní.

U takto zhotovených zkušebních těles byly po uplynutí doby expozice v jednotlivých prostředích provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu, mrazuvzdornosti a také určení objemové hmotnosti.

Objemové hmotnosti u vzorků ponechaných v laboratorních podmínkách se pohybovaly okolo  $2100 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ , u ostatních vlivem prostředí s vyšší vlhkostí přibližně  $2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ . Z naměřených výsledků je patrné, že směsi obsahující polypropylenová vlákna dosahují nižších pevností v tlaku z důvodu menší objemové hmotnosti, která se díky přítomnosti těchto vláken snížila u všech směsí přibližně o  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ . U vzorků uložených v laboratorním prostředí se pevnost v tlaku na množství krystalizační přísady výrazně nemění. Vzorky uložené 90 dní po vyvrání měly přibližně o 8 MPa nižší pevnost v tlaku než vzorky takto uložené 28 dní. Při měření pevnosti v tlaku u vzorků uložených 180 dní se pevnost v tlaku snížila přibližně o další 2 MPa. Tento efekt byl pravděpodobně způsoben nedostatkem ošetřovací vody pro dostatečnou hydrataci cementového tmele a nadále k aktivaci krystalizační přísady. U vzorků s vlákny byly tyto rozdíly v pevnosti nižší.

Vzorky bez polypropylenových vláken po 28 dnech uložení ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  měly průměrnou pevnost v tlaku 44 MPa, s vlákny 29 MPa. Obsah krystalizační přísady neměl na tuto pevnost výrazný vliv. Vzorky takto uložené 90 dní měly pevnost v tlaku přibližně o 10 MPa větší. To bylo pravděpodobně způsobeno delším uložením v tomto vodném prostředí, čímž docházelo k další hydrataci cementového tmelu, společně se vznikem karbonatačních novotvarů prvních etap sulfatace. U vzorků po 180 denním uložení je v některých případech vidět pokles pevnosti, jako např. u směsi s 0,5 % kr. přísady společně s vlákny, kde pevnost klesla o 16 MPa, ale došlo i k zvýšení u vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken o 2,5 MPa. V porovnání pevnosti v tlaku s ohledem na množství krystalizační přísady dosahovaly nejvyšších hodnot vzorky bez této přísady.

V prostředí vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$  se vzorky stejných směsí v časové závislosti od sebe liší průměrně hodnotou 3 MPa pevnosti v tlaku. Po 28 a 90 denním uložení měly největší pevnost v tlaku vzorky s obsahem 1,5 % krystalizační přísady, kde např. směsi bez vláken dosahovaly nad 50 MPa, v případě 180 denního uložení měla největší pevnost směs s 0,5 % krystalizační přísady.

Ve většině případů měly vzorky bez polypropylenových vláken vyšší pevnost v tahu za ohybu. U vzorků ponechaných v laboratorním prostředí se projevila nejnižší pevnost v tahu za ohybu většinou po 90 dnech od vyzrání. Vzorky zde dosahovaly 7 – 8 MPa. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu byla zaznamenána u vzorků s 0,5 % kr. přísady bez vláken po 28 dnech od vyzrání s hodnotou 9,53 MPa a u směsi s 1,5 % krystalizační přísady opět bez vláken po 180 dnech od vyzrání.

V prostředí vodného  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se pevnost v tlaku za ohybu v závislosti na délce uložení v tomto prostředí výrazně neliší, jednotlivé změny se pohybují v rámci 1 MPa. Vzorky bez vláken dosahovaly průměrně 10 MPa, s vlákny 9 MPa. U vzorků bez vláken je patrné lehké zvyšování této pevnosti v závislosti na rostoucím množství krystalizační přísady.

Průměrné změny pevnosti v tlaku za ohybu o 0,5 MPa v závislosti na době uložení byly pozorovány v prostředí vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Nejnižších hodnot bylo dosaženo většinou po 90 denním uložení s hodnotami pevnosti v tahu za ohybu u vzorků bez vláken kolem 8 MPa. V prostředí vodného  $\text{NH}_4\text{Cl}$  nebyl patrný vliv krystalizační přísady na tuto pevnost.

V prostředí plynného CO<sub>2</sub> dochází ke zvyšování pevnosti v tahu za ohybu vlivem délky uložení. Mezi vzorky takto uložených 28 a 90 dní je průměrný nárůst 2 MPa, což odpovídá asi 30 % této pevnosti. U vzorků uložených 180 dní tento efekt pokračuje především u těch, které neobsahovaly krystalizační přísadu. S použitím 0,5 % krystalizační přísady se nárůst pevnosti zpomalil a při 1,5 % dokonce zastavil. Vzorky po 28 dnech měly pevnost v tahu za ohybu přibližně 6,5 MPa, po 180 dnech byla naměřena tato pevnost 10 MPa u vzorků bez kr. přísady a přibližně 8 MPa s obsahem 1,5 % krystalizační přísady.

V souvislosti s neuspokojivými pevnostmi u vzorků ponechaných v laboratorním prostředí, byla zhotovena finální sada vzorků, která se ihned po odformování uložila do vody a ve stáří 28 dní se otestovala na pevnosti v tlaku i tahu za ohybu. Tyto vzorky dosahovaly o 23 % vyšší pevnosti v tlaku a o 18 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu (nárůst z průměrných 40 na 49 MPa v tlaku a z 8,5 na 9,5 MPa v tahu za ohybu) při porovnání se vzorky uložených 180 dní v laboratorních podmínkách po vyzrání.

Další provedenou zkouškou bylo stanovení mrazuvzdornosti jednotlivých směsí. Ta se prováděla v obdobném časovém harmonogramu, tedy po 28, 90 a 180 dnech od vyzrání. Jako mrazuvzdorné se projevíly pouze ty směsi, které obsahovaly polypropylenová vlákna. Výjimkou byla směs s vlákny bez krystalizační přísady po 90 denním uložení od vyzrání, která nevyhověla. Zde pravděpodobně došlo k pochybení při provádění zkoušky.

Na základě těchto výsledků se vybraly vzorky pro diferenční termickou analýzu, rentgenovou difrakční analýzu, vysokotlakou rtuťovou porozimetrii a byly pořízeny i snímky z rastrovací elektronové mikroskopie.

K významným endotermním efektům, při vyhodnocení diferenční termické analýzy u jednotlivých vzorků, docházelo v rozmezí teplot 450 – 500 °C, kde nastal rozklad (dehydratace) portlanditu. Rozklad fází uhličitanu vápenatého (jemnozrnný, hrubozrnný) byl patrný v rozmezí teplot 650 – 825 °C. Vzorky z vodného uložení Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a NH<sub>4</sub>Cl vykazovaly obsah portlanditu i uhličitanu vápenatého v rozmezí od 3 do 4,5 %. U vzorků z plynného prostředí CO<sub>2</sub> byl obsah portlanditu do 2 % a uhličitanu vápenatého kolem 8 %. Vzorky uložené 180 dní v prostředí plynného CO<sub>2</sub> měly obsah uhličitanu vápenatého v rozmezí 11 – 12,5 %.

Po vyhodnocení difraktogramů z rentgenové difrakční analýzy jednotlivých vzorků lze říct, že se jednotlivé záznamy mineralogicky příliš neliší. V těchto záznamech byla vyhodnocena přítomnost  $\beta$  křemene, kalcitu, portlanditu a ettringitu. U vzorků uložených 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$  bez obsahu krystalizační přísady, nebyl na difraktogramech zaznamenán portlandit.

Z výsledků vysokotlaké rtuťové porozimetrie vyplývá, že vzorky s vlákny měly větší celkovou pórovitost. Tato hodnota byla průměrně 12 % v případě použití polypropylenových vláken a 8,5 % bez nich. Ve většině případů došlo vlivem obsahu krystalizační přísady ke zmenšení celkové pórovitosti přibližně o 1 %.

U snímků z rastrovací elektronové mikroskopie můžeme nejčastěji vidět krystaly  $\text{CaCO}_3$ , ettringitu a novotvary krystalizační přísady. Snímky nám detailně ukazují tvar těchto krystalů a jejich zakomponování v pórech těchto vzorků.

## 8 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl kladen důraz na zvýšení odolnosti cementových malt vůči agresivnímu prostředí. Cementové malty byly zhotoveny s přísadou, jejíž funkční princip spočívá ve vytvoření sekundární krystalizace. Tyto krystaly vyplní mikrotrhliny, póry a kapiláry v cementové matrici, čímž zabrání pronikání vody a vlhkosti hlouběji do materiálu. Voda totiž slouží jako transportní médium agresivních látek a je katalyzátorem degradačních procesů.

Myšlenkou této práce bylo zhodnotit, na základě dosažených výsledků, vhodnost použití této přísady. Obecně platí, že kompozity na cementové bázi jsou v omezeném množství schopny samoregenerace, ta ale není dostatečná a předvídatelná. Díky krystalizačním přísadám se tento „self-healing“ efekt projevuje v takové míře, abychom s ním mohli při návrhu stavebních prací počítat. Vhodným návrhem může dojít i k ekonomické úspoře u konstrukcí s obtížnými opravami.

Schopnost zvýšit odolnost cementových malt v agresivním prostředí bylo viditelné především v prostředí vodného  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a plynného  $\text{CO}_2$ . U vzorků bez krystalizační přísady docházelo v závislosti na délce uložení v těchto prostředích k rostoucím pevnostem v tlaku i v tahu za ohybu. Pokud by byly vystaveny agresivním prostředím delší dobu, pravděpodobně by došlo k porušení vzorků bez krystalizační přísady vlivem stále se zvětšující struktury produktů sulfatace a karbonatace. Lze předpokládat, že směsi s krystalizační přísadou by agresivnímu prostředí odolaly delší dobu, čímž by se projevil jejich pozitivní vliv na zvýšení trvanlivosti cementových hmot. K verifikaci tohoto předpokladu by bylo vhodné provést testování po delším časovém úseku, např. po 360 či 720 dnech.

U vzorků ponechaných v laboratorním prostředí docházelo k poklesu pevností v závislosti na době uložení. Tento jev byl pravděpodobně způsoben nedostačujícím přísunem vody pro hydrataci cementu a také pro vytvoření struktury sekundární krystalizace.

