



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

**OVĚŘOVÁNÍ EFEKTU JEMNÝCH VLÁKEN
A ABSORPČNÍCH PŘÍRAD NA PROCES SELF-
HEALING BETONU**

VERIFICATION OF THE EFFECT OF FINE FIBERS AND ABSORBENT ADDITIVES ON THE
PROCESS OF SELF-HEALING CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Dokoupil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Dokoupil
Název	Ověřování efektu jemných vláken a absorpčních přísad na proces self-healing betonu
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- Homma, D., Mihashi, H., Nishiwaki, T. Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7 (2), pp. 217-228, 2009, DOI: 10.3151/jact.7.217.
- Guzlina, S., Sakale, G. Self-healing of glass fibre reinforced concrete (GRC) and polymer glass fibre reinforced concrete (PGRC) using crystalline admixtures, *Construction and Building Materials*, 267, 2021, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120963.
- Bodnárová, L. Kompozitní materiály, Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST.
- Hela R. Technologie betonu I, Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST.
- Hela R. Technologie betonu II, Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST.
- Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2018-2021).
- Související české a zahraniční technické normy.
- Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Beton je vysoce trvanlivý a odolný materiál. V souvislosti s procesy probíhajícími při zrání betonu a při užívání betonových konstrukcí dochází ke vzniku trhlin v betonu. V současné době je často diskutovaný proces „self-healing“ betonu.

Popište proces self-healing v souvislosti s cementovými kompozity. Na základě rešerší odborné literatury uveďte informace o vlivu přídatku jemných vláken a přídatku speciálních příměsí na proces self-healing betonu a na vlastnosti betonu v čerstvém a v zatvrdlém stavu. Uveďte příklady aplikace přídatků různých komponent pro proces self-healing betonu. Definujte postupy pro ověření efektu komponent pro proces self-healing betonu a popište změny v čerstvých a zatvrdlých cementových kompozitech. Proveďte experimentální ověření efektu přídatku jemných vláken a speciálních příměsí na proces self-healing cementového kompozitu. Sledujte vlastnosti cementového kompozitu v procesu self-healing v čerstvém a v zatvrdlém stavu.

Předpokládaný rozsah diplomové práce min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá samohojením mikrotrhlin či defektů v betonovém kompozitu. V teoretické části představuje vliv polymerních mikrovláken na omezení rozvoje mikrotrhlin a na zlepšení samohojivých vlastností cementové matrice. Dále popisuje nejčastěji používané druhy bakterií používané pro umocnění samohojícího procesu a jejich vliv jak samostatně, tak ve spolupůsobení s vlákny, zdroji vápníku a absorpčními přísadami. Představuje také podpůrné příměsi ve formě superabsorpčních polymerů. V praktické části ověřuje vliv výše uvedených prvků a popisuje, jak bylo samohojení betonu umocněno užitím kombinací vláken, absorpčních polymerů a zdroje vápníku ve formě laktátu vápenatého. Ověřuje také, zda nebyly použitými složkami samohojivé vlastnosti zlepšeny na úkor zhoršení mechanických vlastností kompozitu.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with self-healing of concrete composite. In the theoretical part, it represents the effect of polymer microfibers on reducing the development of cracks and on improving self-healing properties. It also describes the most commonly used types of bacteria used to enhance the self-healing process and their effect both alone and in interaction with fibers, calcium sources and absorbent additives. It also represents auxiliary additives in the form of superabsorbent polymers. In the practical part, it verifies the influence of the above elements and describes how much the self-healing of concrete has been enhanced by the use of combinations of fibers, absorbent polymers and a source of calcium in the form of calcium lactate. It also indicates whether the self-healing properties used were not improved at the expense of deteriorating the mechanical properties of the composite.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymerní vlákna, vláknobeton, rozptýlená výztuž, polypropylenová vlákna, polyvinyl alkoholová vlákna, samohojení, bakterie, absorpční polymery, laktát vápenatý, praskliny, beton, uhličitán vápenatý

KEYWORDS

Polymer fibers, fiber concrete, dispersed reinforcement, polypropylene fibers, polyvinyl alcohol fibers, self-healing, bacteria, absorbent polymer, calcium lactate, cracks, concrete, calcium carbonate

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Tomáš Dokoupil *Ověřování efektu jemných vláken a absorpčních přísad na proces self-healing betonu*. Brno, 2021. 97 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Ověřování efektu jemných vláken a absorpčních přísad na proces self-healing betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Tomáš Dokoupil
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Ověřování efektu jemných vláken a absorpčních přísad na proces self-healing betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Tomáš Dokoupil
autor práce

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení při vypracovávání diplomové práce. Děkuji také své rodině a partnerce za podporu a trpělivost při zpracování práce.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Tomáš Dokoupil

Obsah

ÚVOD.....	1
CÍL PRÁCE.....	2
TEORETICKÁ ČÁST	3
1. VLIV VLÁKEN	5
1.1 Příprava vláknobetonu.....	5
1.2 Volba a výroba vláken	6
1.3 Vliv vláken na samohojení betonu	7
2. VLIV BAKTERIÍ	20
2.1 Nejčastěji používané bakterie	21
2.1.1 Bacillus subtilis.....	22
2.1.2 Bacillus sphaericus	23
2.1.3 Bacillus pasteurii.....	23
2.1.4 Bacillus megaterium.....	24
2.2 Součinnost bakterií s vlákny	25
3. DOPLŇKOVÉ PŘÍSADE	30
3.1 Superabsorpční polymery.....	30
3.1.1 Použití absorpčních polymerů v samohojícím betonu	33
3.2 Dodatečné zdroje vápníku.....	36
PRAKTICKÁ ČÁST	42
4. Cíl praktické části	42
4.1. Metodika zkoušení	42
4.2. Použité suroviny	44
5. Průběh zkoušení.....	48
5.1. 1. Etapa zkoušení.....	48
5.1.1. Navržená receptura.....	48
5.1.2. Příprava zkušebních těles	48
5.1.3. Zkoušení těles po 28 dnech	51
5.1.4. Diskuse výsledků	57
5.2. 2. Etapa zkoušení.....	59
5.2.1. Navržená receptura.....	59
5.2.2. Příprava zkušebních těles	60
5.2.3. Zkoušení těles po 28 dnech	66
5.2.4. Příprava vzorků před samohojením	69
5.2.5. Zkoušení těles po samohojení.....	71

5.2.6. Diskuse výsledků 2. etapy zkoušení.....	82
ZÁVĚR.....	85
SEZNAM ZDROJŮ.....	89
SEZNAM ZKRATEK.....	94
SEZNAM OBRÁZKŮ	94
SEZNAM GRAFŮ	96
SEZNAM TABULEK.....	97

ÚVOD

Beton je nejrozšířenější stavební materiál na světě díky jeho mnoha výhodám. Mezi ně patří nízké náklady, dobrá trvanlivost a vysoká pevnost v tlaku. I přes to, že bude beton nenahraditelným materiálem ve stavebnictví i v mnoha následujících letech neobejde se bez nevýhod. Vzhledem k nedostatkům betonu jako jsou vysoká křehkost, nízká pevnost v tahu a modul pružnosti je nevyhnutelné, že se během životnosti konstrukce na jejím povrchu objeví viditelné trhliny.

Vznik mikrotrhlin má za následek snížení odolnosti betonu proti pronikání škodlivých vlivů. Nejběžněji se jedná o vlhkost, plyny či ionty. Rozvoj trhlin urychluje přenos těchto médií do betonu či z něj a může mít za následek korozi ocelové výztuže či rozpad betonu. Dále se snižuje odolnost proti korozi chloridovými ionty, odolnost proti mrazu a tání a karbonataci betonu. Tyto jevy budou mít negativní dopad na celkovou trvanlivost a únosnost betonové konstrukce. [1]

Proto včasnou a efektivní opravou mikrotrhlin lze nejen efektivně zabránit erozi škodlivými venkovními médii, zlepšit životnost betonu, ale také ušetřit náklady na údržbu betonové konstrukce a tím snížit potencionální ekonomické ztráty. Se stávajícími metodami oprav trhlin v betonu se spojuje reprofilace povrchu betonu, dovyztužení konstrukce, injektování epoxidovou pryskyřicí či polymerovou maltou. Tyto mohou do určité míry udržovat pevnost a trvanlivost konstrukce. [2] Jedná se, ale o opravy v rámci pravidelné údržby či opravy po porušení konstrukce a objevení závady. Tudiž jsou nejen časově náročné a pracné, ale také ne úplně účinné a ekonomicky efektivní. [1]

Jak již bylo zmíněno, trhliny jsou opravovány až po jejich objevení, což může být s velkou prodlevou po samotném rozvoji trhliny. Je proto nezbytně nutné co nejrychleji najít technologii nebo metodu, která zvládne trhlinu opravit hned po jejím objevení a efektivně navrátit konstrukci do stavu, ve kterém byla před projevem trhliny. Tím by byla nejen prodloužena trvanlivost a životnost stavby, ale také významně zvýšena bezpečnost stavby. V neposlední řadě by byly omezeny ekonomické náklady vynaložené na sanace staveb. Touto technologií může být právě takzvané samohojení betonu.

CÍL PRÁCE

Samohojení betonu je v posledních letech často zmiňovaným tématem. Ve většině případů se však práce zabývají samohojením za přídavku bakterií a dalších podpurných látek. Publikace, které by řešily samohojení vláknobetonu jsou zatím ještě vzácné. Práce si klade za cíl teoreticky představit vliv vláken, bakterií a super absorpčních polymerů na samohojení a v praktické části ověřit právě vliv kombinace vláken a absorpčních polymerů bez užití často zmiňovaných bakterií. Ověřit také, jak přídavek dodatečného zdroje vápenatých iontů ovlivní samohojící schopnost betonových prvků.

TEORETICKÁ ČÁST

Samohojení je ve skutečnosti starý a poměrně známý jev u betonových konstrukcí, které mají určité přirozené autogenní hojivé vlastnosti. Ve většině běžných betonových směsí zůstává asi 20–30 % cementu nezhydratovaného. Se snižujícím se poměrem hmotnosti vody k cementu toto procento dále narůstá. Tyto částice mohou hydratovat při přímém kontaktu s vodou nebo vodní párou. Když dojde k prasknutí nebo poškození konstrukce mohou být částice nezhydratovaného cementu vystaveny vodě. Může se tedy aktivovat dodatečná hydratace a dojít k částečnému uzavření trhliny. Dle publikace Hearn a Morleye je tento mechanismus znám jako autogenní hojení již od roku 1836. [5] [6]

Dalším principem možného uzavírání trhlin je karbonatace. Produktem hydratace cementu je hydroxid vápenatý. Ten za přítomnosti vody vytváří na povrchu trhliny sraženiny, ze kterých jsou získávány ionty vápníku. Tyto ionty reagují s ionty uhlíku získanými z oxidu uhličitého obsaženého v atmosféře nebo rozpuštěného ve vodě. Tato chemická reakce vytváří uhličitan vápenatý. Dokud je přítomný hydroxid vápenatý, voda a oxid uhličitý dochází k nepřetržitému srážení uhličitanu vápenatého na povrchu poškozeného místa. Tvorba těchto „karbonatačních“ produktů může časem vést až k úplnému uzavření trhliny. [5]

První skutečné pokusy o záměrně upravený samohojící beton opublikovala C. Dry roku 1994. [4] V následujících letech se do výzkumu zapojila řada dalších vědců. Bylo představeno několik návrhů, jak řešit samohojení betonu. Za zmínku stojí návrhy o zabudovávání kapslí s různými druhy pryskyřice, které jsou porušeny při deformaci konstrukce a uvolněná látka poté zacelí trhlinu. Další autoři navrhovali například skleněné trubičky, které by vedly až na povrch a skrz které by se dalo do porušeného místa vést médium. [3]

Nejčastějším typem zacelování trhlin bývá, ale již zmíněné srážení uhličitanu vápenatého. To může být navíc indukováno mikroorganismy. Používají se speciálně kultivované bakterie. Samohojení betonu je také příznivě ovlivňováno přidávkem jemných mikrovláken, které omezují samotný vznik trhlin a následně poskytují dodatečnou plochu pro srážení CaCO_3 . Dalším způsobem, jak ovlivnit samotné

samohojení, ale také podpořit již přidané bakterie či vlákna, je přídavek superabsorpčních polymerů (SAP). Ty dodávají vodu potřebnou pro samohojení a dle některých zdrojů mohou chránit bakterie před krystalickými tlaky. Výše zmíněné složky může ještě podpořit dodatečný zdroj vápníku. Ten se může přidat ve formě laktátu vápenatého.

1. VLIV VLÁKEN

Jak již bylo zmíněno v úvodu, je tvorba trhlin u železobetonových konstrukcí běžným a nevyhnutelným jevem. Během doby životnosti ale může vést k vážnému poškození celé konstrukce. Tvorba trhlin je způsobena různými vlivy. Nejčastěji je zapříčiněna vlivy jako je smrštění při tuhnutí a tvrdnutí, zmrazováním a rozmrazováním či vlivem vnější síly. Bez ohledu na příčinu vzniku, trhlinka umožňuje vstup agresivních činidel do betonu. Mezi hlavní zástupce patří chloridové ionty a oxid uhličitý (CO₂). Jejich zaviněním poté může docházet ke korozi výztuže již v raném věku konstrukce. Tato poté přináší nejen snížení únosnosti, ale také tvorbu rzi, která dále nabýváním na objemu rozšiřuje trhliny a způsobuje odlupování krycí vrstvy betonu a další degradaci prvku. [7]

Právě z těchto důvodů musíme vzniku trhlin na betonových konstrukcích vyhnout nebo ho alespoň v co největší míře omezit. Jedním z nejpoužívanějších a nejpoužívanějších způsobů řešení tohoto problému je přidavek mikrovláken do betonové směsi.

O možnosti přidavku vláken pro zamezení vzniku trhlin poprvé uvažoval až Romualdi roku 1963. Do té doby se o vláknobetonu, a to téměř výhradně o vláknobetonu vyztuženého ocelovými vlákny, mluvílo v souvislosti se zlepšením mechanických vlastností. Tato teorie odstartovala období rozsáhlých výzkumů, neboť zlepšení této vlastnosti byla velmi lákavé. Právě díky této snaze můžeme dnes uvažovat s kompozity s několikanásobně lepšími mechanickými vlastnostmi, než umožňovaly původní vlákna. [8]

1.1 Příprava vláknobetonu

Klíčovým krokem při realizaci spolehlivé železobetonové konstrukce je zvolení vhodných surovin a jejich odpovídající poměr. Správně zvolená betonová směs je taková, která bude po zatvrdnutí plnit funkci ve stanoveném prostředí, bez toho, aby byla negativně ovlivňována vnějším agresivním prostředím. Je proto nutné každou směs navrhovat přesně pro daný účel. U vláknobetonu je tedy potřeba počítat s další proměnnou a tou jsou vlákna. Je nutné řešit jaká vlákna a kolik jich přidat a také jak

upravit záměs, aby její vlastnosti nebyly degradovány jejich přídatkem. Důležitým faktorem je také dokonalé rozmísení vláken, i to je zajištěno správnou recepturou.

Výběr cementu, kameniva, přísad a příměsí není nijak ovlivněn potencionálním přídatkem vláken. Cement se vždy vybírá dle požadované pevnosti v tlaku, množství hydratačního tepla či agresivity prostředí. Volbu cementu, jakožto nejdražší složky ve směsi v praxi vždy navíc ovlivňuje ekonomické hledisko. [9]

Práce se bude zabývat přidáváním polymerních mikrovláken, která nemají vliv na volbu kameniva. V betonech, do kterých jsou přidávána ocelová vlákna, se volba kameniva uzpůsobuje tak, aby odpovídající křivka zrnitosti zajistila dokonalé spolupůsobení. U makrovláken také platí podmínka maximální délky vlákna k velikosti zrna kameniva. Ta říká, že délka vlákna má být maximálně trojnásobek velikosti zrna kameniva. Jelikož se práce bude zabývat pouze mikrovláky s délkami do 10 mm, toto omezení se nemusí uvažovat. Přídavek vláken může ovlivnit množství použité vody. [9]

Přídavek vláken nejvíc ovlivňuje volbu přísad. Použitím vláken se výrazně zhoršuje zpracovatelnost. Toto zhoršení je tak výrazné, že někteří výrobci vláken uvádí v technických listech o kolik se zpracovatelnost změní. Proto je nutné uvažovat do směsi čerstvého vláknobetonu s velmi účinnými plastifikačními přísadami. [10]

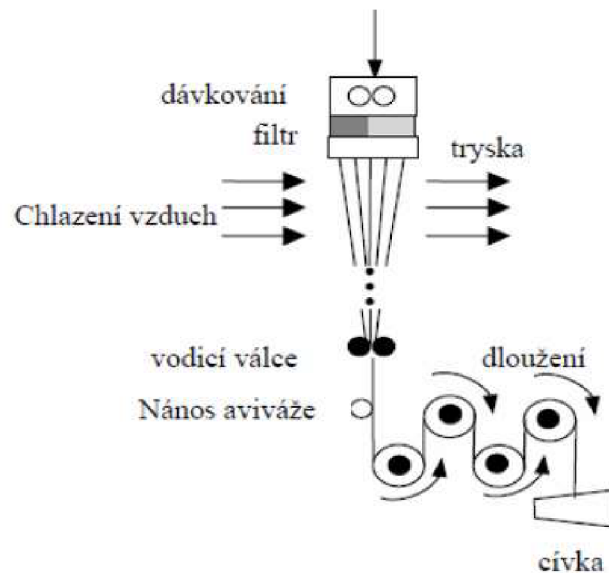
Přidáním vláken do směsi získáváme větší plochu částic, kterou je potřeba obalit cementovým tmelem. Proto se do vláknobetonů často přidávají jemnozrné podíly pro dosažení plynulé křivky, a právě pro získání dostatku jemného tmelu. Příměsí, které mohou z části nahrazovat cement, přidáváme do vláknobetonu ve stejné míře jako do běžného betonu a nejsou ovlivněny přídatkem vláken. [9] Mikrovlákna se nejčastěji volí polypropylenová (PP), polyethylenová (PE) či polyvinyl alkoholová (PVA). Běžně se používají v délkách do 10 mm.

1.2 Volba a výroba vláken

Norma ČSN EN 14889-2 dělí polymerní mikrovlákna na monofilamentní (jednovláknitá) a fibrilovaná (vláknitá). [11] O jaký druh se jedná, vyplývá z procesu výroby. Monofilamentní jsou jemnější a jsou, jak název napovídá vyráběny jako

jednotlivé vlákno. Vyrábí se procesem tavného zvlákňování. Princip spočívá ve vytlačování jemného proudu taveniny tryskou. Vlákno je ochlazováno, upravováno a taženo do požadovaného průměru. Postup je znázorněn na obrázku č. 1. Tavným zvlákňováním se zpracovávají nejběžněji používaná vlákna a to PP, PE a PVA [12]

Obrázek 1: Proces výroby vláken tavným zvlákňováním



Zdroj: Vacl, J., (2012). *Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti*

Fibrilovaná vlákna vznikají sekáním jednotlivých vláken z kontinuální fólie. Protože jsou takto zpracovávána, jsou ve výsledku hrubší a větší. Fólie vzniká litím a poté tažením za tepla k dosažení požadované tloušťky.

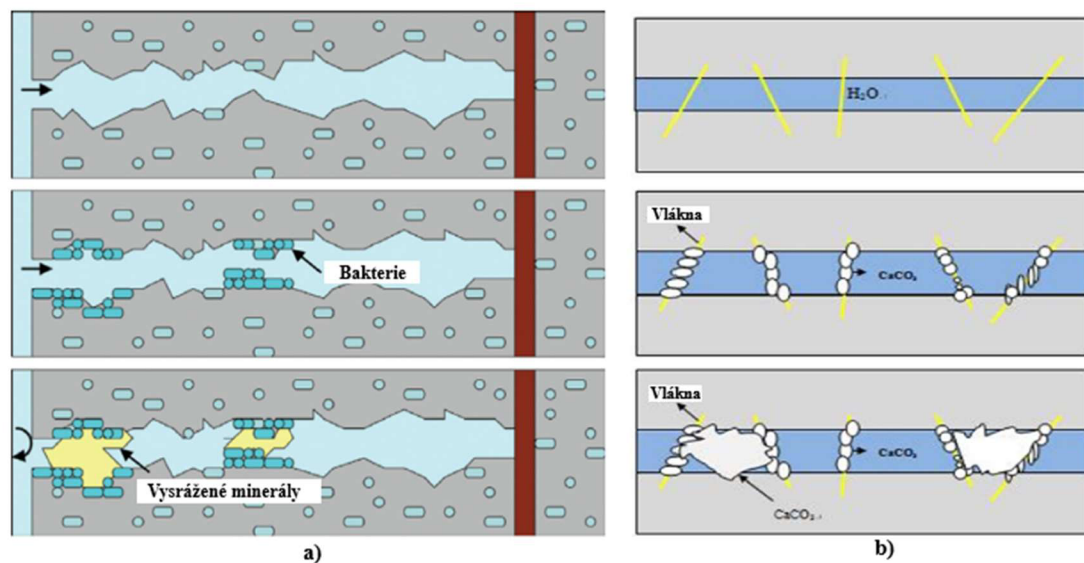
Další způsoby výroby vláken je zvlákňování suché a mokré a pro výrobu moderních nanovláken využívané elektrostatické zvlákňování. Podrobné postupy a rozdělení je zmiňováno v předchozí práci s názvem *Studium vlastností cementových kompozitů s přídavkem polymerních vláken*. [10]

1.3 Vliv vláken na samohojení betonu

V průběhu procesu samohojení betonu dochází k vytváření krystalů, které postupně zacelují vzniklé trhliny. Krystaly se ale mohou v běžném betonu přichytit pouze na stěnách trhliny. Pokud jsou do směsi přidány mikroválka dochází k několika synergiím.

Krystaly nově vzniklých útvarů se mohou tvořit také na vláknech a snáze překlenovat trhlinu. Zároveň přidání vláken samo o sobě omezuje rozvoj trhlinek nebo podpoří rozvoj sítě jemných trhlinek namísto jedné větší trhliny v kritickém místě. Seskupení jemných trhlinek jednak není tak nebezpečné a zároveň je pro beton výrazně snazší zacelit velmi tenké trhlinky. Jak bude dále v práci zmíněno každý samohojící beton má určitou hranici rozpětí trhliny, kterou je schopen ještě zacelit.

Obrázek 2: Princip vlivu vláken na samohojení betonu



Zdroj: DOKOUPIL T., (2020). *Studium vlastností cementových kompozitů s přidavkem polymerních vláken*. Brno. 87 s., Bakalářská práce.

Dle řady autorů je kompletní zacelení možné jen u prasklin do šířky 200-300 μm . Pro dokonalé spojení, ale dle studií provedených Edwarsenem [13], Aldeem a kol. [14], Nishiwakim [15] musí být trhlinka pouze do šířky 50 μm . Takto jemné prasklinky mohou vznikat téměř výhradně jen ve vláknech vyztužených konstrukcích. Tato skutečnost v posledních 5 letech motivovala velkou řadu výzkumů samohojících vlastností vláknobetonu. [5]

Vliv materiálu vláken na samohojení

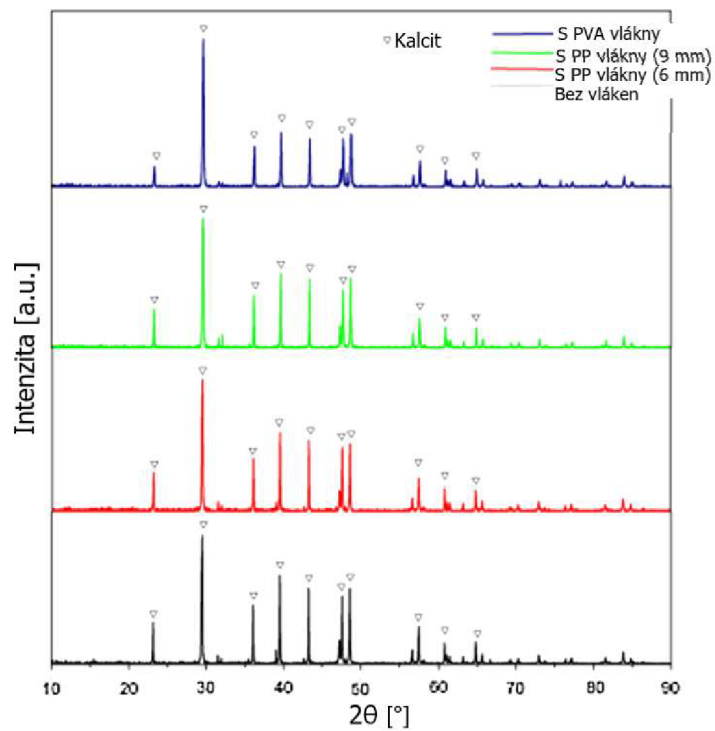
Efektivita samohojení v závislosti na typu přidaného mikrovlákna je téma, ve kterém se jednotlivé publikace rozcházejí nejvíce. Větší část odborné veřejnosti publikovala názor, že nezáleží na materiálu mikrovlákna. Toto stanovisko zastává např. práce, kterou vydal Snoeck a De Belie v roce 2012. Podle nich nejvíce ovlivní efektivitu samohojení geometrický tvar vlákna, hrubost povrchu, či rozmísení. Stejně jako stáří

konstrukce při vzniku trhlin. Tato skutečnost platí i obecně pro samohojení jakéhokoliv betonu, ne pouze vláknobetonu. Mladší konstrukce mají větší množství nezhydratovaného cementu a tím pádem vyšší samohojící potenciál. Na druhou stranu, jak uvedl Kan a spol. starší vyzrálý prvek má lepší soudržnost s vlákny, a proto dochází k lepší distribuci trhlin o menších rozpětích. Ty jsou poté, jak již bylo uvedeno výše příznivější pro samohojení. [5]

S rozdílným názorem, než má Snoeck a De Belie, a to že záleží na druhu materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno, přišla publikace, kterou uvedli Feng, Su a Qian. Ta se zabývá porovnáním samohojení betonu s přidavkem bakterií (viz kapitola 3) a vlákny z polypropylenu (PP) a polyvinyl alkoholu (PVA). [15]

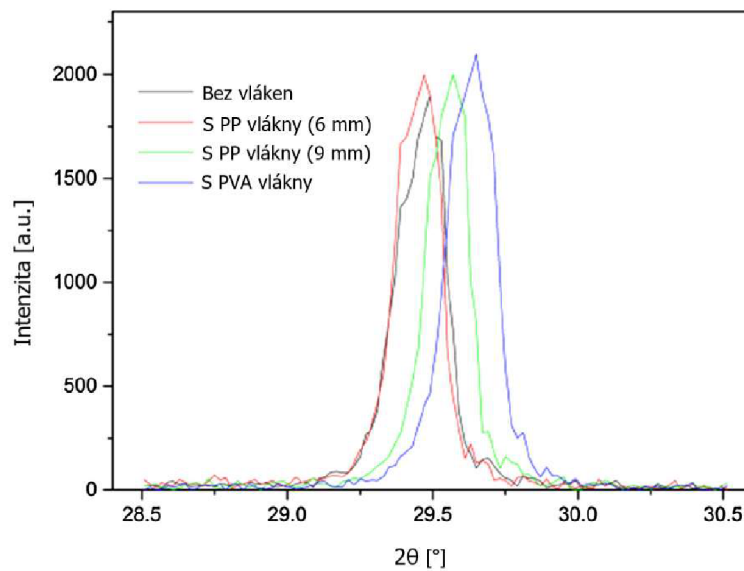
V práci nejprve ověřovali druh vzniklých krystalů při zacelování trhliny. Výsledky infračervené spektroskopie ukázaly, že jak v referenčním prvku, tak v prvcích obsahujících PP i PVA vzniká uhličitán vápenatý. Aby se tento výsledek potvrdil, byly provedeny rentgenové difrakční analýzy jednotlivých vzorků. Obrázek č. 3 ukazuje vyhodnocení difrakční analýzy. Jak je vidět, všechny dominantní vrcholy ukazují na kalcit. Není prokázán aragonit ani vaterit. Díky těmto dvěma zkouškám konstatovali, že materiál vlákna neovlivní druh vzniklého krystalu. [15]

Obrázek 3: RTG difrakční analýza sraženin vzniklých u jednotlivých vzorků



Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Obrázek 4: Vrchol kolem 29,5° na grafu RTG difrakce



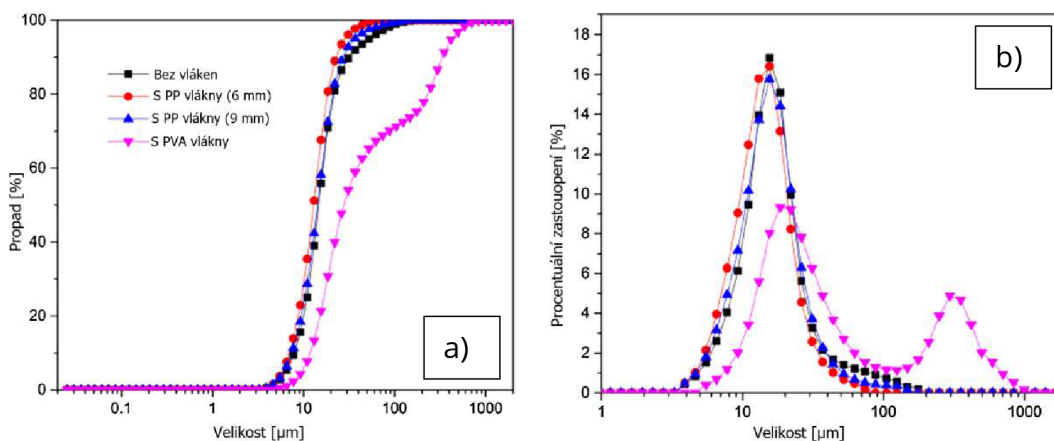
Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Nicméně podrobné srovnání jednotlivých vrcholů kolem úhlu $29,5^\circ$ ukazuje mírné zvýšení peaku po přidání vláken. Navíc zachytili postupný posun směrem k vyšším úhlům u prvku s PP vlákny délky 9 mm a PVA vlákny délky 6 mm. Naopak posun k nižšímu úhlu u PP vláken délky 6 mm. Tato skutečnost je znázorněna na obrázku č. 4 [15]

Tyto posuny značí možný rozdíl velikosti krystalů kalcitu. Byly proto provedeny měření velikostí částic, které ukázaly zajímavé výsledky. Graf č. 1a) ukazuje kumulovaný procentní průchod částic syntetizovaných ve vzorku s a bez vláken. Ukazuje se, že křivky vzorku s vláknem PP1, PP2 a bez vlákna jsou vzájemně podobné a křivka vzorků s vláknem PVA ilustruje dvě strmější části v rozsahu 10–100 nm a 100–1000 nm. Distribuci velikosti vláken ukazuje graf č. 1b). Velikosti částic u vzorků s PP1 (6 mm) a vzorků PP2 (9 mm) stejně jako u referenčních, byly v rozmezí od 4 do 200 μm . Největší zastoupení poté bylo u částic velikosti 15,55 μm . [15]

Na křivce znázorňující velikost krystalů vzniklých u vzorku s PVA vlákny jsou dominantní dva vrcholy. Odpovídají velikostem částice 18,5 a 296 μm . v porovnání s ostatními křivkami bylo zastoupení nižší u vzorků do 22 μm a větší u rozměrů 22–1000 μm . To ukazuje, že u prvků s PVA vlákny vznikají částice kalcitu větších rozměrů. Můžeme tedy konstatovat, že rozdíl materiálu vlákna neovlivní druh vznikajících novotvarů, ale ovlivní výslednou velikost jejich částic. [15]