Způsoby používání těchto přísad nejsou doposud zcela zmapovány. Dalším krokem v poznání principu chování těchto přísad je zkoumání vhodných ošetřovacích podmínek v průběhu zrání a docílení výraznějšího efektu v celkové životnosti takto modifikovaných cementových kompozitů.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LÖFFELMANNOVÁ, Ivana a ŠIROCKÁ, Petra. *Beton a jeho ochrana* [online]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/beton-a-jeho-ochrana/>
- [2] BERÁNKOVÁ, Eva. *Životní cyklus staveb* [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/udrzba-budov/10219-zivotni-cyklus-staveb>
- [3] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, ROVNANÍK, Pavel a KŘÍSTEK, Richard. *Stavební chemie: Degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. 2004.
- [4] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Beton: Stavební hmoty I*. Ostrava, 2013. Inovace programu stavební inženýrství. Technická univerzita.
- [5] BICZÓK, Imre. *Concrete Corrosion, Concrete Protection*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1972.
- [6] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. 1999. ISBN 80-7080-347-9.
- [7] BAJZA, Adolf, ROUSEKOVÁ, Ildikó. *Technológia betónu*, Bratislava: JAGA group, 2006. ISBN 80-8076-032-2
- [8] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů*. Brno, 2007. Studijní opory pro studijní program stavební inženýrství.
- [9] PAZDERKA, Jiří. *Principy použití krystalizačních hydroizolací* [online]. Praha, 2008. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/principy-pouziti-krystalizacnich-hydroizolaci>
- [10] PAZDERKA, Jiří. *Vliv krystalizačních přísad na pevnost betonu v tlaku*. Věda a výzkum. Praha, 2010 (3), str. 60-63.
- [11] TOKIHARU, Furuya, TAKAYOSHI, Iwasa and YOSHIHIRO, Sasajima. *An effective and eternal maintenance method for concrete tunnel structures*. IABSE reports: Volume 78, p. 439-447, Stockholm 1998, ISBN 3-85748-096-3

- [12] STANLEY, Stark. *Concrete waterproofing with crystalline technology*. Continuing Education Series, 1,06 Architectural Record, p. 213-220
- [13] Webová stránka společnosti *Akvatron: Hydroizolační systém* [online]. Dostupné z: <http://www.akvatron.cz>
- [14] Technický list výrobku: Krystol S-25 [online]. Dostupné z: [http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol\\_S-25.pdf](http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol_S-25.pdf)
- [15] Technický list výrobku: Krystol MIX [online]. Dostupné z: [http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol\\_MIX.pdf](http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol_MIX.pdf)
- [16] Technický list výrobku: Krystol T1 a T2 [online]. Dostupné z: [http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol\\_T1\\_a\\_T2.pdf](http://www.redrock-cz.com/katalog/produkty/pdf/Krystol_T1_a_T2.pdf)
- [17] Webová stránka společnosti *Redrock Construction* [online]. Dostupné z: <http://www.redrock-cz.com>
- [18] Webová stránka společnosti *Sika, AG* [online]. Dostupné z: <http://www.sika.com>
- [19] Technický list výrobku: Sika WT-200 P [online]. Dostupné z: <http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/a332c247-3123-340c-b93e-51dd3d1d8de4/Sika%20WT-200%20P.pdf>
- [20] Prospekt - Sika WT: *Těsnící a krystalizační přísady do betonu*. Innovation & Consistency. 2013(8). [online]. Dostupné z: <http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/d37c11dd-4232-3aca-bc7a-a07d7267ae4e/rada%20Sika%20WT%20-%20prospekt.pdf>
- [21] Technický list výrobku: SikaSeal – 210 Migrating [online]. Dostupné z: <http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/0037e48b-c793-314c-80a1-4490664fb814/SikaSeal-210%20Migrating.pdf>
- [22] Webová stránka společnosti *Nekap* [online]. Dostupné z: <http://www.nekap.cz/xypex/index.php>

- [23] Technický list výrobku: Xypex Concentrate [online]. Dostupné z:  
[http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl\\_Concentrate.pdf](http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl_Concentrate.pdf)
- [24] Technický list výrobku: Xypex Modified [online]. Dostupné z:  
[http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl\\_Modified.pdf](http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl_Modified.pdf)
- [25] Technický list výrobku: Xypex Admix C-1000 (NF) [online]. Dostupné z:  
[http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl\\_Admix.pdf](http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl_Admix.pdf)
- [26] Technický list výrobku: Xypex Concentrate DS1 [online]. Dostupné z:  
[http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl\\_ConcentrateDS.pdf](http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl_ConcentrateDS.pdf)
- [27] Technický list výrobku: Xypex Patch'n Plug [online]. Dostupné z:  
[http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl\\_PatchnPlug.pdf](http://www.nekap.cz/xypex/docs/tl_PatchnPlug.pdf)
- [28] Technický list výrobku: Akvatron 6 [online]. Dostupné z:  
[http://www.akvatron.cz/pdf/technicky\\_6.pdf](http://www.akvatron.cz/pdf/technicky_6.pdf)
- [29] Technický list výrobku: Akvatron 8 [online]. Dostupné z:  
[http://www.akvatron.cz/pdf/technicky\\_8.pdf](http://www.akvatron.cz/pdf/technicky_8.pdf)
- [30] Technický list výrobku: Akvatron 12 [online]. Dostupné z:  
[http://www.akvatron.cz/pdf/technicky\\_12.pdf](http://www.akvatron.cz/pdf/technicky_12.pdf)
- [31] SISOMPHON, K., COPUROGLU, O., KOENDERS, E., A., B., *Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive*, Construction and Building Materials, Vol. 34, 2012, p. 566–574.
- [32] ROIG-FLORES M., MOSCATO, S., SERNA, P., FERRARA, L., *Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments*, Construction and Building Materials, Vol. 36, 2015, p. 1–11.

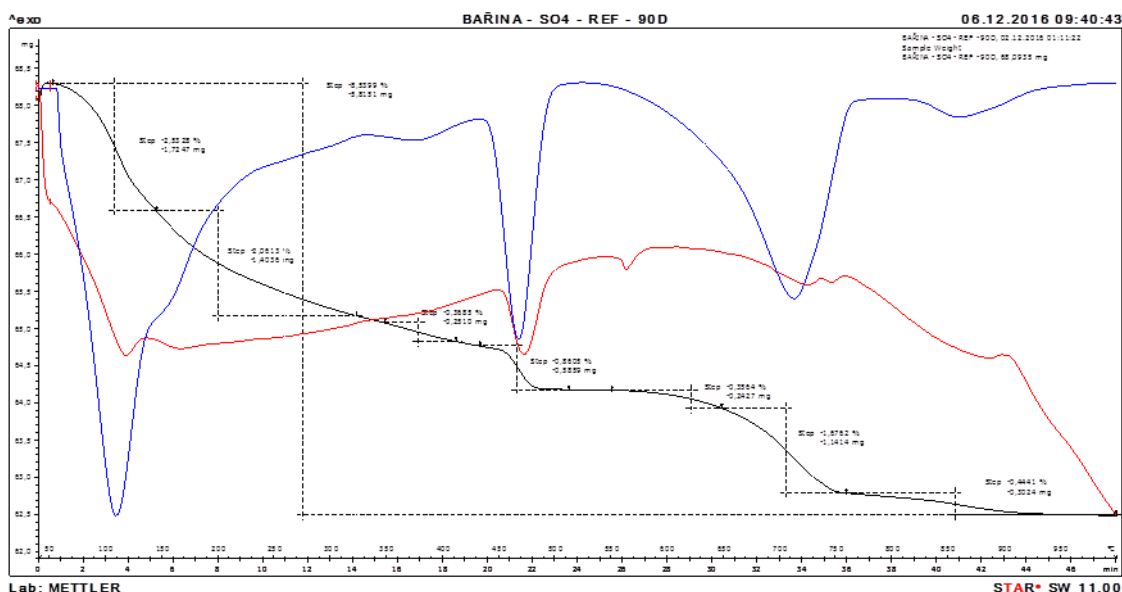
## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 – DTA a RTG záznamy