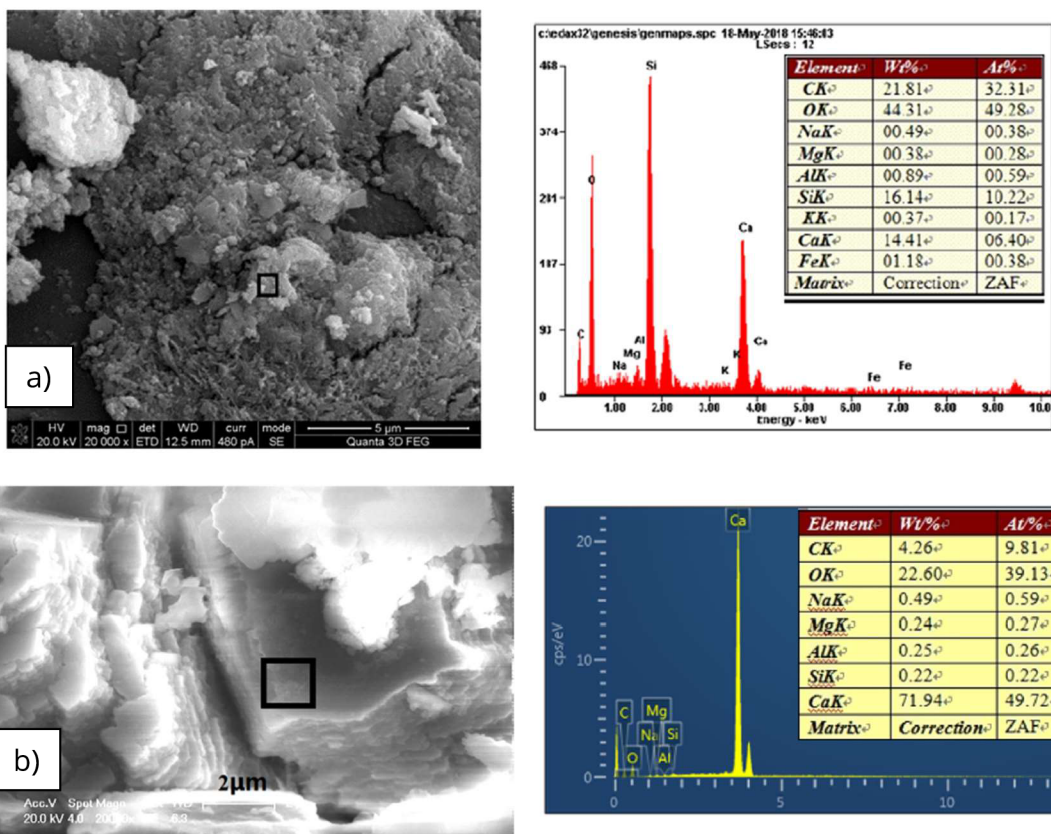
Graf 1: Znázornění a) procentuální propad částic vysrážených u jednotlivých vzorků a b) procentuální zastoupení velikosti jednotlivých částic u testovaných vzorků

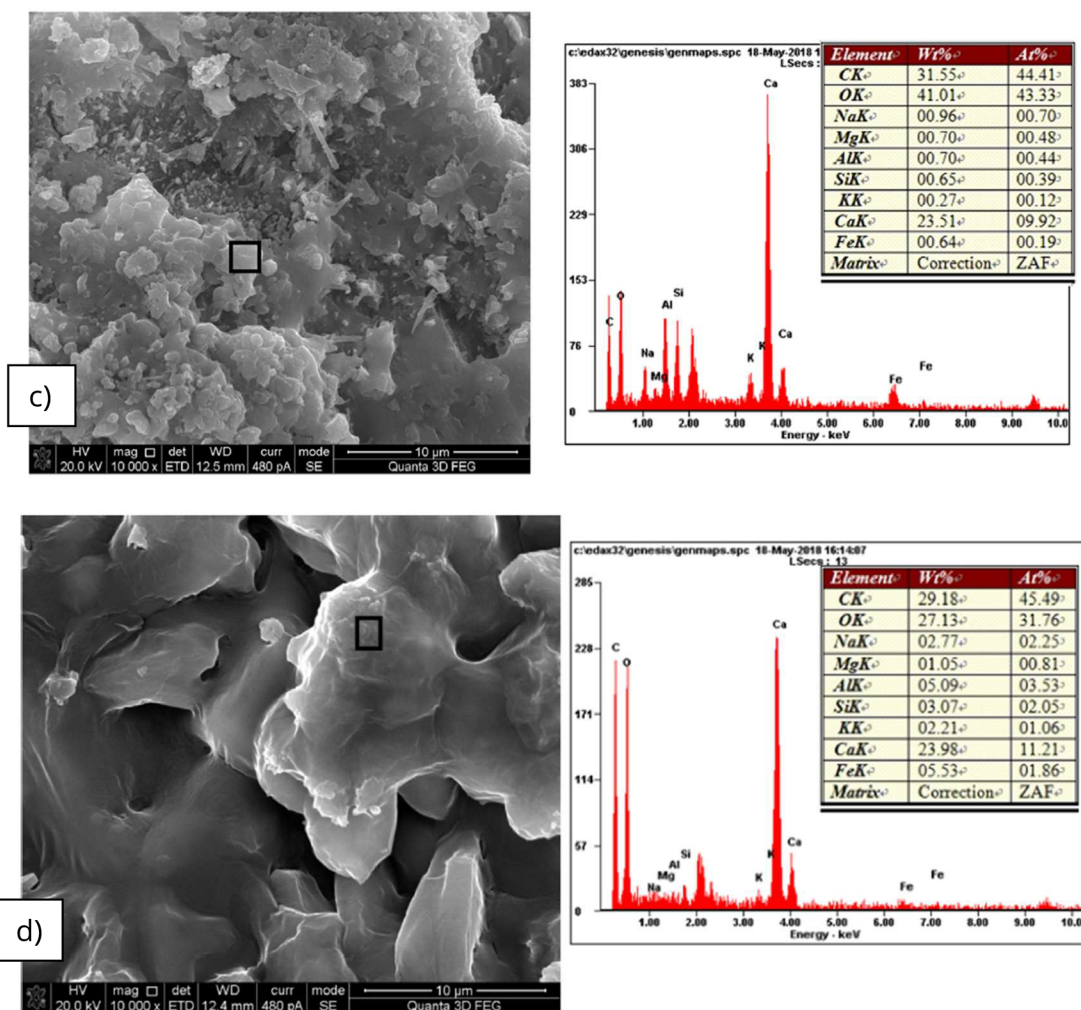


Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Dále byly zkoumány útvary zacelující trhlinu při samohojení. Pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu byly pořízeny snímky novotvarů a jejich chemické složení bylo určeno pomocí metody EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy). Energiově disperzní spektroskopie je analytická metoda, díky které jsme schopni určit chemické složení prvku. Princip spočívá v detekci charakteristického rentgenového záření vyvolaného dopadajícími svazky elektronů. EDS detektory bývají často zabudovány přímo v konstrukci SEM. Byly pořízeny mikroskopové snímky vzorku referenčního, vzorku pouze s bakteriemi, a poté s bakteriemi a s PP a PVA vlákny. [15] [16]

Obrázek 5: Snímky ze SEM a výsledky EDS analýzy pro a) referenční vzorek b) vzorek s bakteriemi c) bakteriemi a PP vlákny a d) s bakteriemi a PVA vlákny





Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete.

Vysrážené minerály vyplňující trhlinu u referenčního vzorku (obr. 5a)) měly dle mikroskopického snímku lamelární strukturu a krystaly o velikosti kolem 1 μm byly přichyceny k povrchům cementové matrice. Dle výsledku EDS analýzy jsou novotvary tvořeny především uhlíkem (C), křemíkem (Si), kyslíkem (O) a vápníkem (Ca). Z toho můžeme usuzovat, že se jedná o uhličitan vápenatý (CaCO_3) nebo C-S-H gel. [15]

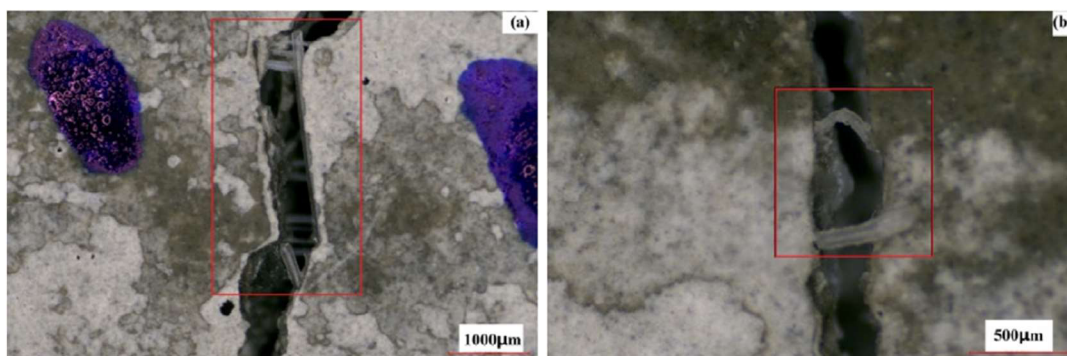
Jak je zachyceno na obrázku č. 5b) u vzorku s bakteriemi, je vysrážený produkt ve formě uhličitanu vápenatého o částicích velikosti kolem 10 μm . Jsou uspořádány do kubické struktury s výraznými schodky a vrstvami. U vzorku s PP vlákny délky 6 mm (obr 5c)) byly vysrážené produkty podobné těm u referenčních prvků. Byly ale více nahuštěny dohromady. Obrázek č. 5d) zachycuje kombinaci bakterií a PVA vláken.

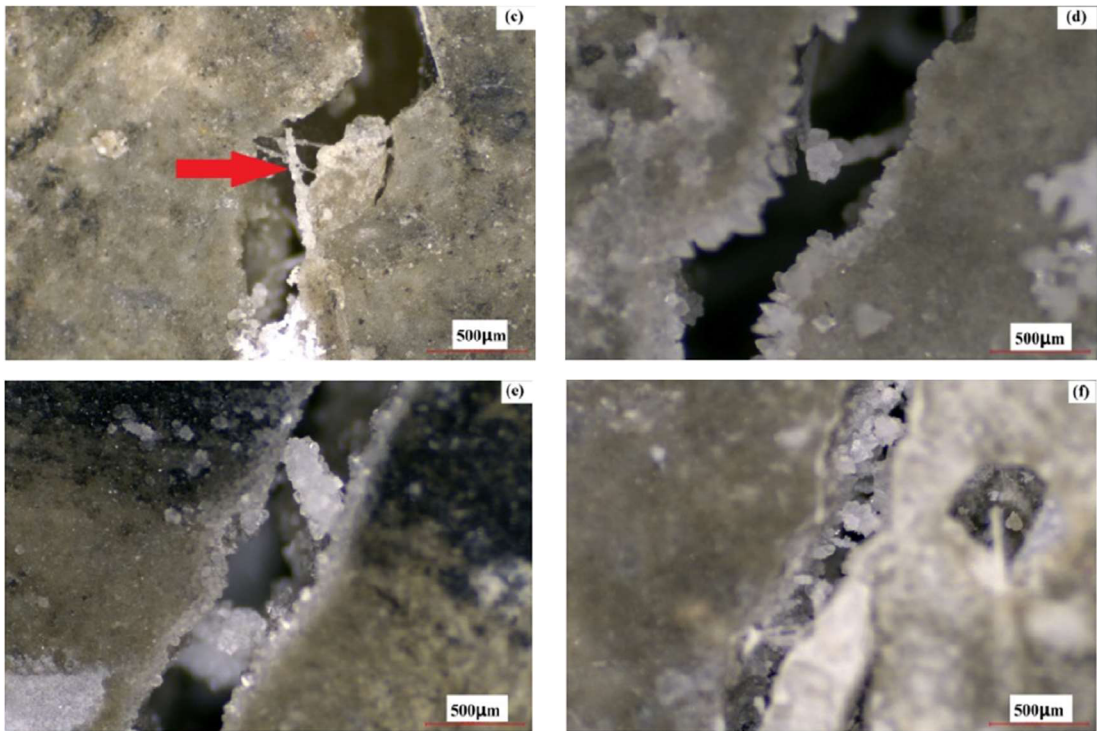
Zde docházelo k depozici novotvarů ve vrstvených a vřetenovitých útvarech. Už na první pohled se jedná o velmi odlišný výsledek od předchozích prvků. Dle chemické analýzy se ale útvary také skládají z C, O a Ca. Jedná se tedy také o uhličitan vápenatý, pouze v odlišném tvaru. [15]

Tyto výsledky naznačily, že bakterie mohou indukovat tvorbu těsně hutněného uhličitanu vápenatého s relativně vysokými velikostmi, ale tento účinek nebyl u vzorků obsahujících bakterie a PP vlákno zřejmý. Je ale zajímavé pozorovat že PVA vlákno a bakterie mohou přispět k odlišnému indukčnímu mechanismu srážení uhličitanu vápenatého, odvozeného z rozdílů morfologie srážení. [15]

Obrázek č. 6 ukazuje snímky povrchu prasklin u prvků s vlákny PP a PVA s bakteriemi či bez nich. Můžeme pozorovat, že u vzorku a) s PP vlákny bez bakterií nejsou na povrchu praskliny zřetelné sraženiny. Na rozdíl od prvního vzorku, druhý obrázek b) zachycující prvek s PVA vlákny ukazuje množství bílých sraženin na povrchu praskliny. Zřetelná bílá sraženina byla obecně vidět více u všech prvků, které spolu s vlákny obsahovaly také bakterie. Ty jsou zachyceny na snímcích obr. 6 d/e/f. [15]

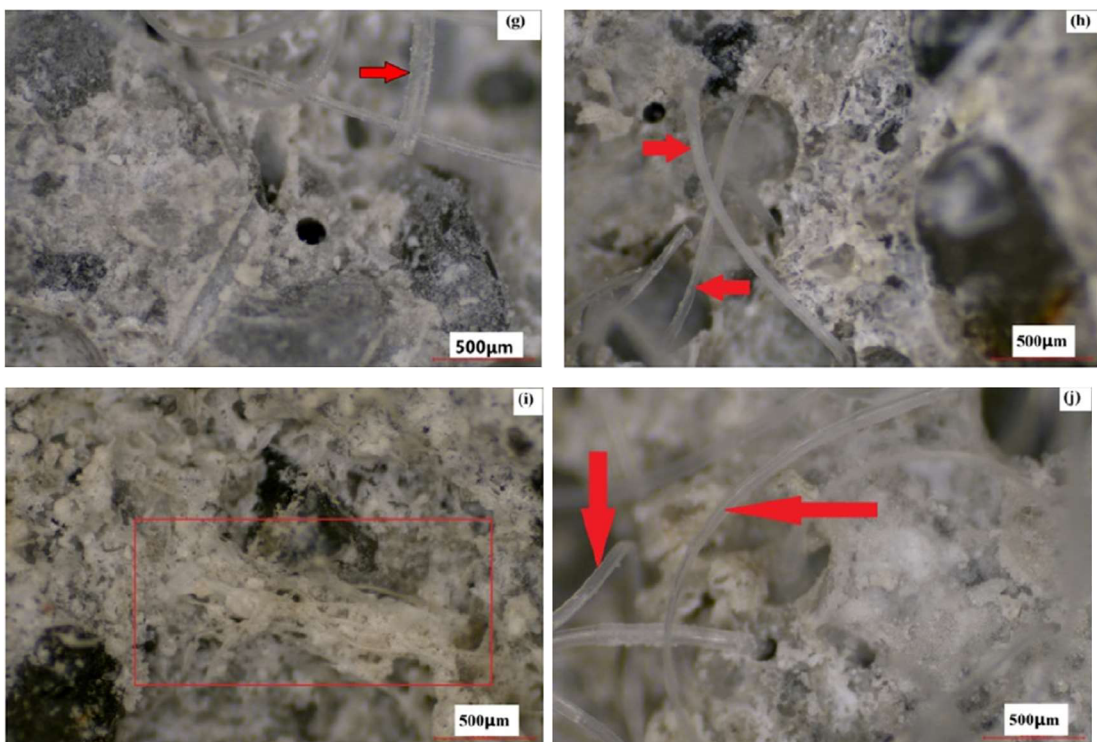
Obrázek 6: Mikroskopický snímek hran prasklin u vzorku a) s PP vlákny délky 6 mm, b) PP vláken délky 9 mm, c) s PVA vlákny, d) s PP vlákny délky 6 mm a bakteriemi, e) s PP vlákny délky 9 mm a bakteriemi a f) s PVA vlákny a bakteriemi. (vlákna jsou označena červenou šipkou nebo obdélníkem)

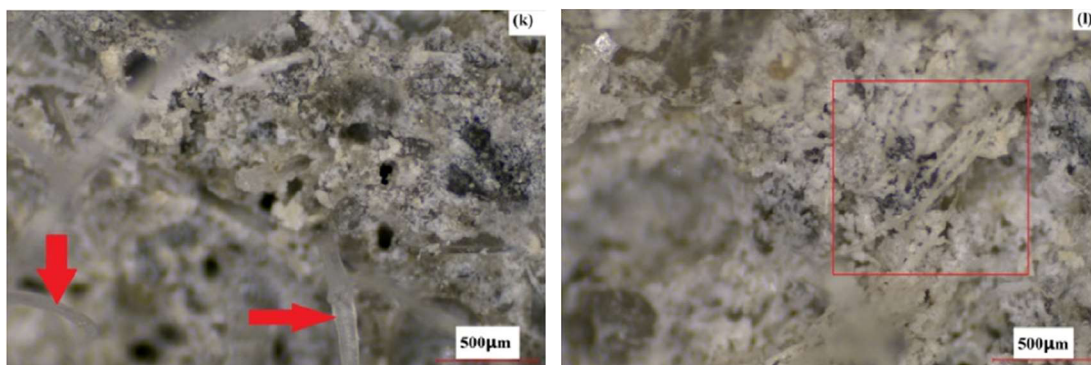




Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete.

Obrázek 7: Mikroskopický snímek vnitřních stěn prasklin u vzorku g) s PP vlákny délky 6 mm, h) PP vláken délky 9 mm, i) s PVA vlákny, j) s PP vlákny délky 6 mm a bakteriemi, k) s PP vlákny délky 9 mm a bakteriemi a l) s PVA vlákny a bakteriemi. (vlákna jsou označena červenou šipkou nebo obdélníkem)

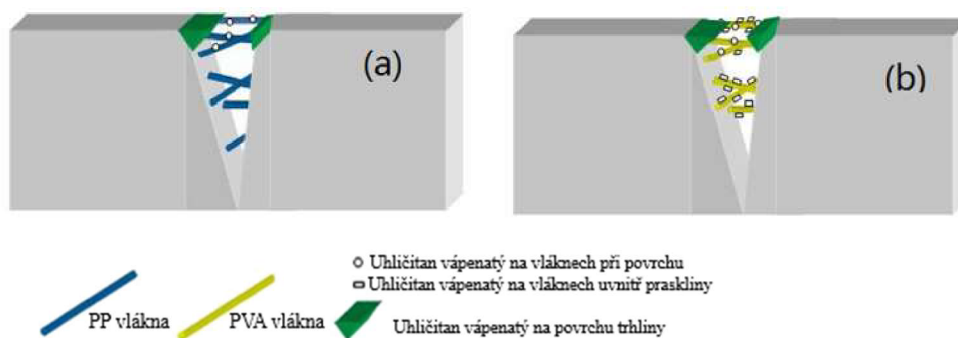




Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete.

Pohled na vnitřní povrch trhliny, a ne pouze na vnější hranu nabízí obrázek č. 7g-l. Zde je vidět největší rozdíl mezi užitím PP a PVA vláken. Povrch uvnitř prasklin není při užití PP vláken téměř vůbec obalen vzniklými novotvory, a to s i bez použití bakterií. Na druhou stranu u vzorků s PVA jsou zřetelné novotvary u vzorku s bakteriemi i bez. Pomocí EDS bylo ověřeno, že i uvnitř prasklin obsahují novotvary převážně C, O a Ca a konstatováno, že uhličitán vápenatý vniká i na vnitřním povrchu. Schéma vlivu PVA vláken v porovnání s PP vlákny je znázorněno na obrázku č. 8.[15]

Obrázek 8: Schéma ukládání kalcitu na vzorcích a) s PP vlákny, b) s PVA vlákny.

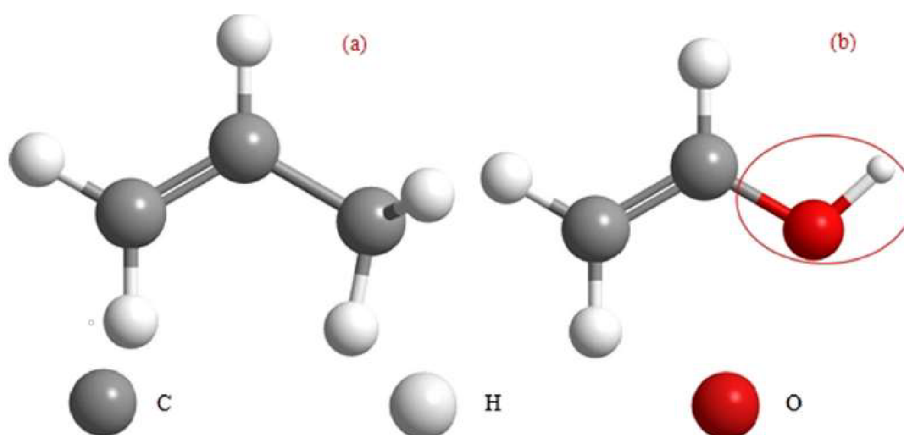


Zdroj: DOKOUPIL T., (2020). *Studium vlastností cementových kompozitů s přidavkem polymerních vláken*. Brno. 87 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Výsledky uvedené výše mohou naznačovat, že užití PVA vláken má lepší schopnost vytváření uhličitanu vápenatého v matrici. Rozdíl mezi schopnostmi PP a PVA vláken zlepšovat samohojení betonu může být převážně způsoben dvěma důvody. Prvním důvodem může být rozdílná molekulární struktura. Obrázek č. 9 ukazuje molekulární strukturu propylenu a vinyl alkoholu. Rozdíl mezi nimi je znázorněn kruhem a jedná

se o skupinu polaritu. V závislosti na elektronegativitě mají síly polaritu tendenci přitahovat elektrony atomem nebo funkční skupinou. Obrázek ukazuje, že PVA má polaritní sílu díky OH radikálu, zatímco PP žádnou takovou přitažlivou sílu nemá. Toto naznačuje, že PVA by mohlo přitahovat ionty CA snadněji a tím lépe rozvíjet formování uhličitanu vápenatého. [15]

Obrázek 9: Molekulární struktura a) propylenu b) vinyl alkoholu



Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete.

Dalším důvodem může být rozdílné rozložení molekul v mřížce. Podobné mezimřížkové vzdálenosti mohou snížit energii potřebnou pro vznik zárodku a přispívají k prioritní orientaci krystalů podél jednoho směru osy mřížky. Proto, na základě analýzy mezimřížkových vzdáleností polypropylenu, polyvinyl alkoholu a uhličitanu vápenatého, je možné odvodit vliv různých vláken na vznik na uhličitanu vápenatého. Tabulka č. 1 ukazuje mezimřížkové vzdálenosti čistého polypropylenu, polyvinyl alkoholu a tří modifikací uhličitanu vápenatého. [15]

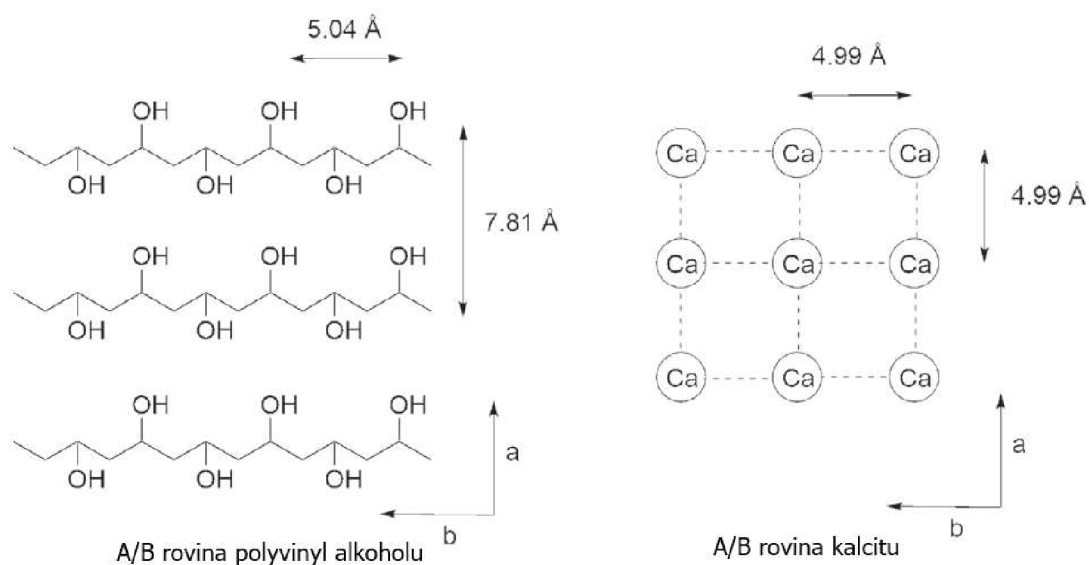
Tabulka 1: Parametry základních buněk polypropylenu, polyvinyl alkoholu, aragonitu, kalcitu a vateritu

Krystal	Parametry základní buňky [Å]		
	a	b	c
Polypropylen	6,65	2,01	6,50
Polyvinyl Alkohol	7,81	5,04	2,52
Aragonit	4,96	7,97	5,74
Kalcit	4,99	4,99	17,06
Vaterit	7,15	7,15	16,92

Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Je zřejmé, že vzdálenosti mřížek polypropylenu se ve všech třech osách výrazně liší jak od kalcitu, tak i vateritu a aragonitu. Na druhou stranu mezimřížková vzdálenost polyvinyl alkoholu v ose B je velmi podobná hodnotě u kalcitu. Proto je možné předpokládat, že kalcit by mohl snadno krystalizovat na A/B rovině polyvinyl alkoholu s orientací primárně na osu B. Podobnost rozložení A/B rovin kalcitu a polyvinyl alkoholu schematicky znázorňuje obrázek č. 10. [15]

Obrázek 10: Schématické znázornění prostorového uspořádání A/B roviny PVA a kalcitu



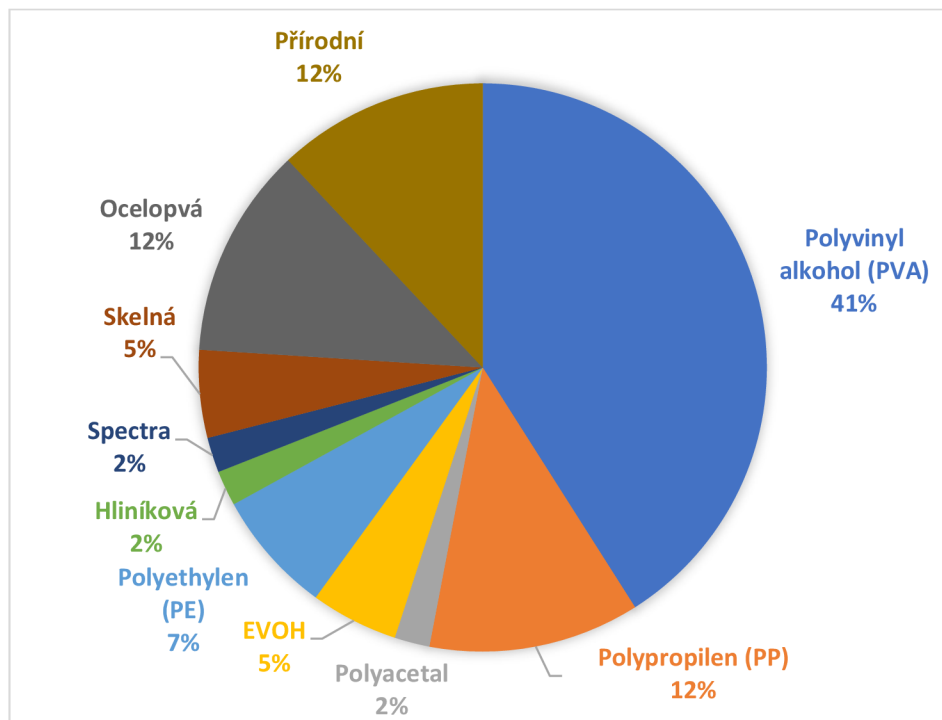
Zdroj: Feng, J., Su, Y., Qian, Ch., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. (přeloženo)

Další zajímavostí v tabulce č. 1 je, že vzdálenosti hydroxylových skupin polyvinyl alkoholu a aragonitu jsou v ploše A/B téměř shodné. Pro vytvoření aragonitu je ale zapotřebí velké množství magnesiových iontů nebo speciálních proteinů, které se v matici běžně nevyskytují. To brání vzniku aragonitu a vzniká pouze kalcit. [15]

Předchozí poznatky se dají jednoduše shrnout s výsledkem, že druh materiálu vláken neovlivní, jaké sraženiny při samohojení vznikají. Ovlivní ale velikost jejich částic, jejich uspořádání a také zda se sraženiny tvoří pouze na povrchu praskliny nebo i uvnitř. Z toho vyplývá, že dle publikace vydané Fengem a spol. jsou PVA vlákna vhodnější pro užití v samohojivém vláknobetonu.