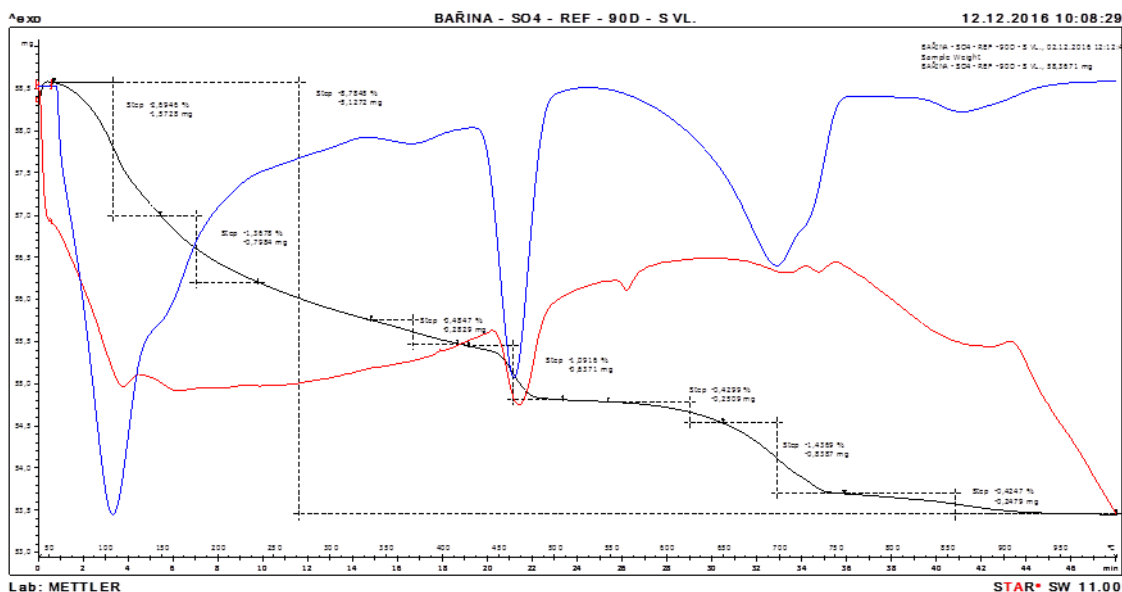
## 11 PŘÍLOHA Č. 1 – DTA A RTG ZÁZNAMY

## Diferenční termická analýza

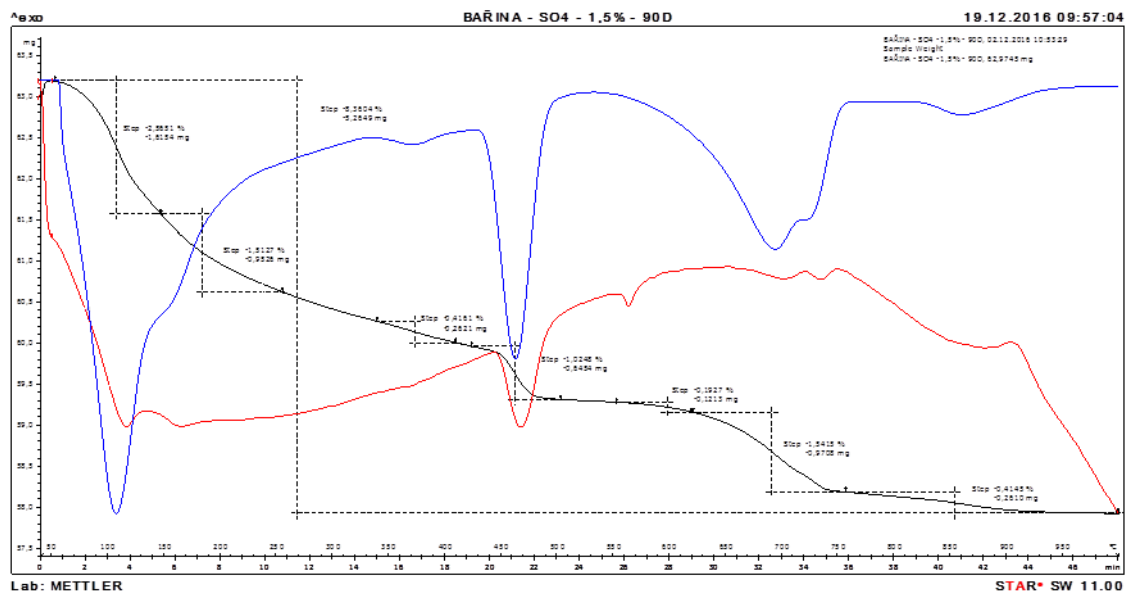
Na grafech č. 20 – 21 jsou vyhodnocené DTA záznamy jednotlivých vzorků.



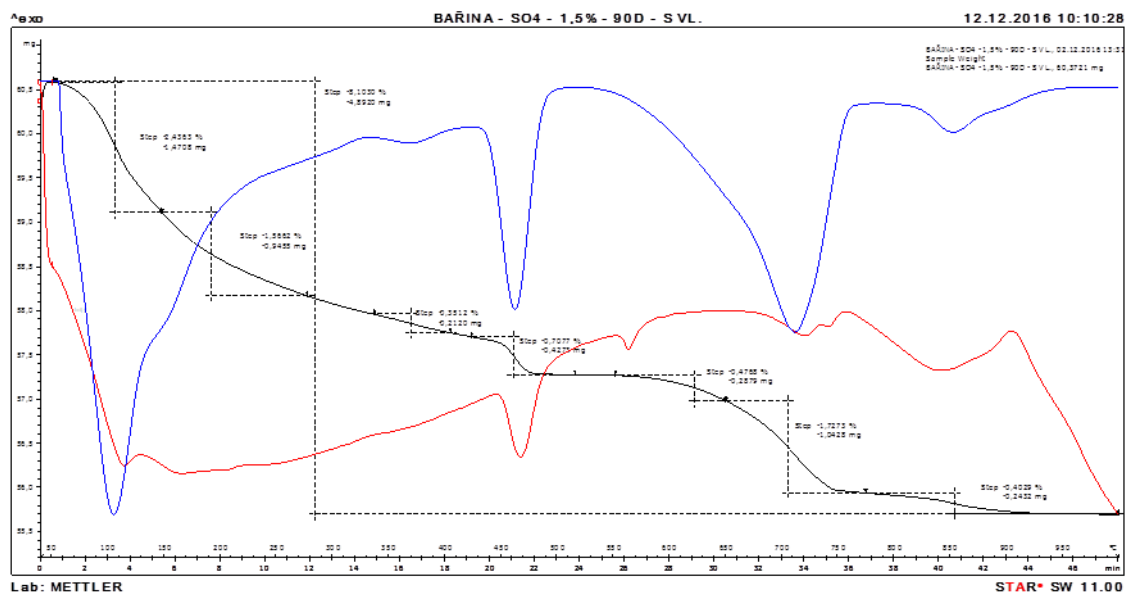
Graf č. 20 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



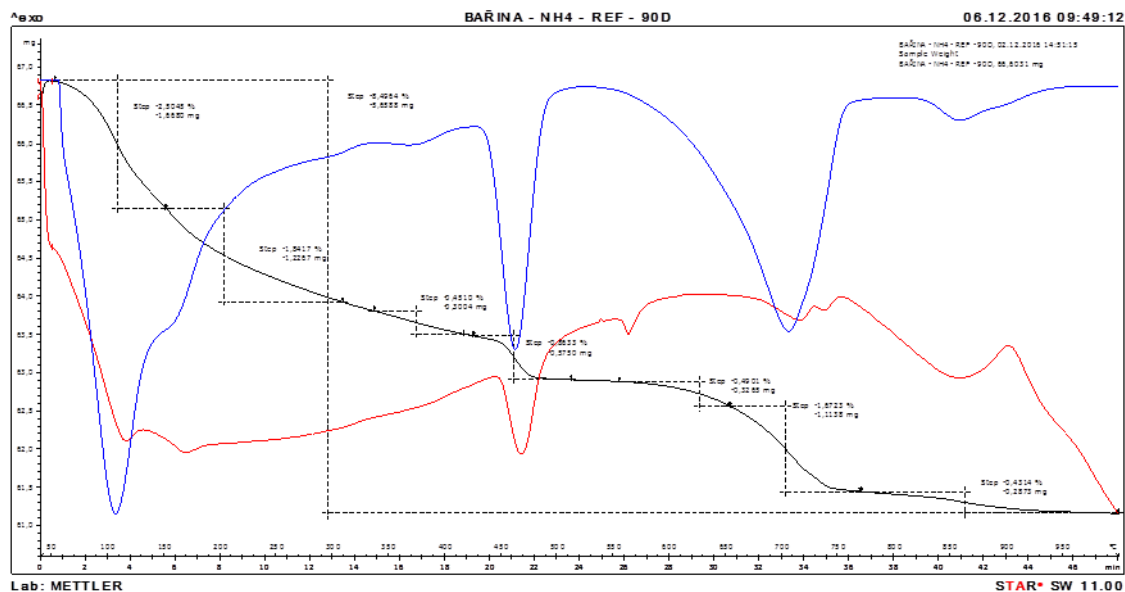
Graf č. 21 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



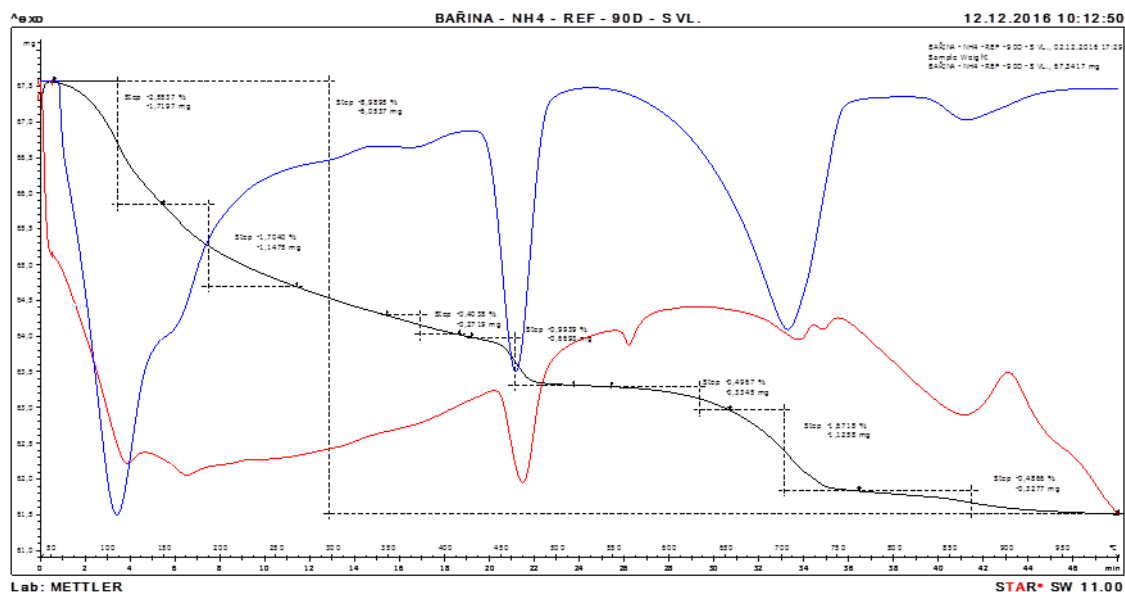
Graf č. 22 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



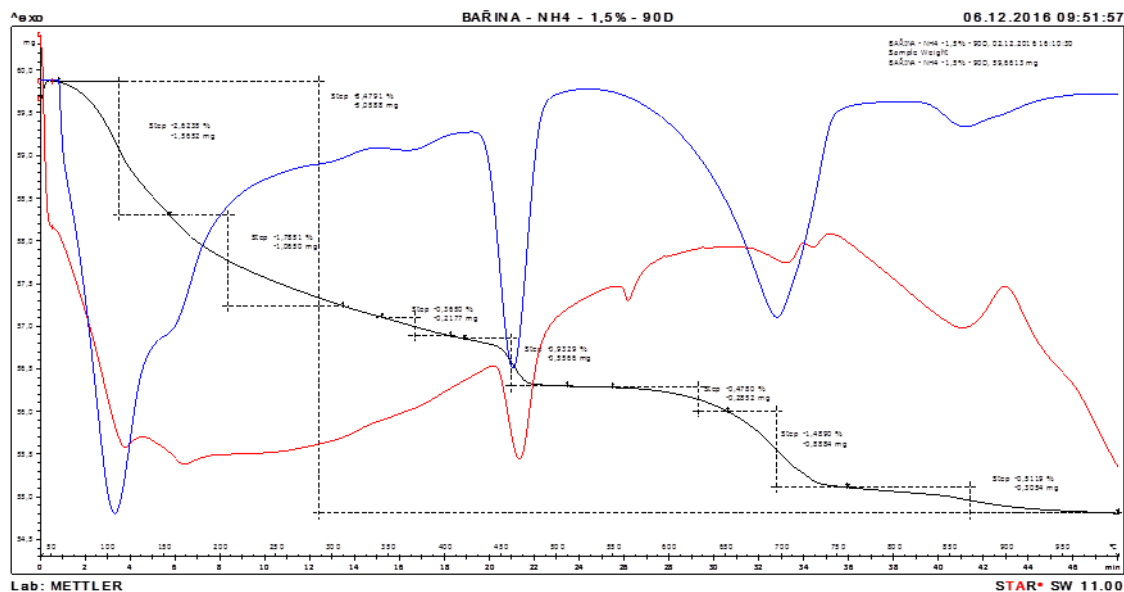
Graf č. 23 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