Tomu, že PVA vlákna jsou pro samohojivý beton zajímavější odpovídá i graf, který vytvořili ve své práci Cuenca a Ferrara. Graf č. 2 ukazuje, jakými vlákny se autoři v posledních letech zabývali v závislosti se samohojením. S velkým nárůstem vede právě PVA. Těmito vlákny se zabývalo celých 41 % provedených publikací od roku 1998. [5]

Graf 2: Zastoupení materiálů vláken zkoumaných v publikacích od roku 1998



Zdroj: CUENCA E., FERRARA L., (2017). *Self-healing Capacity of Fiber Reinforced Cementitious Composites. State of the Art and Perspectives.* (přeloženo)

2. VLIV BAKTERIÍ

V úvodu byly zmíněny některé návrhy úpravy záměsí pro zlepšení samohojení betonu. Mimo postupy popisované v této práci bylo v řadě pracích zkoumáno několik dalších metod. Pourfallahi a spol. uvádí pět nejčastějších následovně:

- Chemické zapouzdření
- Minerální příměsi
- Chemikálie v trubičkách
- Přirozené samohojení trhlin s řízenou šířkou
- Zapouzdření bakterií

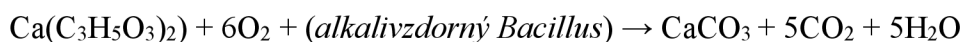
[17]

Výše zmíněné metody mají rozhodné své výhody, ale také řadu nevýhod. Například u zapouzdření chemikálií je obtíž ve výrobě kapslí, jejich rovnoměrná distribuce nebo problém ve vypuštění hojící náplně. U krystalických příměsí, které mohou vyplnit vzniklou trhlinu je zase problém s expanzí příměsí i mimo hojenou zónu a narušení betonu vzniklými tlaky. Co se týče betonu s bakteriemi je potřeba splnit řadu podmínek, správně kultivovat a aplikovat bakterie a poté ověřit, že mikroorganismy přidané pro zlepšení samohojení betonu negativně neovlivní jiné vlastnosti betonu. I přesto je ale samohojení betonu za pomoci bakterií jedním z nejzajímavějších způsobů, jak tuto problematiku řešit. [17]

Samohojení s pomocí bakterií je vybíráno také pro jeho ekologičnost v porovnání s ostatními způsoby závislými například na chemikáliích. Nebylo tomu tak ale z počátku. Ve Wangově studii byly použity močovinné bakterie, které byly schopny zacelit trhlinu až o šířce 970 μm . Vodonepropustnost takto opravených vzorků se navíc zvýšila desetinásobně. Naneštěstí proces rozkladu močoviny produkoval amoniak, který se ve formě plynu uvolňoval do prostředí budovy. To nebylo ze zdravotního hlediska přípustné. [18]

Dalším krokem tedy bylo využívání mikroorganismů, které rozkládají organickou hmotu a uvolňují uhlík, který poté tvoří uhličitán. Pro efektivní využití tohoto jevu se do betonu přidávají příměsi jako například glukóza, nebo v posledních letech oblíbený laktát vápenatý. [18]

Chemická reakce odpovědná za samohojení bakteriálního betonu může být popsána zjednodušenou rovnicí, kterou popsal Jonkers a kol. v roce 2010. Říká, že bakterie metabolicky přemění jeden mol laktátu vápenatého ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) na jeden mol uhličitanu vápenatého. Rovnice je popsána níže. [19]



Pro použití v betonu se používají speciální druhy bakterií, které zvládají pobyt ve vysoce alkalickém prostředí, jakým je beton. Bakterie zůstávají v nečinném stavu, dokud nedojde k rozvoji trhliny a bakterie nejsou vystaveny vzdušné vlhkosti. Poté se stanou aktivní a jakmile začnou pracovat pro provedení reakce spotřebují velké množství kyslíku z betonu. To je dalším přínosem užití bakterií. Kyslík hraje důležitou roli v korozi ocelové výztuže a bakterie jeho spotřebou výrazně prodlužují životnost konstrukce. Tento samohojivý proces je schopný zacelit trhliny menších rozpětí v řádu dní. [17]

Bakterie do betonu se přidávají dvěma způsoby. Ty jsou označovány jako přímá a nepřímá metoda. V rámci přímé metody je roztok s bakteriemi přidán přímo do záměsi. Nepřímá metoda počítá se zapouzdřením či jiným ochráněním bakterií před jejich aktivací. Dle některých publikací totiž dochází k usmrcení bakterií vzniklými krystalickými tlaky při tvrdnutí betonu. Byly proto zkoumány cesty, jak toto nebezpečí omezit. V této chvíli je však většina prací zaměřená na přímou metodu, protože nebyla nalezena uspokojivá cesta, jak bakterie dokonale ochránit bez negativního ovlivnění jiných mechanických vlastností betonu. [19]

2.1 Nejčastěji používané bakterie

V množství prací, které se v posledních dvou dekadách objevily, převažují čtyři nejčastěji používané typy bakterií. Následující kapitola je ve zkratce představí a uvede, jak ovlivnily mechanické vlastnosti betonu. Všechny 4 totiž pozitivně ovlivňují srážení uhličitanu vápenatého, ale nebylo jasné, jak ovlivní další z důležitých vlastností betonu, ještě před jeho porušením trhlinou.

2.1.1 *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis se dá snadno klasifikovat jako široká skupina bakterií pro jejich rozsáhlou škálu tvarů a pohybů. Jsou přizpůsobené drsným environmentálním podmínkám. Často se vyskytují v zemině či trávicím traktu lidí i savců obecně. Bakteriím trvá růst kolem 3–4 dní při optimální teplotě 25–35 °C. [19]

Přímá metoda:

Durga a spol. ve své publikaci z roku 2019 zkoušeli použití těchto bakterií přímou metodou. Při míchání betonu přidali roztok s koncentrací 10^8 buněk/ml do záměsi s vodním součinitelem 0,41. Výsledky ukázaly, že po 28 dnech zraní se zvýšila pevnost v tlaku, příčném tahu i tahu za ohybu o 22 %, 16 % a 11 % v odpovídajícím pořadí. [20]

Obdobných výsledků dosáhl Nain a spol. roku 2019. U vzorků nahradili 100 ml vody za 100 ml bakteriálního roztoku. Pevnost v tlaku byla po 28 dnech zvýšena o 14,3 % a pevnost v příčném tahu o 25,3 %. [21]

Nepřímá metoda:

Na základě řady výzkumů je navržena řada způsobů, jak bakterie zapouzdřit a ochránit. Jednu z možností přinesli Khaliq a Ehsan (2016). Ti připravili čtyři různé mixy. Mimo referenční vzorek a vzorek s přímo přidanými bakteriemi použili v dalším vzorku LWA (light-weight aggregates) a do čtvrtého přidali GNP (Graphite Nanoplatelets). Tyto dvě lehké příměsi byly přidány jako ochranné jádro. Mimo tyto příměsi byl přidán také laktát vápenatý pro podporu samohojení a množství bakterií bylo použito v koncentraci $2,8 \cdot 10^8$ buněk/ml. Použití ochrany buněk bakterií vedlo ke zvýšení pevnosti v tlaku o 12 % při přidání lehkých agregátů a o 9,8 % při užití uhlíkových nanočástic. Dle autorů studie, ale došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku také u vzorku s nepřímo přidanými bakteriemi. Proto u tohoto druhu bakterií konstatovali, že přidavek drahých příměsí neměl efektivní účinek. [22]

2.1.2 Bacillus sphaericus

Bacillus sphaericus jsou grampozitivní, mezofilní, tyčinkovité bakterie běžně se vyskytující v půdě. Vykazují schopnost odolávat vysokým teplotám, chemikáliím a UV záření a mohou zůstat životaschopné dlouhou dobu. [19]

Přímá metoda:

Reddy a spol. zkoušeli přidat do stejné záměsi různé koncentrace bakteriálního roztoku. Do záměsi s vodním součinitelem 0,52 přidali roztoky o koncentraci 10^0 , 10^3 , 10^5 a 10^7 buněk/ml. Pevnost v tlaku po 28 dnech v odpovídajícím pořadí byla 28 MPa, 33 MPa, 36 MPa a 32 MPa. Pevnost v příčném tahu byla obdobně 3,7 MPa, 3,9 MPa, 5,2 MPa a 4,5 MPa. Nakonec zkoušená pevnost v tahu za ohybu vyšla 3,8 MPa, 4,1 MPa, 4,5 MPa, 4,3 MPa. Z dosažených výsledků jednoznačně vyplynulo, že největší efektivity zlepšení vlastností bylo dosaženo při užití bakteriálního roztoku o koncentraci 10^5 buněk/ml. [23]

Tyto hodnoty s obdobným výsledkem potvrzuje práce z roku 2012, kterou napsali Gavimath a spol. Po přidavku těchto bakterií došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku o 30,76 %, 46,15 %, a 32,21 % po 3,7 a 28 dnech zrání v porovnání s referenčním vzorkem. Pevnost v příčném tahu byla také zvýšena a to o 13,75 %, 14,28 % a 18,35 % po 3, 7 a 28 dnech v odpovídajícím pořadí. [24]

Nepřímá metoda:

Zapouzdření do melaninových kapslí velikosti asi 5 μm testoval Wang, Soens a kol. Výsledný roztok se skládá z kapslí a vody s bakteriální koncentrací 10^9 buněk/g kapslí. Reakce užitá v této práci byl ureolitický rozklad dusičnanu vápenatého. Takto aplikované kapsle s bakteriemi ukázaly zacelení trhliny až do šířky 970 μm . Referenční vzorky bez bakterií prokázaly zacelení trhliny šířky do 250 μm . Navíc se nepropustnost bakteriálního betonu zvýšila desetinásobně. [25]

2.1.3 Bacillus pasteurii

Jedná se bakterii přenášenou v půdě. Je nepatogenní a netoxická. Je schopná vysrážet kalcit a zpevnit dané zdroje vápníku. Jedná se o nejčastěji používaný druh bakterie do konstrukčních materiálů. [19]

Nejefektivnější koncentrace bakteriálního roztoku byla dle Chahala a spol. 10^5 buněk/ml roztoku. Ti ve své práci z roku 2012 testovali různé koncentrace bakteriálního roztoku s několika cementovými matricemi doplněnými o popílek v rozdílném množství. Nejvyšších hodnot dosáhli právě s koncentrací 10^5 buněk/ml roztoku. Pevnost v tlaku byla v porovnání s referenčním vzorkem zvýšena až o 22 %. Vodonepropustnost byla na shodném vzorku zvýšena asi čtyřnásobně. [26]

Zvýšení pevnosti v tlaku, příčném tahu i tahu za ohybu o 10,8 %, 29,37 % a 5,1 % v odpovídajícím pořadí potvrdili také Jagannathan a spol v práci z roku 2018. Použili záměs s vodním součinitelem 0,46 a popílkem v množství 10,20 a 30 % z hmotnosti cementu. U všech tří druhů kompozitu dosáhli obdobných pozitivních výsledků. [27]

3.1.4 Bacillus megaterium

Bacillus megaterium je tyčinkovitá grampozitivní bakterie. Jedná se o aerobní bakterii vytvářející spóry, která se nachází ve velmi rozmanitých prostředích. Buňky často tvoří páry či řetězce, kde jsou buňky spojeny dohromady polysacharidy na buněčných stěnách. *Bacillus megaterium* se množí při teplotách od 3 °C do 45 °C, s ideální teplotou kolem 30 °C. Bylo pozorováno, že několik exemplářů z antarktického geotermálního jezera se množilo při teplotách až 63 °C. [19]

Vliv této bakterie testoval například Nagarajan a kol. Obdobně jako u předchozích autorů testovali ideální bakteriální koncentraci pro tento druh bakterie a jak ovlivní mechanické vlastnosti betonu. Do záměsi přidali bakteriální koncentrace 10^0 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 buněk /ml roztoku. Pevnost v tlaku, příčném tahu a tahu za ohybu byla sledována po 7 a 28 dnech. Nejvyšších výsledků dosáhli stejně jako u zbylých bakterií s roztokem o koncentraci 10^5 buněk/ml. [28]

Pro *Bacillus pasteurii* a *megaterium* nebyla zpracována žádná průkazná práce zabývající se přidáním těchto bakterií nepřímou metodou. Můžeme ale usuzovat, že pokud zapouzdření např. do melaninových kapslí fungovalo u užití *Bacillus Sphaericus* bude mít možný pozitivní efekt i u těchto odrůd bakterií.

2.2 Součinnost bakterií s vlákny

Tím, jak se změnila mechanická vlastnosti betonu s přidáním bakterií samotných, se zabývala velká řada studií. Pouze omezená řada jich však řešila spolupůsobení vláken a bakterií na tyto vlastnosti. Některé účinky byly již zmíněny v kapitole 1: Vliv vláken. Tyto informace budou nyní doplněny o několik dalších poznatků získaných z výzkumů, které provedli Su a kol. roku 2021 [18].

Samohojení na povrchu trhlin.

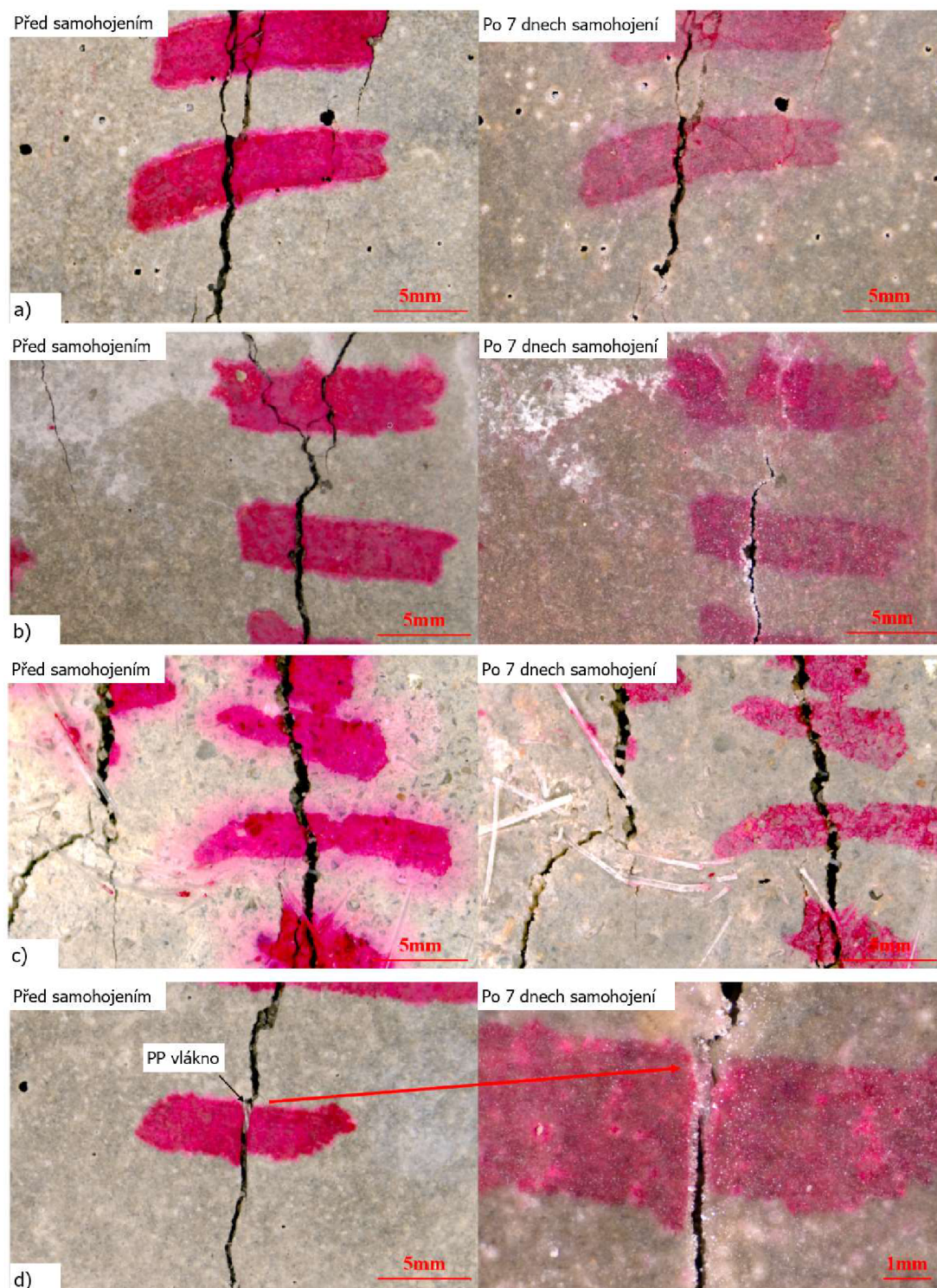
Nejprve byl pozorován samohojící efekt v raných stádiích po vzniku trhliny. Obrázek č. 11 znázorňuje prvky před porušením a po 7 dnech samohojení. U referenčního vzorku se trhliny se šíří do 200 μm výrazně zúžily, ale u trhlin se šířkou nad 400 μm nedošlo téměř k žádnému hojivému efektu. Tyto výsledky jen potvrzují již několikrát zmiňovaný fakt, že samohojení běžného neupraveného betonu je velmi limitované. Barva vzniklé sraženiny u referenčního vzorku téměř odpovídá barvě okolního vzorku, takže už z toho můžeme usuzovat, že nové krystaly odpovídaly dodatečné hydrataci ještě nezhydratovaného cementu. [18]

U vzorku s bakteriemi byly trhliny do 200 μm téměř zcela zahojeny a u trhlin do 400 μm byla trhlina zmenšena o 40 %. Vzorky s přidanými PP vlákny bez bakterií, ale neukázaly téměř žádné hojení. Na druhou stranu vzorky s bakteriemi a PP vlákny ukázaly velmi dobrý hojící efekt, na povrchu vznikla řada bílých krystalů a množství uhličitanu vápenatého bylo objeveno také na povrchu vláken uvnitř trhliny. [18]

Graf č. 3 poté ukazuje rychlost opravy plochy trhliny v procentech pro všechny čtyři výše zmíněné vzorky. Proces samohojení je pozorován po dobu 28 dní. Pro trhliny šířky 400-500 μm došlo k zacelení trhlin z 20 % po dobu 7 dní, kterou následoval lehký nárůst až na 40 % zacelené plochy po 28 dnech. Zacelení trhlin ve vzorcích s PP vlákny bez bakterií ukázalo horší výsledky než referenční vzorek s pouhými 17 % zacelené plochy po 7 dnech. Poté následoval nárůst na 38 % po 28 dnech, což je o něco více než výsledky na referenčních prvcích. Výrazně lepších výsledků bylo dosaženo u vzorků s bakteriemi. U vzorků pouze s bakteriemi došlo k zacelení až 44 % plochy praskliny po 7 dnech a postupným nárůstem až na 94 % po 28 dnech. Nejlepšího efektu

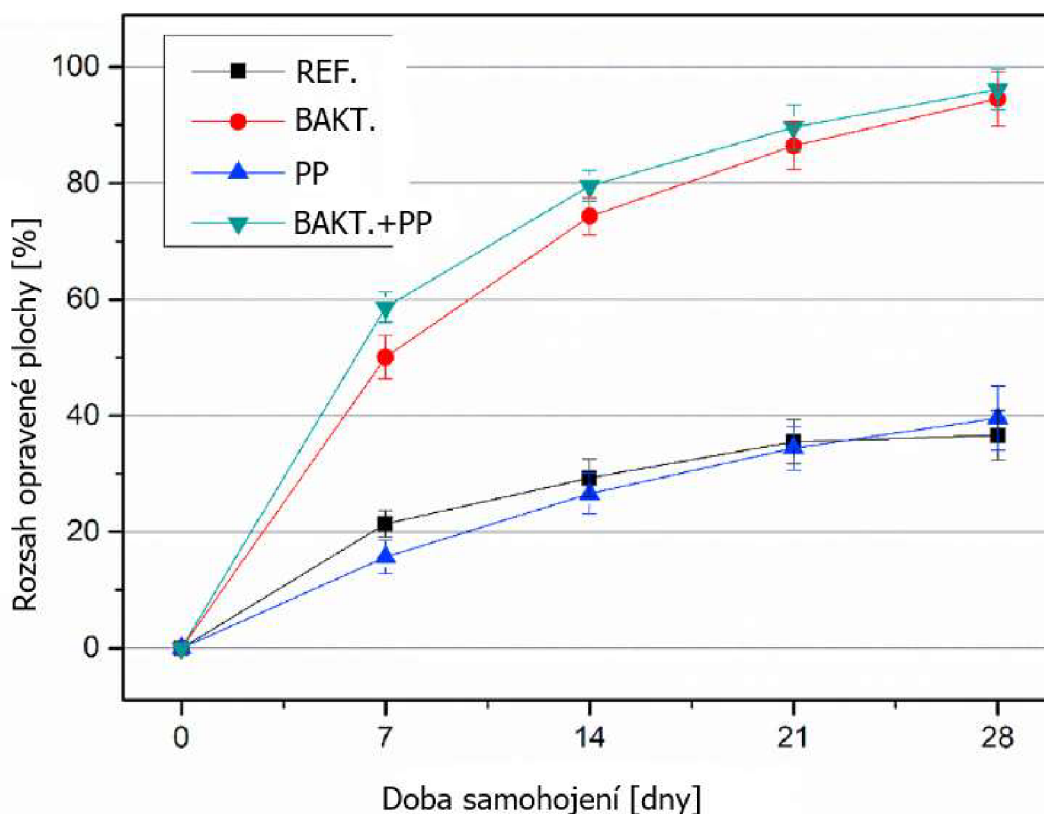
dosáhly vzorky s bakteriemi i PP vlákny. U těch bylo dosaženo zacelení 58 % plochy trhliny po 7 dnech a až 96 % plochy po 28 dnech hojení. [18]

Obrázek 11: Povrch vzorků po 7 dnech samohojení na a) referenční vzorek, b) vzorek s bakteriemi, c) s PP vlákny a d) s PP vlákny a bakteriemi



Zdroj: SU Y., QIAN CH., RUI Y., FENG., (2021). *Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)*. (přeloženo)

Graf 3: Závislost opravené plochy praskliny na čase samohojení

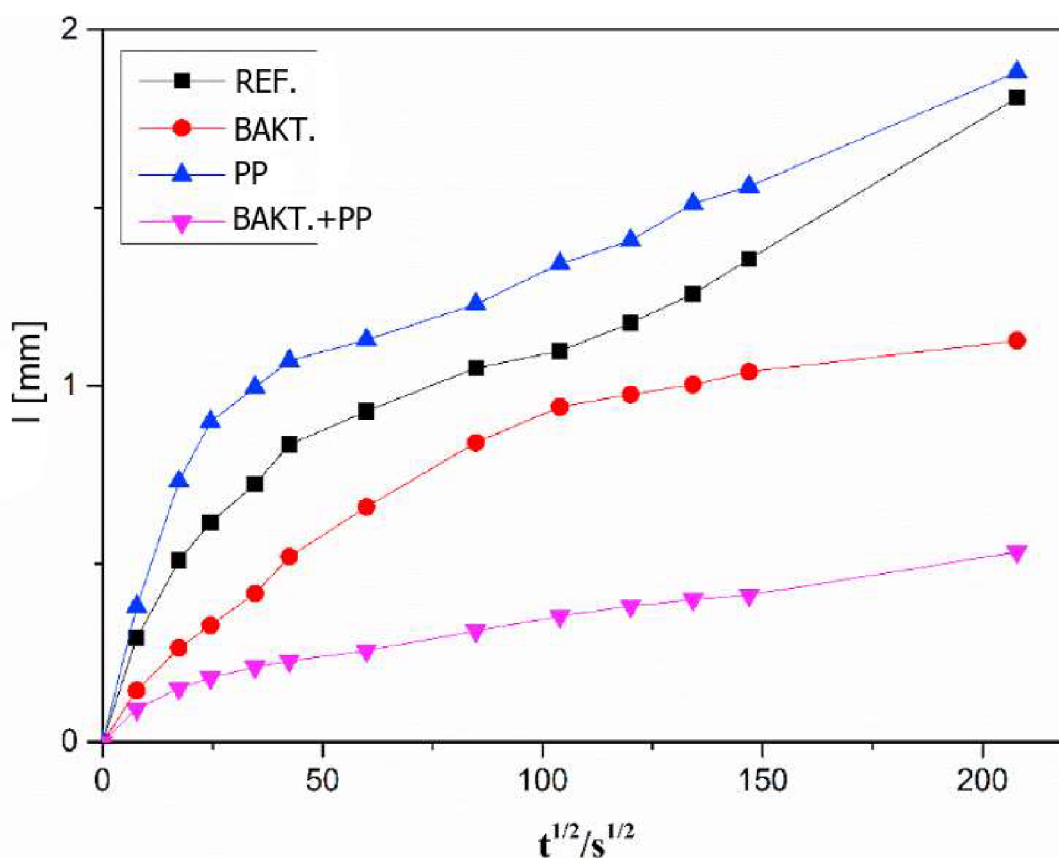


Zdroj: SU Y., QIAN CH., RUI Y., FENG., (2021). *Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)*. (přeloženo)

Snížení nasákavosti díky samohojení

Rozvoj trhliny výrazně zvýší absorpci vody a vznik nových krystalů během samohojení může velmi výrazně omezit nasákavost. Graf č. 4 ukazuje výsledky testů kapilární absorpce provedených po 28 dnech samohojení. Z grafu je zjevné, že největší nasákavost měli vzorky s PP vlákny, druhý v pořadí byl referenční vzorek. Lepších výsledků dosáhl vzorek s bakteriemi a nejlepších vzorek s bakteriemi a vlákny. Je zajímavé, že i po samohojení nejhorších výsledků dosáhl vzorek s vlákny. Může to mít příčinu v přidavku vláken, které zvětšili tranzitní zónu, a vnesly větší množství pórů. Vzorky s bakteriemi dle očekávání měli nejmenší nasákavost, protože vysrážené krystaly uhličitanu vápenatého zaplnily póry a zamezili absorpci vody. Vzorky s bakteriemi a vlákny zamezily absorpci vody až o 50 %. [18]

Graf 4: Výsledky zkoušky kapilární absorpce

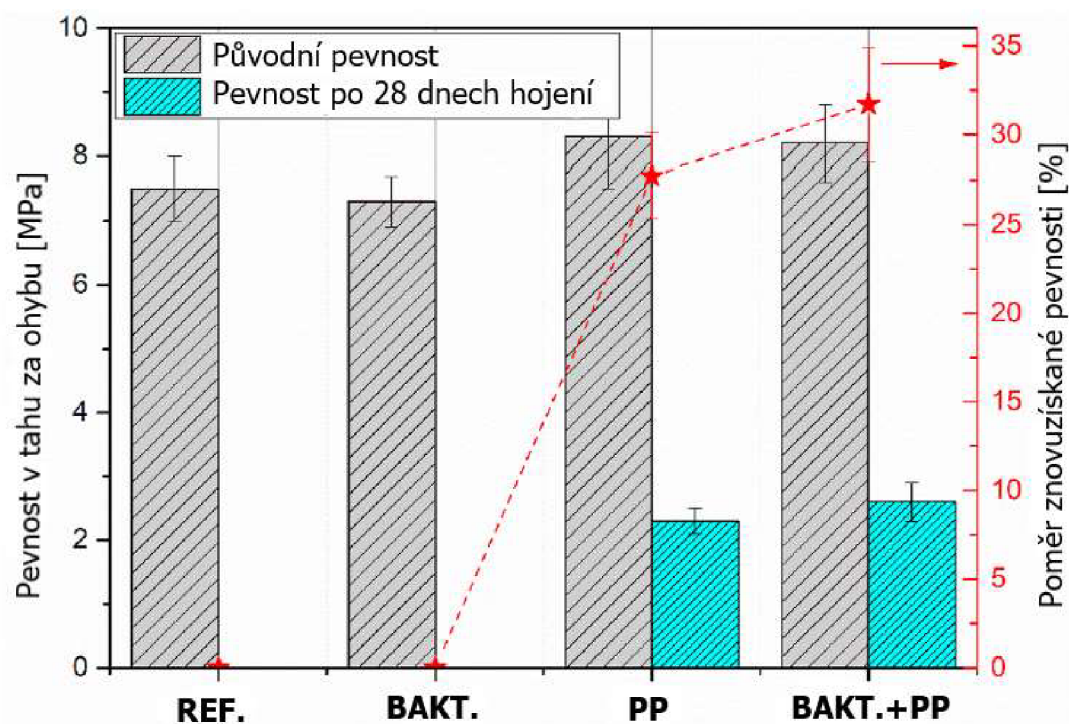


Zdroj: SU Y., QIAN CH., RUI Y., FENG., (2021). *Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)*. (přeloženo)

Vliv samohojení na znovuzískání pevnosti v tahu

Dále byla pozorována pevnost v tahu za ohybu původní a poté znovu získaná samohojením po porušení. Z grafu č. 5 vidíme, že přidavek samotných bakterií snížil pevnost betonu v tahu za ohybu. Naopak přidavek vláken u obou vzorků dle očekávání tuto pevnost zvýšil. Při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu po procesu samohojení určitou zbytkovou pevnost vykazaly pouze vzorky s vlákny a s vlákny a bakteriemi. Tento výsledek není překvapující, bylo očekáváno, že vlákna překlenující trhliny zajistí určitou zbytkovou pevnost. Je ale zajímavé, že u vzorku s bakteriemi a vlákny bylo dosaženo pevnosti vyšší. Po samohojení bylo dosaženo asi 32 % předchozí pevnosti. Je to o 4 % více než u vzorku bez bakterií. Dá se předpokládat, že bakterie podpořili vznik nových krystalů, které posílily tranzitní zónu mezi vlákny a matricí. [18]

Graf 5: Pevnost v tahu za ohybu původní a znovuzískaná po 28 dnech samohojení



Zdroj: SU Y., QIAN CH., RUI Y., FENG., (2021). *Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)*. (přeloženo)

3. DOPLŇKOVÉ PŘÍPRAVKY

V předchozích kapitolách byly představeny vlivy polymerních vláken, bakterií a jejich kombinace na samohojení. Ve většině případů je ale receptura takto navrženého betonu doplněna o určité přísady, které tyto efekty na samohojení podporují nebo dále doplňují. Mezi jeden z nejběžnějších doplňků je laktát vápenatý s v poslední době zmiňovaný superabsorpční polymer.

3.1 Superabsorpční polymery

Na míru vyrobené přísady jako například krystalizační přísady nebo superabsorpční polymery (SAP) začaly být používány ve větší míře pro zefektivnění samohojení. [5] Superabsorpční polymery lze popsat jako uspořádané hydrogelové sítě. SAP mají schopnost absorbovat vodu o hmotnosti až stokrát vyšší, než je jejich vlastní. Vděčí za to vysokému osmotickému tlaku způsobenému akumulací zachycených iontů ve struktuře SAPu. Absorbovaná voda způsobí nabobtnání systému, čímž dojde k vzájemnému oddálení iontů, což má za následek snížení osmotického tlaku. [29]

Absorpční kapacitu systému však omezuje nejen snížení osmotického tlaku v důsledku absorpce vody, ale také vliv vnějších tlaků vyplývajících ze změny objemu SAPu a zásaditost prostředí, ve kterém absorpce probíhá. V případě ztráty rovnováhy mezi osmotickým tlakem v systému nasyceného vodou, silami působícími uvnitř betonu a vlivem kapilárních sil v porézním médiu je SAP schopen opět zmenšit svůj objem. Během toho dochází k desorpci pojaté vody. V betonářské praxi se tento efekt využívá pro vnitřní ošetřování. [29]

SAP jako součást betonové směsi je obtížné klasifikovat kvůli nestandardním parametrům, které charakterizují jeho roli v betonové směsi. Podle kvantitativního kritéria může být SAP zařazen do skupiny přísad do betonu podle normy EN 206, protože jeho dávkování je obvykle 0,3–0,6 % z hmotnosti pojiva [30]. Například pokud ale zvolíme množství SAPu v betonu na 0,2 % z hmotnosti cementu, ale před přidáním do betonu ho rozmícháme v části záměsové vody zvětší se objemové množství nabobtnaného SAPu asi na stonásobek. Nasákavost SAPu ve vodě je totiž kolem 100 g vody na 1 g polymeru. Pokud je tedy SAP přidáván do betonu již

nasáknutý vodou může se dle dávkování zařadit mezi příměs. I tato nasákavost je ale relativní při užití v betonu. Pokud se SAP přidá do betonu v suchém stavu spolu s dalšími suchými částmi, bude nasákavost záměsové vody asi 10krát nižší. Je to následek různého absorpční potenciálu v závislosti na zásaditosti prostředí. Při absorpci vody v cementové matici se udává hodnota asi 8-30 g / g SAPu. [31] Užití SAPu v betonové směsi tak absorpcí ovlivní část záměsové vody. Tím následné množství polymeru výrazně překročí hmotnost a objem původně přidaného SAPu. Toto dále komplikuje způsob, jakým absorpční polymery můžeme klasifikovat. [29]

Role SAPu v betonu je také důležitá. Nemění vlastnosti jednotlivých složek betonové směsi, ale zlepšuje vlastnosti celkového betonového kompozitu vnitřním samoošetřováním. V důsledku přidání SAP do betonové směsi se vytvoří další gelová fáze ve formě SAPu nasyceného vodou, což ovlivní rozdělení fáze pórů po desorpci vody. [32]