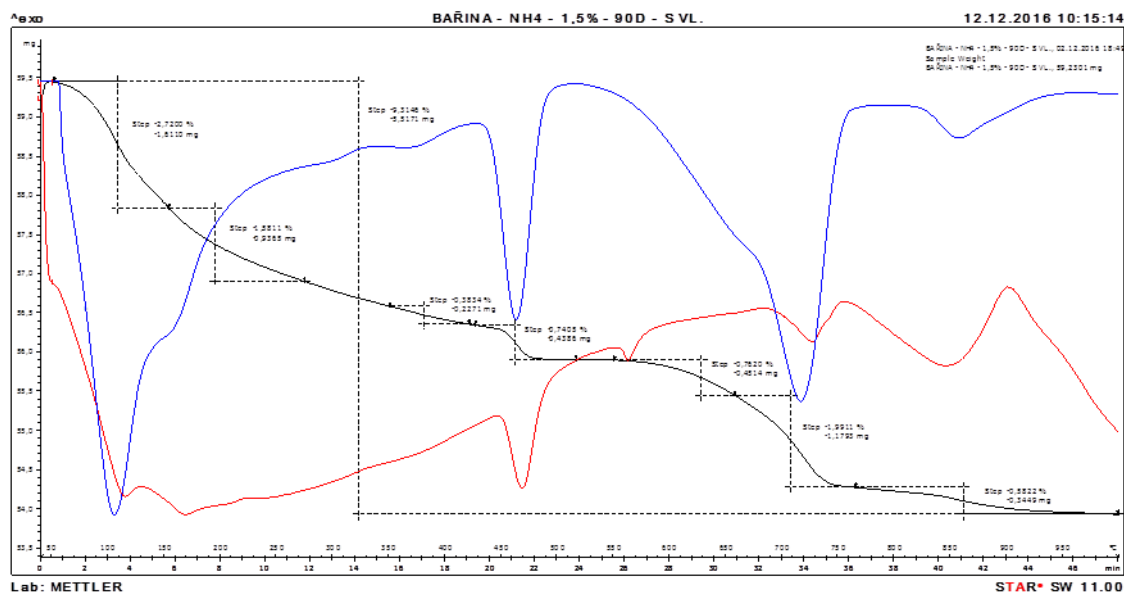
Graf č. 24 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



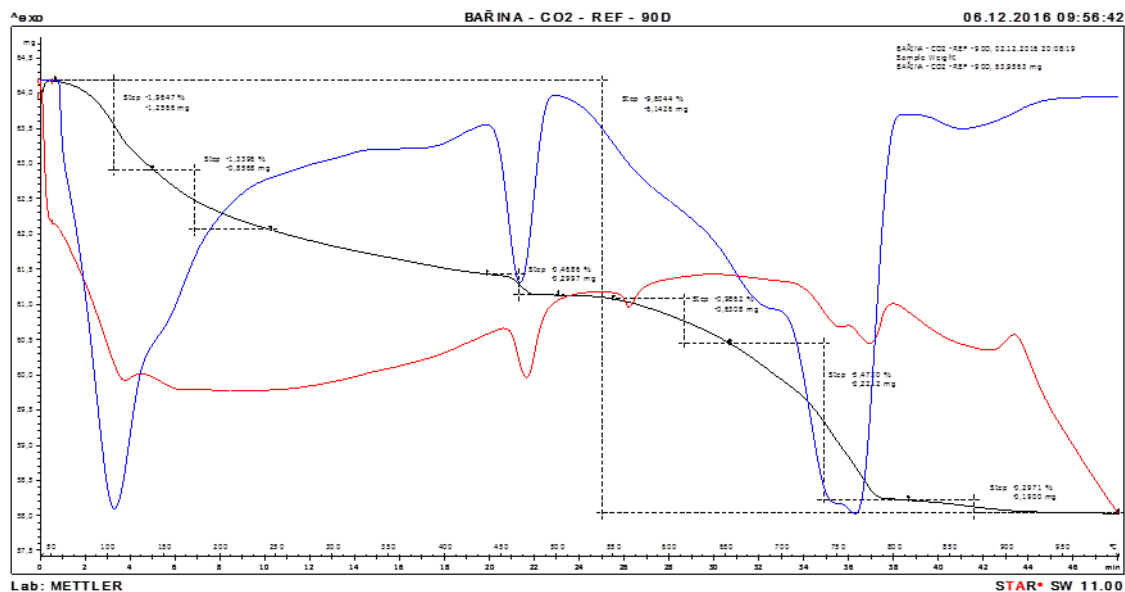
Graf č. 25 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



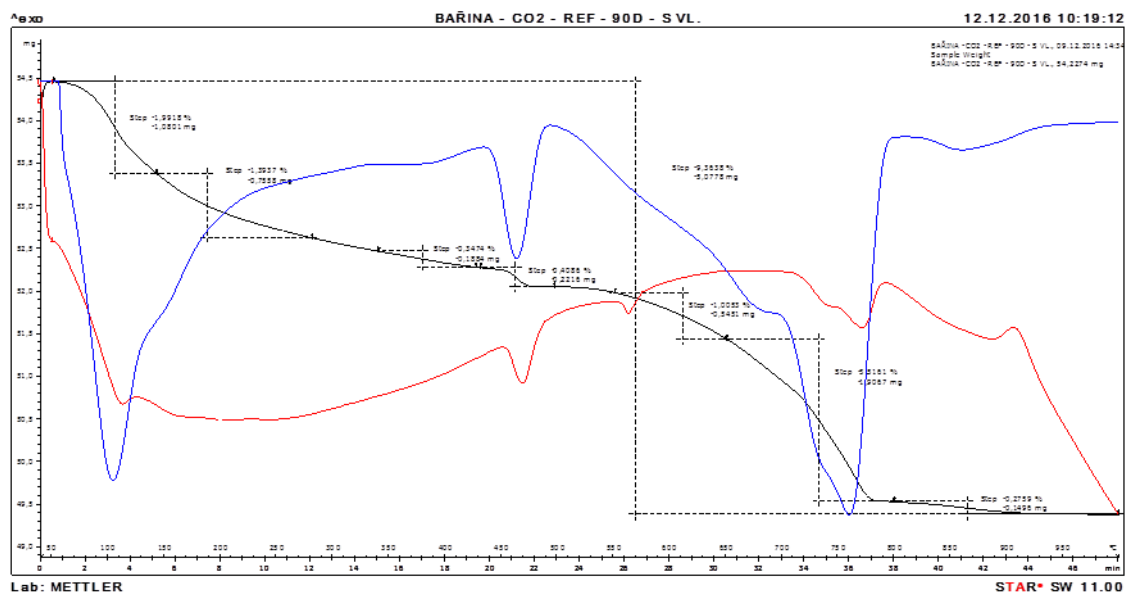
Graf č. 26 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady, bez vláken uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



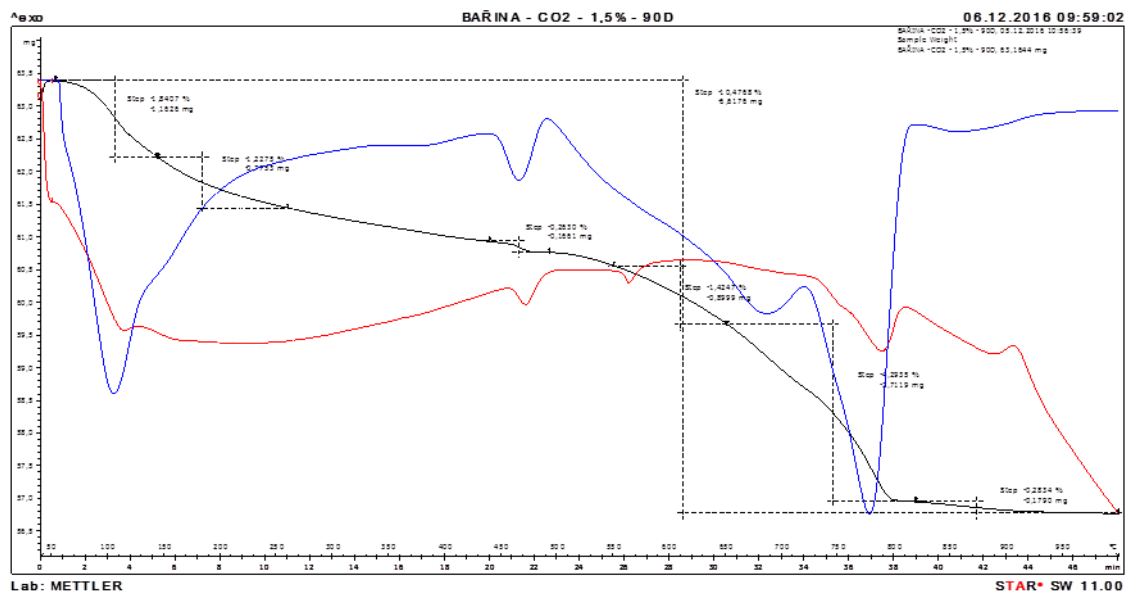
Graf č. 27 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



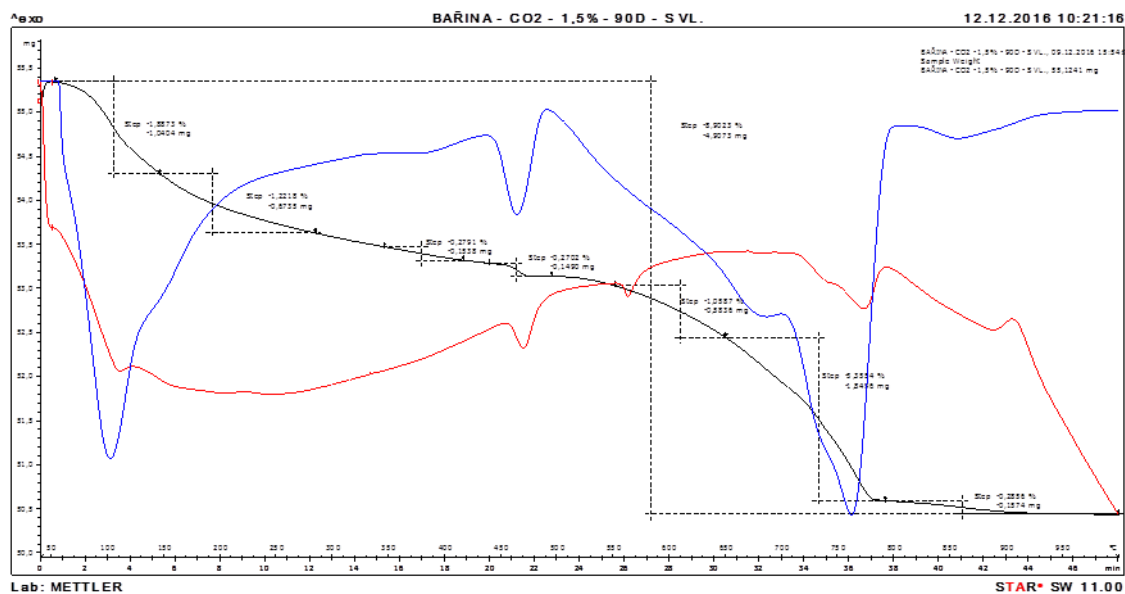
Graf č. 28 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