Publikovaný výzkum na téma absorpčních polymerů v technologii betonu se zaměřuje především na posouzení vlivu různých typů SAPu na mechanické vlastnosti a trvanlivost betonových kompozitů, popřípadě na vlastnosti čerstvé směsi betonu. V literatuře pojednává většina studií o přidání nenasyčeného SAPu k dalším suchým složkám betonové směsi. Poměrně málo výzkumů je věnováno technologii výroby betonových směsí s přídavkem SAPu v již připraveném roztoku v části záměsové vody. [31]

Většina výsledků publikací se shoduje na významném snížení smršťovacích deformací se zvýšením množství směšovací vody absorbované systémem SAP. V některých případech je možné dosáhnout až téměř 100% zamezení smrštění. Je také možné najít příklady snížení smrštění přesahující 100 %, kdy dochází až k bobtnání materiálu. To je ale hlavně případ betonů s velmi nízkým vodním součinitelem. [33]

I přesto, že použití SAP jako samoošetřovacího činidla je běžně zaměřeno na zlepšení trvanlivosti betonového kompozitu, SAP může mít také vliv na mechanické parametry betonových kompozitů. Jak bylo zmíněno výše, samotný polymer neovlivní vlastnosti jiných složek betonu, ale vzhledem k teoretickému mechanismu aktivace SAPu, zahrnujícímu absorpci záměsové vody z betonové směsi dříve nenasyčeným SAP,

lze očekávat změny v průběhu hydratace nebo změny distribuce pórů v zatvrdlém betonu. [29]

Řada výzkumů uvádí snížení pevnosti v tlaku se zvyšující se dávkou absorpčního polymeru, protože se zvyšuje podíl absorbované vody na celkovém množství záměsové vody (Schrofl a kol., Pourjavadi a kol., Justs a kol., a další). Důvodem tohoto poklesu je nerovnoměrná distribuce SAP v betonové směsi. Je to výsledek běžně používaného způsobu dávkování neaktivovaného SAPu do suchých složek betonové směsi. [31] Díky svým elektrochemickým vlastnostem přispívá SAP k vytvoření kvazipórové sítě poté, co splnil svou roli vnitřního samošetřovacího média. Tyto částečně propojené póry, označované jako defekty, podporují narušení struktury cementové matrice, což vede ke snížení pevnosti betonového kompozitu. [29]

Zmiňované dopady absorpčního polymeru na mechanické vlastnosti vzorků je ale poměrně komplikované řádně charakterizovat. Výsledky jsou totiž vždy porovnávány s referenčním vzorkem bez SAPu. V převážné většině provedených zkoušek je přijata metodika testování známá ze zkoušek jiných druhů samošetřování betonu. Ta spočívá v zavedení dalšího objemu vody do betonové směsi, který odpovídá absorpční kapacitě aplikované hmoty SAPu. Tato skutečnost ovlivňuje způsob výpočtu vodního součinitele. Obvykle se u betonových kompozitů s přidáním SAP rozlišují tři varianty tohoto koeficientu:

- $(v/c)_{\text{tot}}$ - celkový poměr pojiva vody,
- $(v/c)_e$ - poměr absorbované vody a pojiva
- $(v/c)_{\text{eff}}$ —efektivní poměr vody a pojiva

W_{eff} je celková hmotnost vody použité v betonové směsi, minus hmotnost vody absorbované polymerem. [34][35]

Problém jednoznačného stanovení vodního součinitele ovlivňuje interpretaci publikovaných výsledků výzkumu o vlivu SAP na parametry pevnosti. Největší problém při určování skutečné změny uvedených vlastností je určit, který ze dvou výše uvedených koeficientů pojiva vody je srovnatelný s referenční řadou. Zda s referenčním vzorkem porovnávat vodní součinitel celkový nebo efektivní. Ve většině studií není voda určená k absorpci pomocí systému SAP zahrnuta ve vodním součiniteli. Je to výsledek přijetí podobné metodiky jako u jiných interních

vytvrzovacích činidel, a to použití efektivního vodního součinitele pro referenční vzorek a u vzorků s dávkou polymeru přidat určité množství vody, které do vodního součinitele není započítáno. To vede k situaci, kdy se posouzení vlivu SAPu na vlastnosti betonového kompozitu provádí variací dvou parametrů současně. Pozoruje se hmotnostní obsah SAPu v testovaném složení a množství dodatečné vody potřebné k plné aktivaci přísady. Taková metodika ztěžuje vyvozování správných závěrů o tom, jaký je skutečný dopad absorpčního polymeru na vlastnosti betonových kompozitů. [29]

Je známé, že zavedením další vody do betonové směsi, bez použití SAPu, se dosáhne vyššího vodního součinitele. To má za následek zhoršení mechanických vlastností a zvýšení pórovitosti betonu, což vede k snížení smršťovacích deformací. Zavedení další vody do betonové směsi tedy ovlivní stejné parametry, na kterých se testuje vliv SAPu. Přijetí takové metodiky vede k závěrům založeným na dvou jevech vyskytujících se současně a ovlivňujících stejné vlastnosti betonového kompozitu, což znemožňuje správně určit, nakolik mechanické vlastnosti ovlivní přidání SAPu a nakolik je ovlivní dodatečná voda, kterou by měl SAP pohltit. [29]

3.1.1 Použití absorpčních polymerů v samohojícím betonu

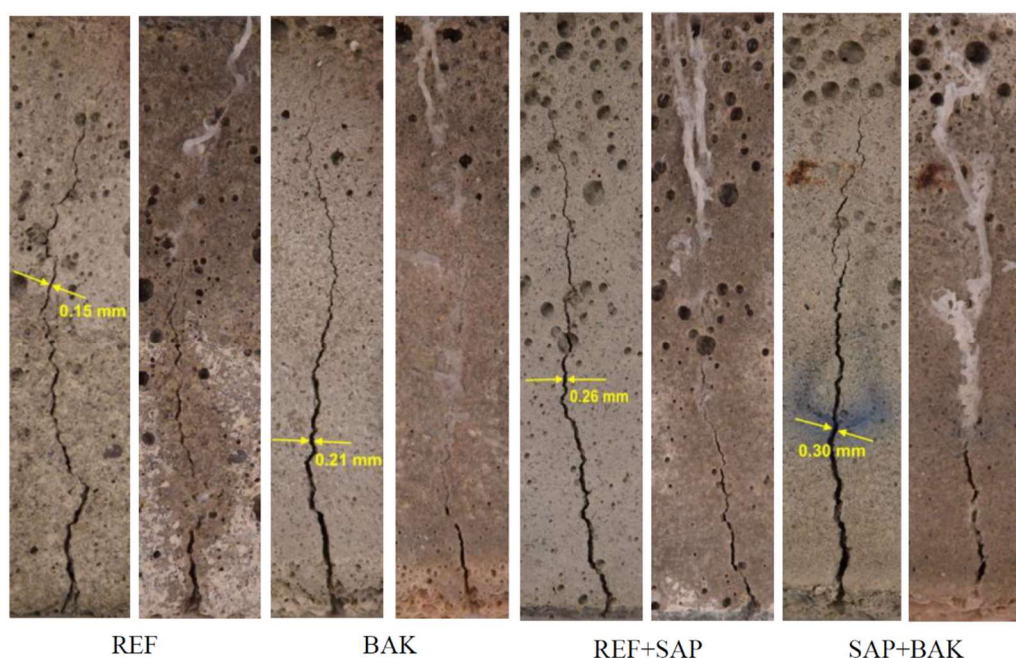
Možnost použití superabsorpčních polymerů pro zefektivnění procesu samohojení betonu je poměrně novým trendem. Toto využití však nabízí slibný potenciál. Jak bylo v kapitole č. 2 *Vliv bakterií* zmíněno při procesu zacelování trhliny, je potřeba voda a oxid uhličitý pro krystalizaci uhličitanu vápenatého. Protože při vytvoření trhliny na konstrukci je běžně poměrně snadno přístupný oxid uhličitý, ale vlhkost je pouze vzdušná, popřípadě nárazová ze srážek, může docházet k neefektivnímu hojení z důvodu nedostatku vody. Schopnost betonu obsahujícího SAP zachytit a udržet vlhkost po výrazně delší dobu může tento problém poměrně efektivně vyřešit.

H. Schreiberová ve svém výzkumu použila SAP jako přísadu, která může podpořit samohojení betonu bez bakterií dodatečnou vodou a také hlavně testovala možnost ochrany bakterií. Těm hrozí zničení od vznikajících vnitřních tlaků při tuhnutí a tvrdnutí cementové matrice. Dle její publikace by zvýšený objem částic absorpčního polymeru mohl bakterie ochránit. Ve všech vzorcích byl přítomen také živný roztok

skládající se z kvasničného extraktu a laktátu vápenatého, které měly dál podpořit vliv bakterií *Bacillus pseudofirmus* na samohojení prvku. [36]

Efekt SAPu na samohojení byl zkoušen měřením maximálního rozpětí trhliny, které byl daný vzorek schopen zacelit. Bylo to provedeno porovnáním snímků o vysokém rozlišení oblasti s prasklinou před a po 28 dnech hojení ve vodním prostředí. Obrázek č. 12 znázorňuje porovnání referenčního vzorku, který také prokázal zacelení trhliny, a to až do rozpětí 180 μm . Tento poměrně kladný výsledek může mít za následek přidání laktátu vápenatého, který poskytl dodatečné množství vápenatých iontů pro krystalizaci uhličitanu vápenatého. U vzorků pouze s bakteriemi bez absorpčního polymeru došlo k o něco lepšímu zacelení, a to až do šířky 230 μm . Vzorky pouze s přídavkem SAPu dosáhly dokonce lepšího výsledku než samotné bakterie. U těchto vzorků bylo zaznamenáno zacelení trhliny až 260 μm široké. Dle očekávání nejlepšího výsledku bylo dosaženo u kombinace bakterií a SAPu. Maximální šířka zacelené trhliny byla 320 μm a průměrná šířka u těchto vzorků se rovnala 280 μm . [36]

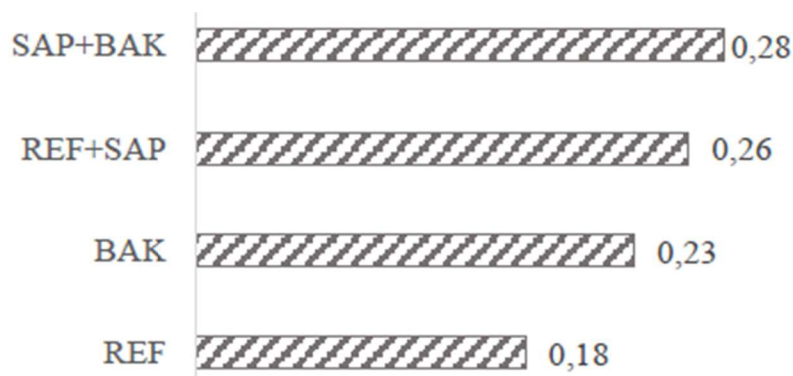
Obrázek 12: Vliv přídavku bakterií a SAPu na zacelení rozšiřující se trhliny po 28 dnech hojení



Zdroj: SCHREIBEROVÁ H., (2020). *Autonomní zacelení trhlín v betonu obsahujícím bio-aktivní činidlo a superabsorpční polymer*. Katedra betonových a zděných konstrukcí

Jak je vidět na grafu č. 6. Vzorek s bakteriemi a absorpčním polymerem sice prokázal až o 60 % lepší samohojivý potenciál, výsledná maximální šířka 320 μm je ale v porovnání s další literaturou poměrně nízká. Jak sama uvádí, některé výzkumy prokázaly zacelení až 700 μm trhliny. Poměrně nízký výsledek může být dán nedokonalým rozmísením některých složek či jejich neideálním množstvím. Například dávka SAPu 0,5 % z hmotnosti cementu je v této publikaci uváděna jako ideální s odkazem na práci s názvem *An investigation of the compatibility of different approaches to self-healing concrete: The superabsorbent polymers and microbially induced calcite precipitation*, ve které právě tato hodnota dosáhla nejlepších výsledků. [37] S tímto dávkováním zase nesouhlasí ku příkladu Snoeck a kol. ti uvedli jako ideální dávku 1 % z hmotnosti cementu. Dle nich tato dávka nesnížila ostatní mechanické vlastnosti betonu. [38] Výše citovaní WOYCIECHOWSKI a KALINOWSKI ale uvádí, že tato poměrně vysoká dávka snižuje pevnost v tlaku betonu. [29] Tyto rozpory v literatuře jen podporují tvrzení, že správně určit vliv a dávkování SAPu je velmi komplikované a bude potřeba ještě řada dalších výzkumů. I přesto ale můžeme konstatovat, že přídavek SAPu v určité míře zlepšuje potenciál samohojení a může být velmi vhodný v oblastech s nízkými srážkami, neboť jeho nasákavost pomůže pojmout velké množství vody a použít ji v samohojícím procesu. [38]

Graf 6: průměrná hodnota šířky zacelené trhliny po 28 dnech samohojení



Zdroj: SCHREIBEROVÁ H., (2020). *Autonomní zacelení trhlin v betonu obsahujícím bio-aktivní činidlo a superabsorpční polymer*. Katedra betonových a zděných konstrukcí

3.2 Dodatečné zdroje vápníku

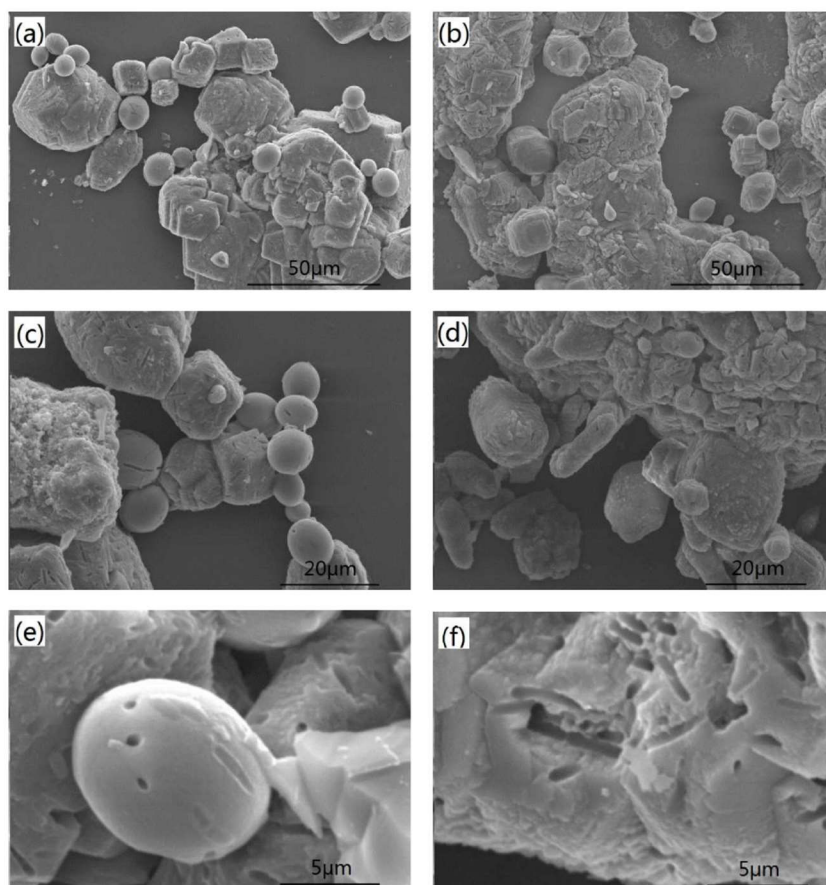
Produkce uhličitanu vápenatého a tím pádem schopnost samohojení je omezena množstvím vápenatých iontů v betonu. Proto je možné při výrobě betonové směsi přidat dodatečný zdroj vápníku. Nejčastěji se jedná o anorganický nitrát neboli dusičnan vápenatý nebo organický laktát vápenatý. [39]