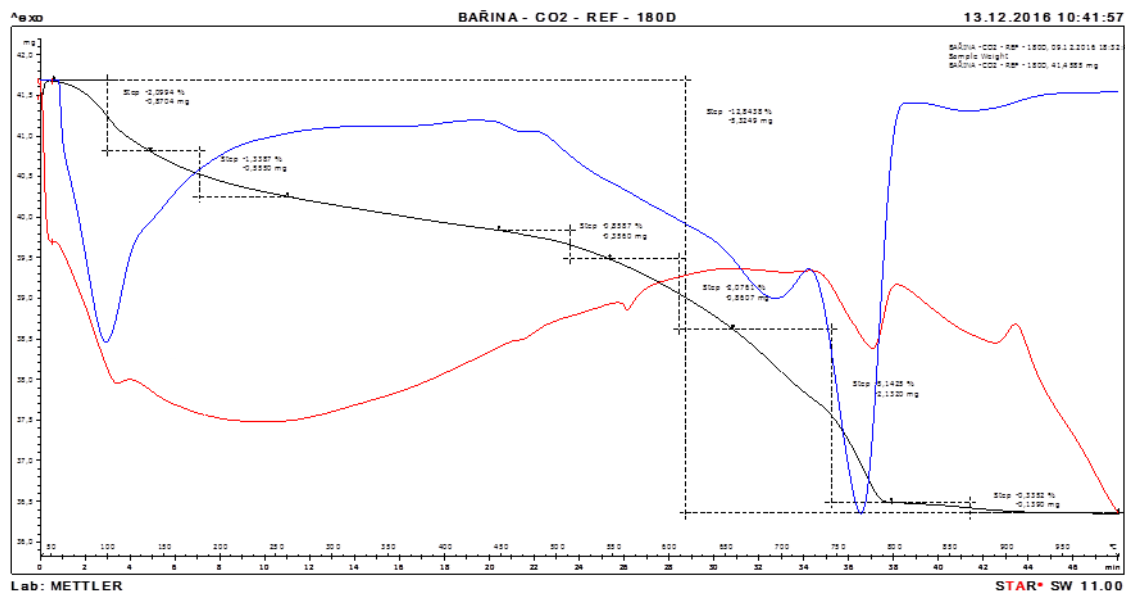
Graf č. 29 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



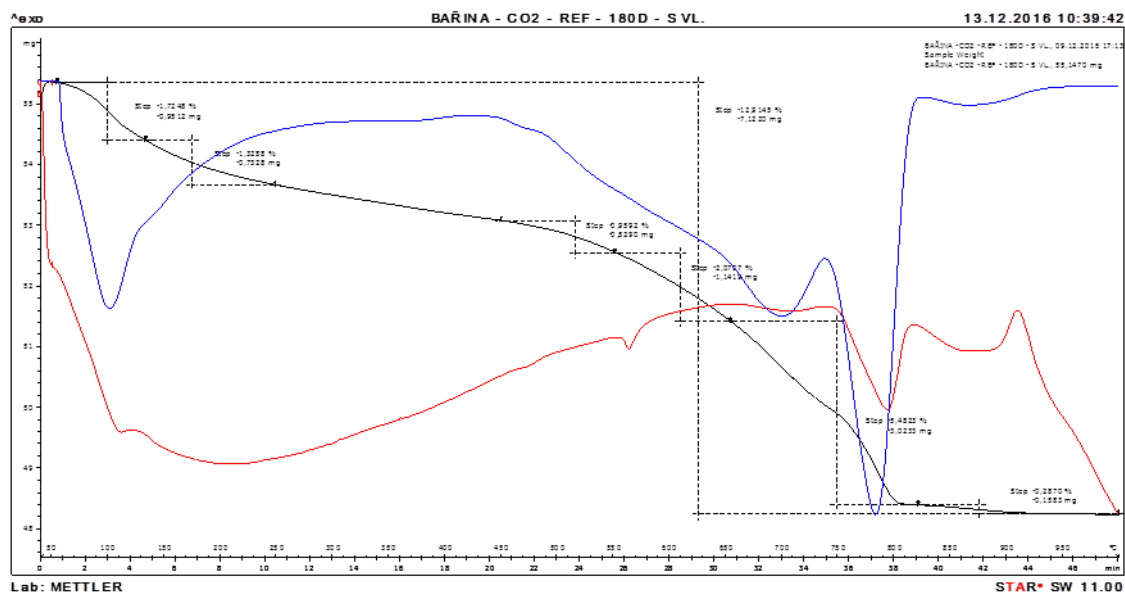
Graf č. 30 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady, bez vláken uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



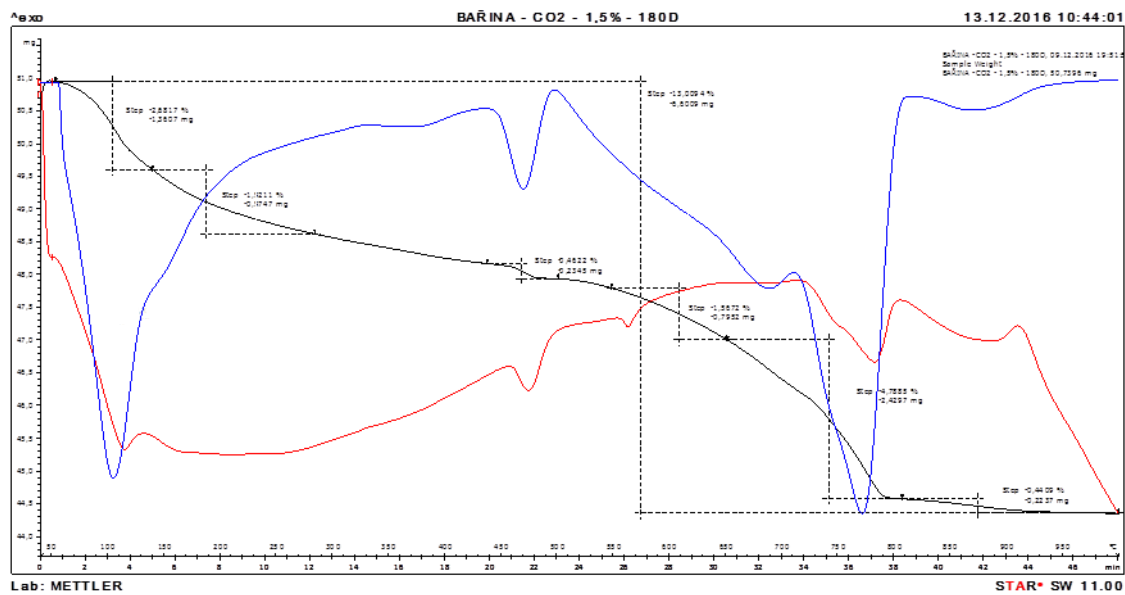
Graf č. 31 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



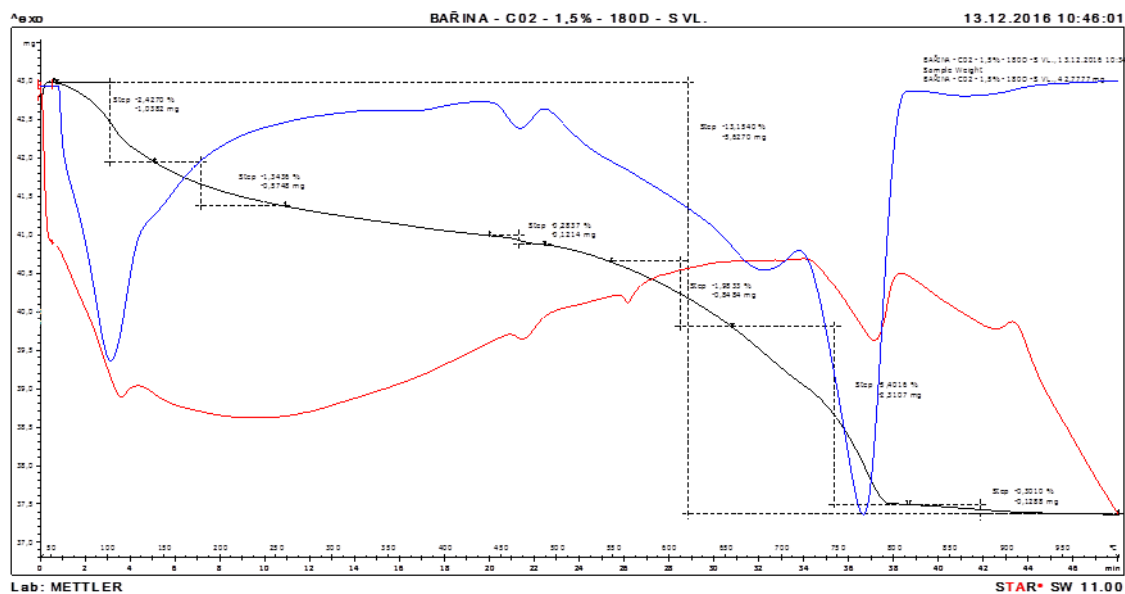
Graf č. 32 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken uloženého 180 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



Graf č. 33 DTA záznam vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 180 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



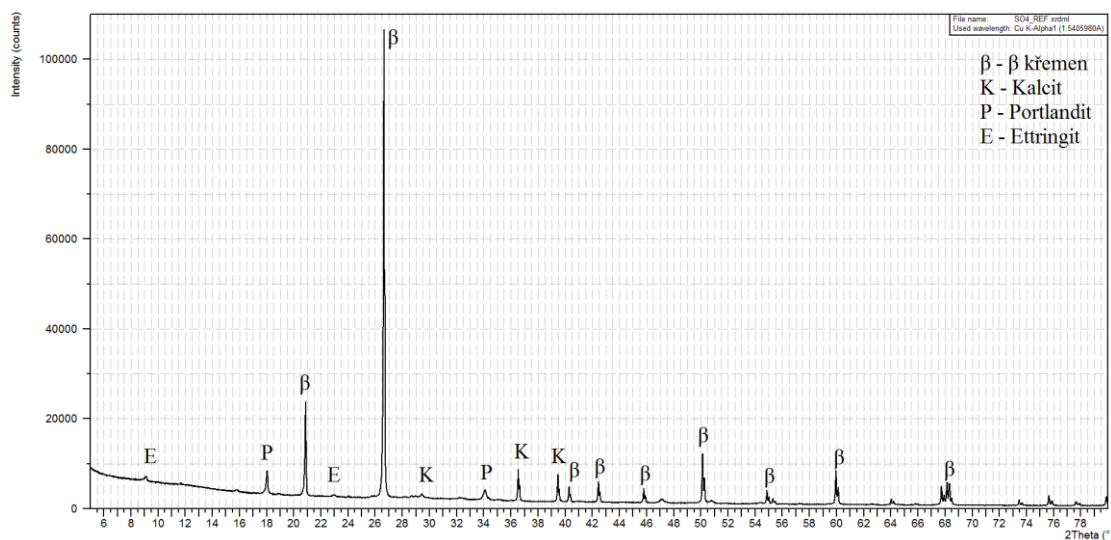
Graf č. 34 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady, bez vláken uloženého 180 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



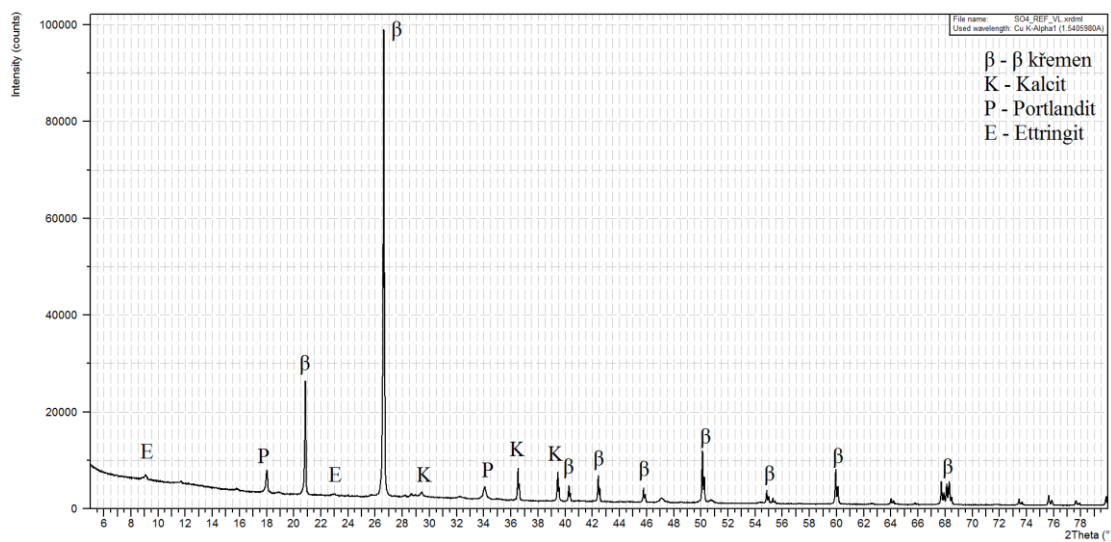
Graf č. 35 DTA záznam vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 180 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>

## Rentgenová difrakční analýza

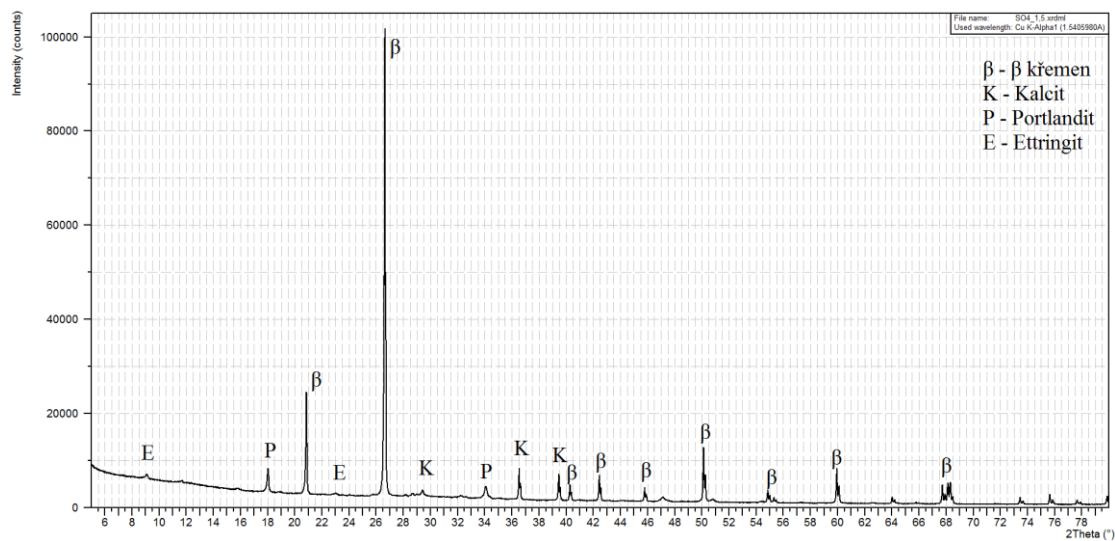
Na grafech č. 36 – 51 jsou zobrazeny difraktogramy jednotlivých vzorků.



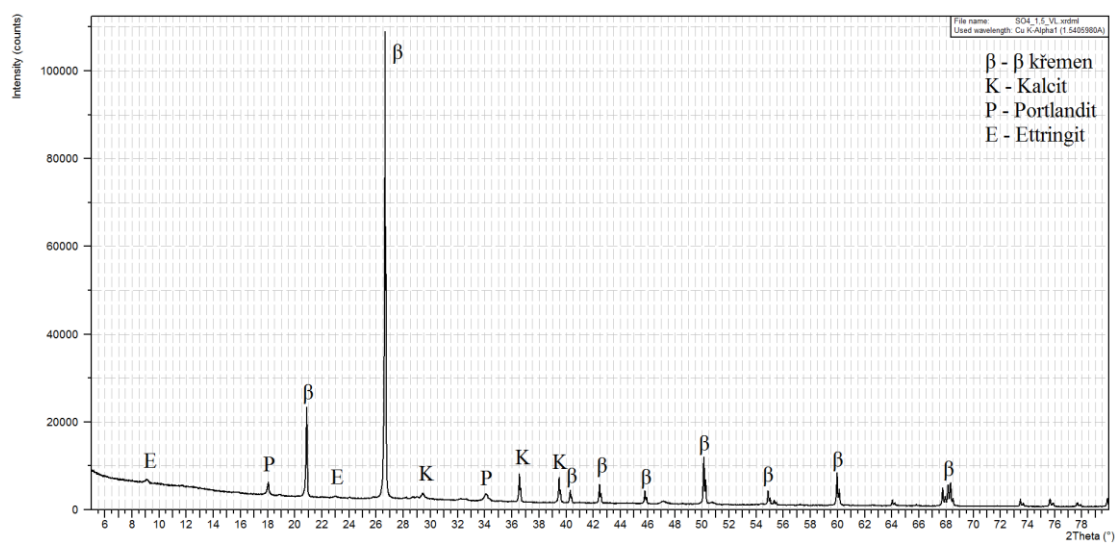
Graf č. 36 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



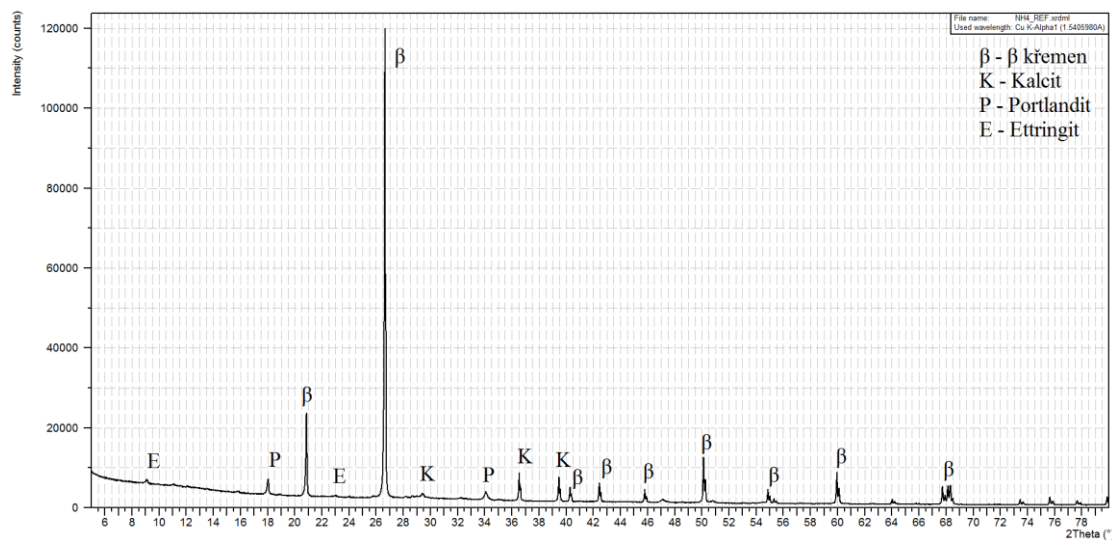
Graf č. 37 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



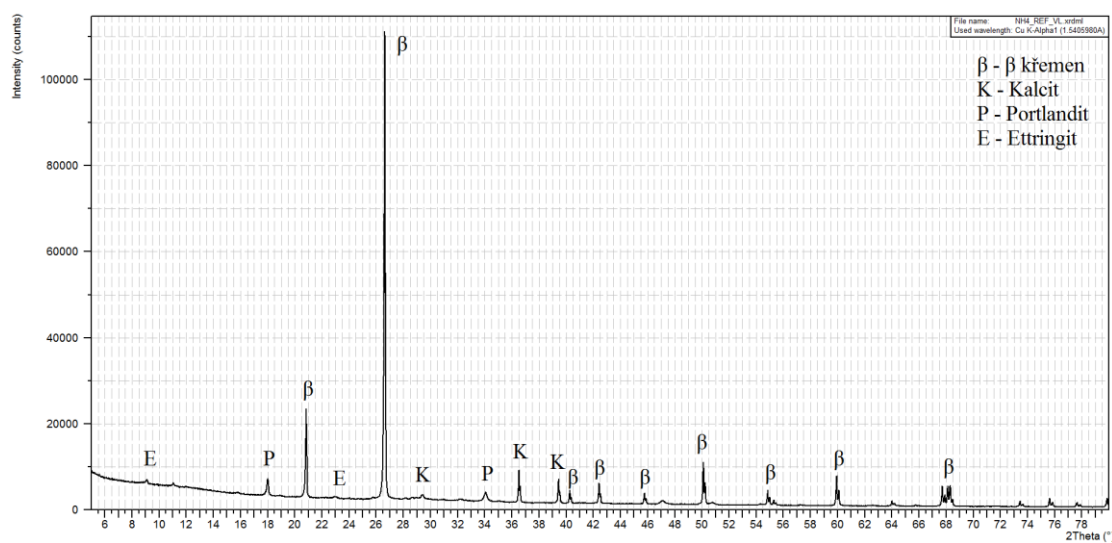
Graf č. 38 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



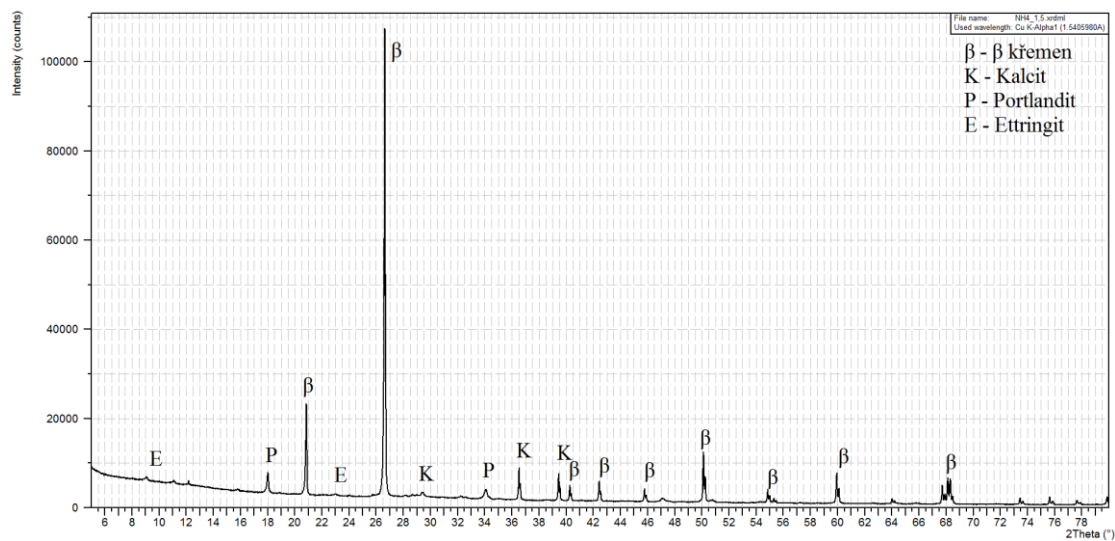
Graf č. 39 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



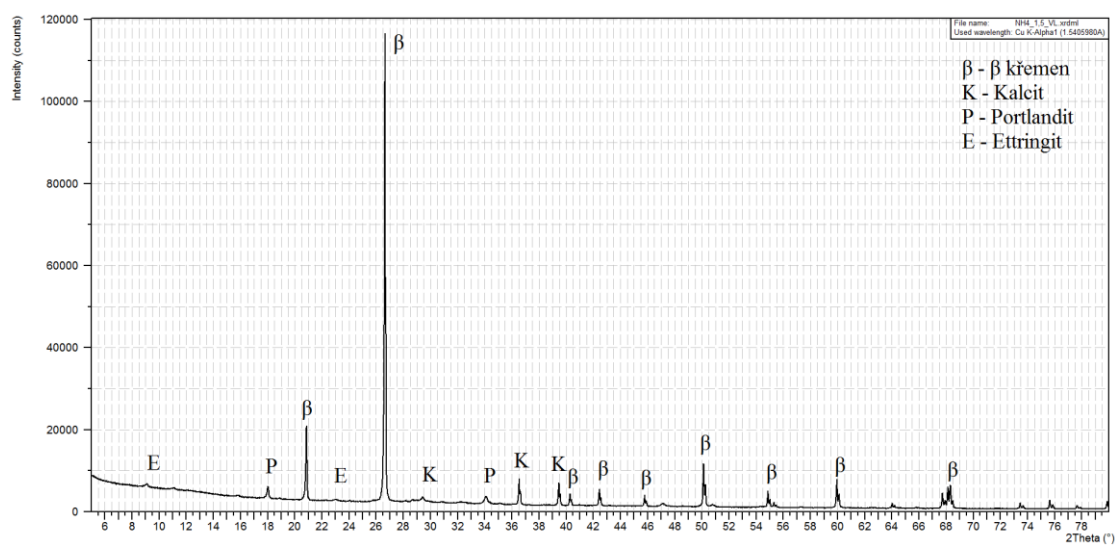
Graf č. 40 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



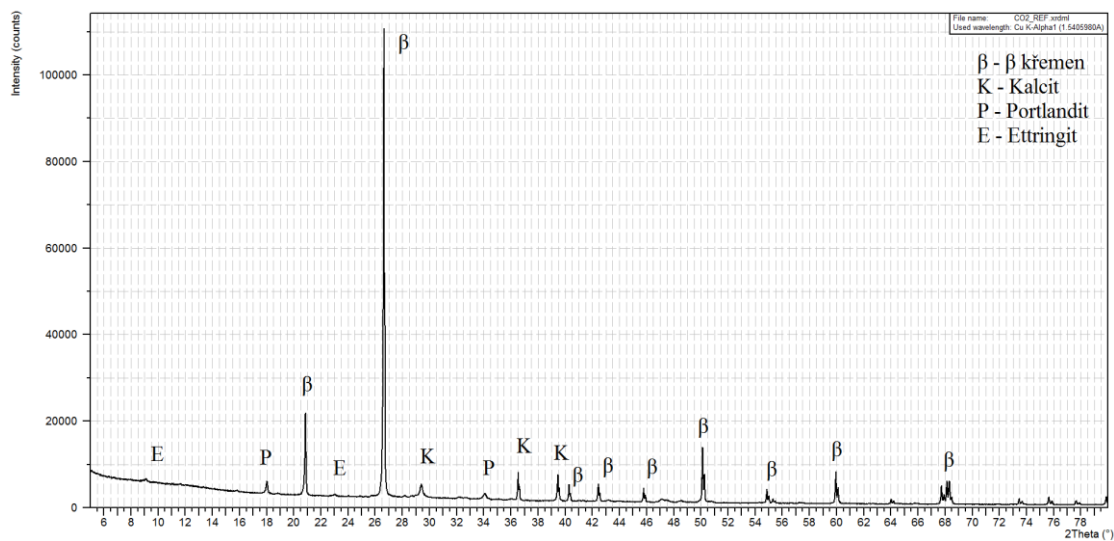
Graf č. 41 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



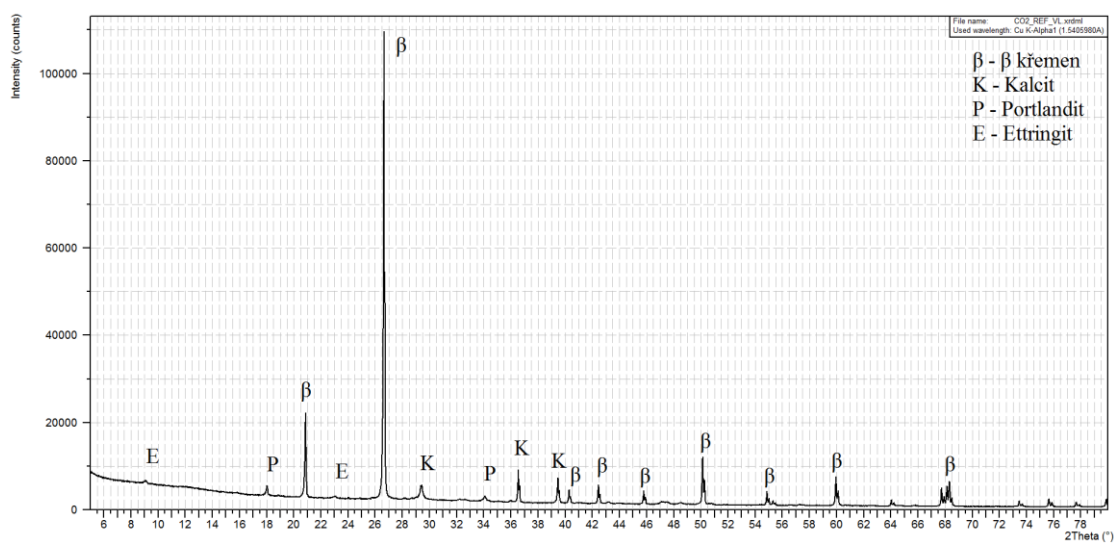
Graf č. 42 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



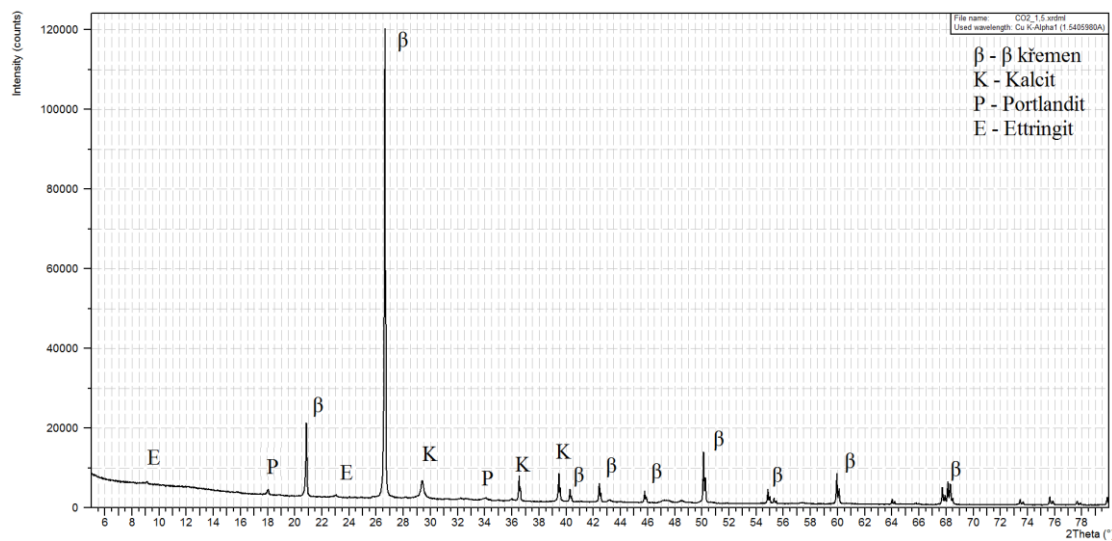
Graf č. 43 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní ve vodném prostředí  $\text{NH}_4\text{Cl}$



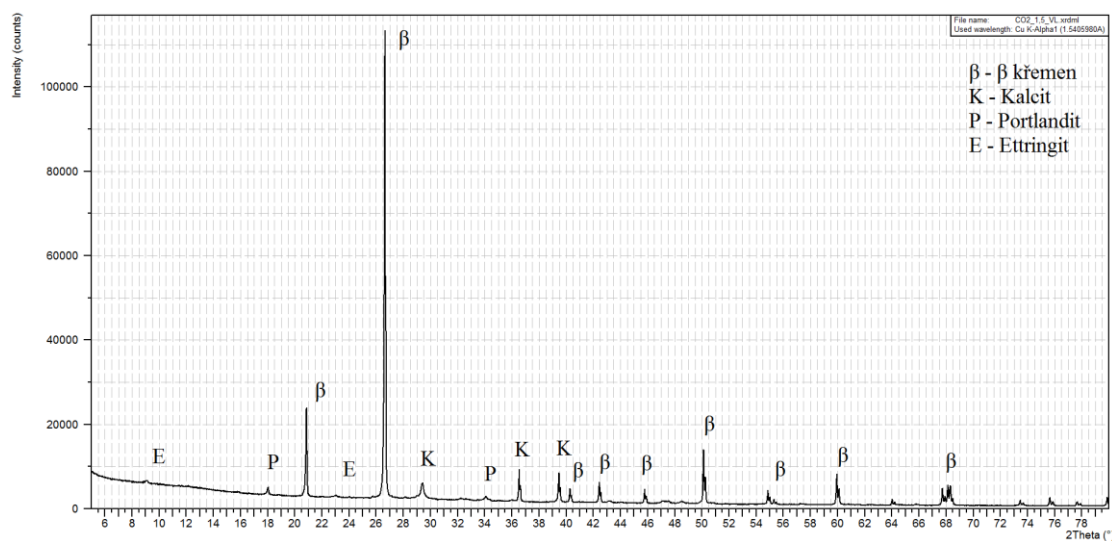
Graf č. 44 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken, uloženého 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$



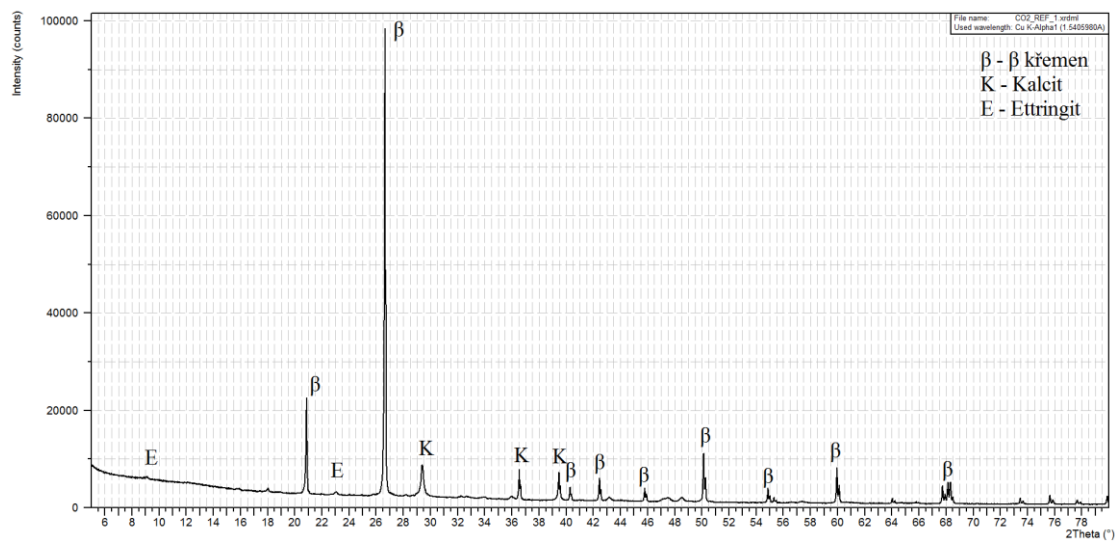
Graf č. 45 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$



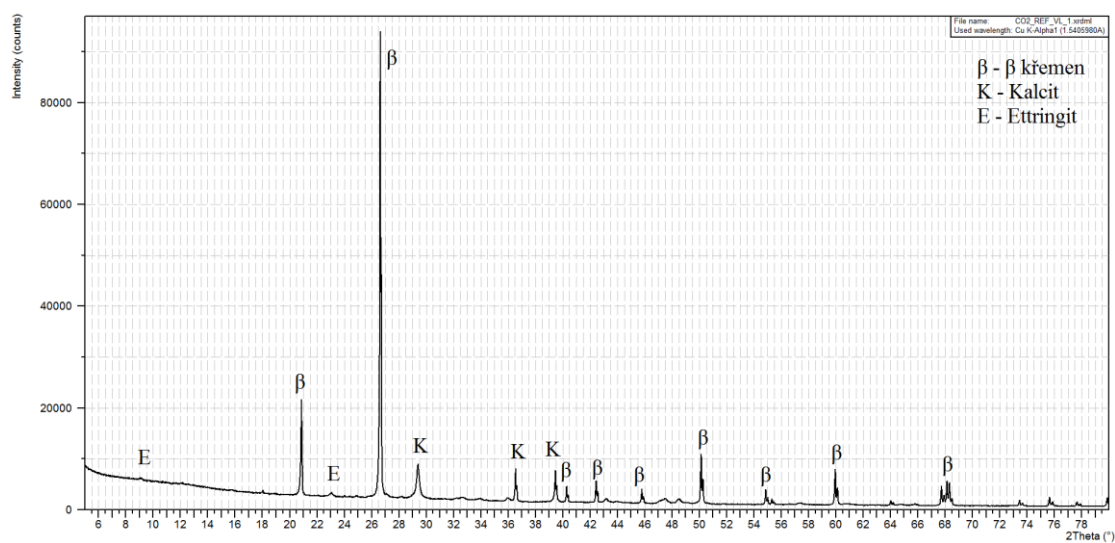
Graf č. 46 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken, uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



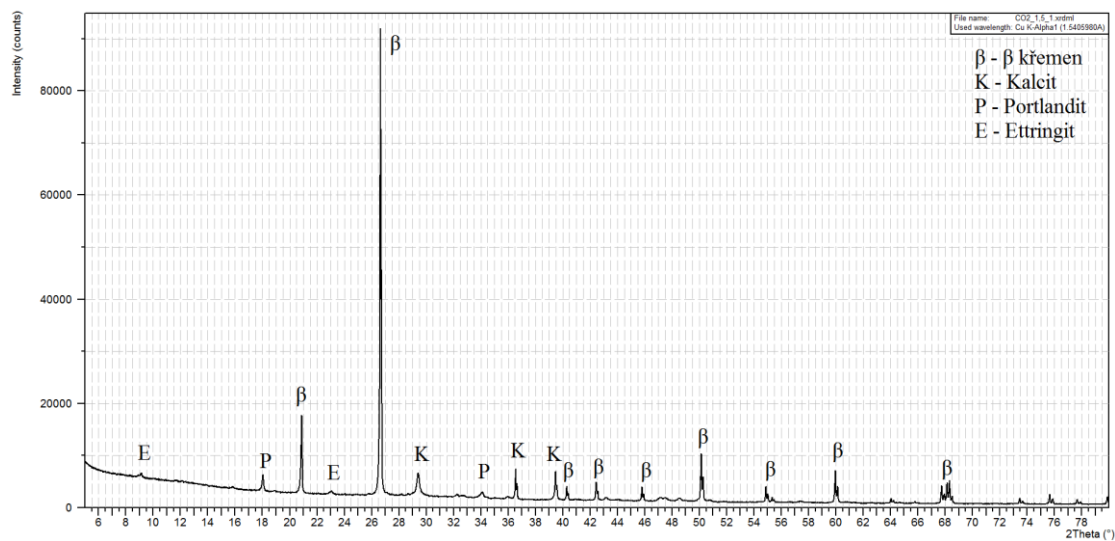
Graf č. 47 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 90 dní v plynném prostředí CO<sub>2</sub>



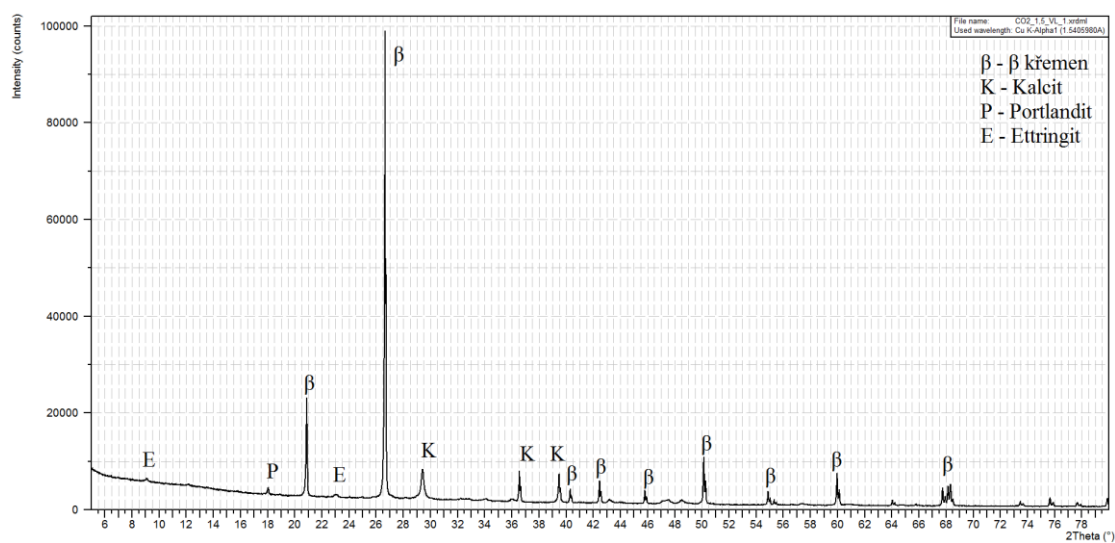
Graf č. 48 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady a bez vláken, uloženého 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$



Graf č. 49 Difraktogram vzorku bez krystalizační přísady s vlákny, uloženého 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$



Graf č. 50 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady bez vláken, uloženého 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$



Graf č. 51 Difraktogram vzorku s 1,5 % krystalizační přísady s vlákny, uloženého 180 dní v plynném prostředí  $\text{CO}_2$