Na výsledných vlastnostech se ale velmi podepíše to, jaký druh zdroje je využit a v jakém množství. Touto problematikou se zabýval například Xu a spol roku 2015. Ti porovnávali, jak právě tyto dva zdroje ovlivní krystalizaci uhličitanu vápenatého. [40]

Při pozorování bakterií *Sporosarcina pasteurii* v roztoku spolu s daným zdrojem vápníku zaznamenali, že bakterie jsou mnohem aktivnější, pokud je k nim přidán organický laktát vápenatý. Je to z důvodu toho, že laktát vápenatý není pouze zdroj vápníku, ale také díky organickému původu zdroj uhlíku jako výživy pro bakterie. [40] Jonkers roku 2011 publikoval práci, která tuto skutečnost potvrzuje a udává, že i jiné zdroje vápníku mají podobný efekt, pokud jsou na organické bázi. [41] Díky této skutečnosti byla koncentrace buněk v roztoku s laktátem vápenatým po 22 hodinách více než dvojnásobná oproti roztoku s nitrátem vápenatým. [40]

Při porovnání vysrážených krystalů v roztocích bylo pomocí rentgenové difrakce potvrzeno, že uhličitan vápenatý vzniká nezávisle na druhu zdroje vápníku. Mikroskopové snímky viditelné na obrázku č. 13 ale ukazují, že druh příměsi ovlivní vzhled a velikost krystalů uhličitanu vápenatého. Novotvary z dusičnanu vápenatého jsou sférické a lamelární částice s velikostí částic menší než 50 μm . Naproti tomu sedimenty z laktátu vápenatého jsou většinou nepravidelné kompaktní hrudky nebo romboedrické krystaly s relativně velkou velikostí částic. Na povrchu krystalů byly pozorovány otisky 2–4 μm dlouhé a 0,7 μm široké. Tyto otisky byly pravděpodobně zanechány bakteriemi. To souhlasí s předchozími zjištěními ohledně buněk bakterií jako krystalizačních zárodků. [40]

Obrázek 13: SEM snímky zachycující krystaly uhličitanu vápenatého při použití dusičnanu vápenatého (a,c,e) a laktátu vápenatého (b,d,f)

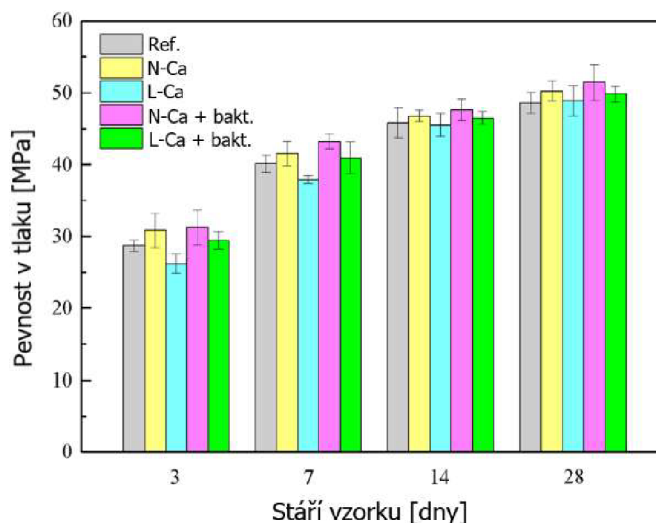


Zdroj: XU J., DU Y., JIANG Z., SHE A., (2015). *Effects of calcium source on biochemical properties of microbial CaCO₃ precipitation.*

Druh zdroje vápníku dle provedených výzkumů ovlivní také mechanické vlastnosti finální konstrukce. Těmi se zabýval například Zheng, Qian a Su ve své práci z roku 2020. Práce nabízí porovnání samohojivých vlastností betonu se dvěma výše zmíněnými zdroji vápenatých iontů, a to jak samostatně, tak v kombinaci s bakteriemi.

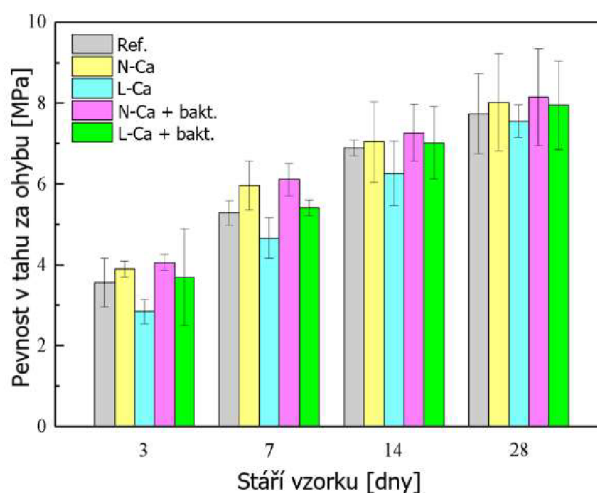
Grafy č. 7 a 8 zaznamenávají vývoj pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po různých intervalech zrání. Vyplývá z nich, že přidání dusičnanu vápenatého by mohlo zvýšit pevnosti v tlaku i tahu v prvních dnech zrání, naopak přidání laktátu vápenatého by při stejném stáří obě vlastnosti snížilo v porovnání s referenčními vzorky. Přidání bakterií k těmto zdrojům vápníku ukázalo podobné výsledky. U vzorků s dusičnanem vápenatým a bakteriemi byla dosažena po 28 dnech zrání pevnost v tlaku o 5,8 % a pevnosti v tahu za ohybu o 5,3 % vyšší než u kontrolních vzorků. Naopak přidání laktátu vápenatého a bakterií nemělo výrazný vliv na zmiňované vlastnosti. [1]

Graf 7: Vliv zdroje vápníku na pevnost v tlaku u vzorků různého stáří



Zdroj: ZHENG T., QIAN CH., SU Y., (2021). Influences of different calcium sources on the early age cracks of self-healing cementitious mortar. (přeloženo)

Graf 8: Vliv zdroje vápníku na pevnost v tahu za ohybu u vzorků různého stáří

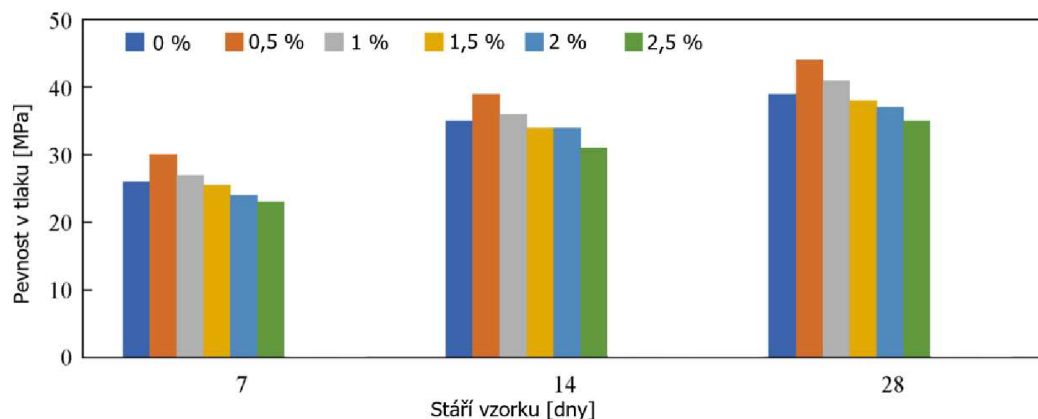


Zdroj: ZHENG T., QIAN CH., SU Y., (2021). Influences of different calcium sources on the early age cracks of self-healing cementitious mortar., (přeloženo)

Vijay a Murmu také testovali vliv laktátu vápenatého na mechanické vlastnosti. V této publikaci byly porovnávány rozdílné dávky této přísady. Výsledky byly zaznamenány v grafu č. 9. Je zde viditelný nárůst pevnosti až o 12 % oproti referenci u vzorku s nejnižší dávkou laktátu vápenatého a to 0,5 % z hmotnosti cementu. U všech vyšších dávek byl zřejmý pokles pevnosti. Jako jednoduché vysvětlení se nabízí zvyšující se procento jemného podílu látky, která se nepodílí na hydrataci cementu. Tyto výsledky

jsou ve shodě s výše zmíněnou prací, která poukazuje na snížení pevnosti v tlaku při užití vyššího množství laktátu vápenatého. U vzorků testovaných v dané publikaci byla dávka laktátu vápenatého 1,3 % z hmotnosti cementu. [39] [1]

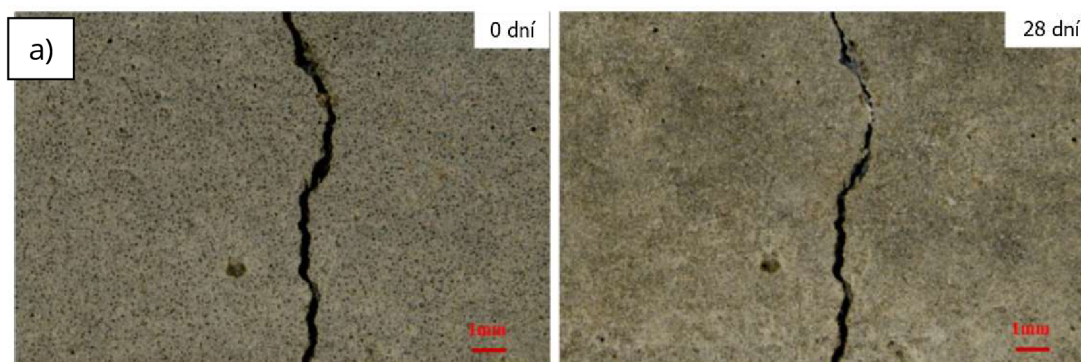
Graf 9: Vliv množství laktátu vápenatého v % z hm. cementu na pevnost v tlaku po daných stářích vzorků.

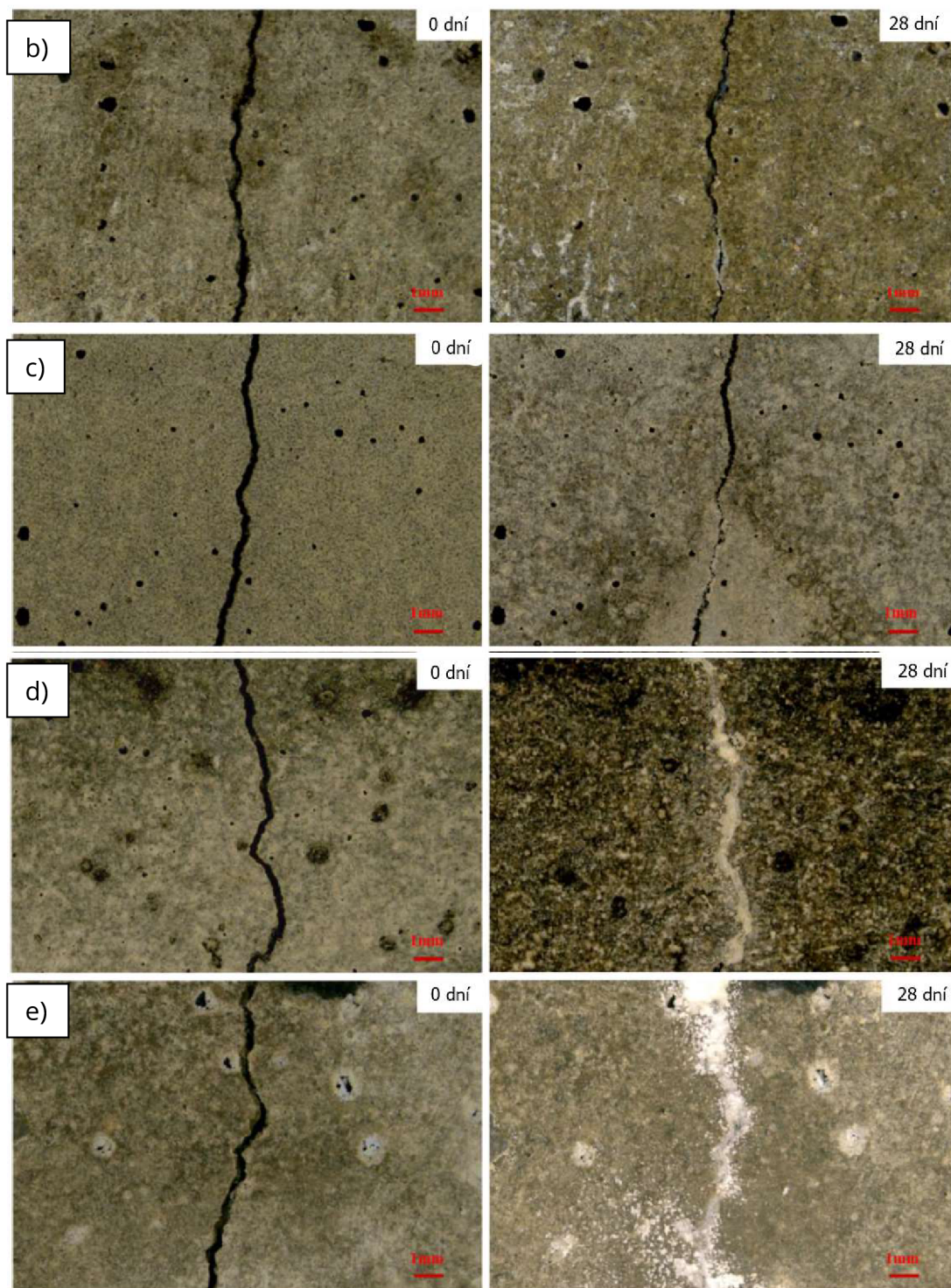


Zdroj: VIJAY K., MURMU M., (2019). *Effect of calcium lactate on compressive strength and self-healing of cracks in microbial concrete.*

Dostupné výsledky lze shrnout jako pozitivní výsledek přidavku laktátu vápenatého na samohojení betonu. Přídavek nižší dávky laktátu negativně neovlivní mechanické vlastnosti betonu, ale výrazně zlepši samohojivé vlastnosti konstrukce. Porovnání snímků trhlin před a po hojení po 28 dnech na obrázku č. 14 b) a c) prokázalo, že vzorky s přídavkem pouze zdroje vápníků vykázaly určité zacelující schopnosti. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo kombinací bakterií a laktátu vápenatého zachyceného na obr. č. 14 e).

Obrázek 14: Snímky hrany trhliny před a po 28 dnech samohojení u vzorků a) referenčních, b) s N-Ca, c) s L-Ca, d) s N-Ca a bakteriemi, e) s L-Ca a bakteriemi





Zdroj: ZHENG T., QIAN CH., SU Y., (2021). Influences of different calcium sources on the early age cracks of self-healing cementitious mortar (přeloženo)

Celkově lze tedy přidání nižších dávek jak superabsorbčních polymerů, tak zdrojů vápenatých iontů, a to především laktátu vápenatého doporučit pro zlepšení samohojení betonu. Pokud je zachována nízká dávka těchto přísad jejich použití

nesníží výrazně mechanické vlastnosti, ale významně vylepší schopnosti zacelení trhlin a to především, pokud jsou zkombinovány s přísadkou bakterií.

Vliv přísadkou některých výše uvedených přísad bude ověřen v praktické části diplomové práce.

PRAKTICKÁ ČÁST

4. Cíl praktické části

V návaznosti na všechny zdroje uvedené v teoretické části této práce můžeme konstatovat, že betony doplněné o bakterie a další přísady vykazují uspokojivou úroveň samohojení. Jak je ale z uvedených postupů zřejmé, připravit bakteriální betonu je komplikované a zpravidla proveditelné zatím pouze v laboratorních podmínkách. Příprava živného roztoku a kultivace bakterií před přidáním do čerstvé betonové směsi v betonárně je stále vcelku nepředstavitelný proces. Stísněné podmínky betonáren, velký objem vyráběného betonu a také ekonomické hledisko velmi znesnadňují standardní nasazení. Proto byl cíl práce zvolen s ohledem na možnosti snadného užití samohojícího betonu ve velkém množství a v prostředí běžných betonáren.

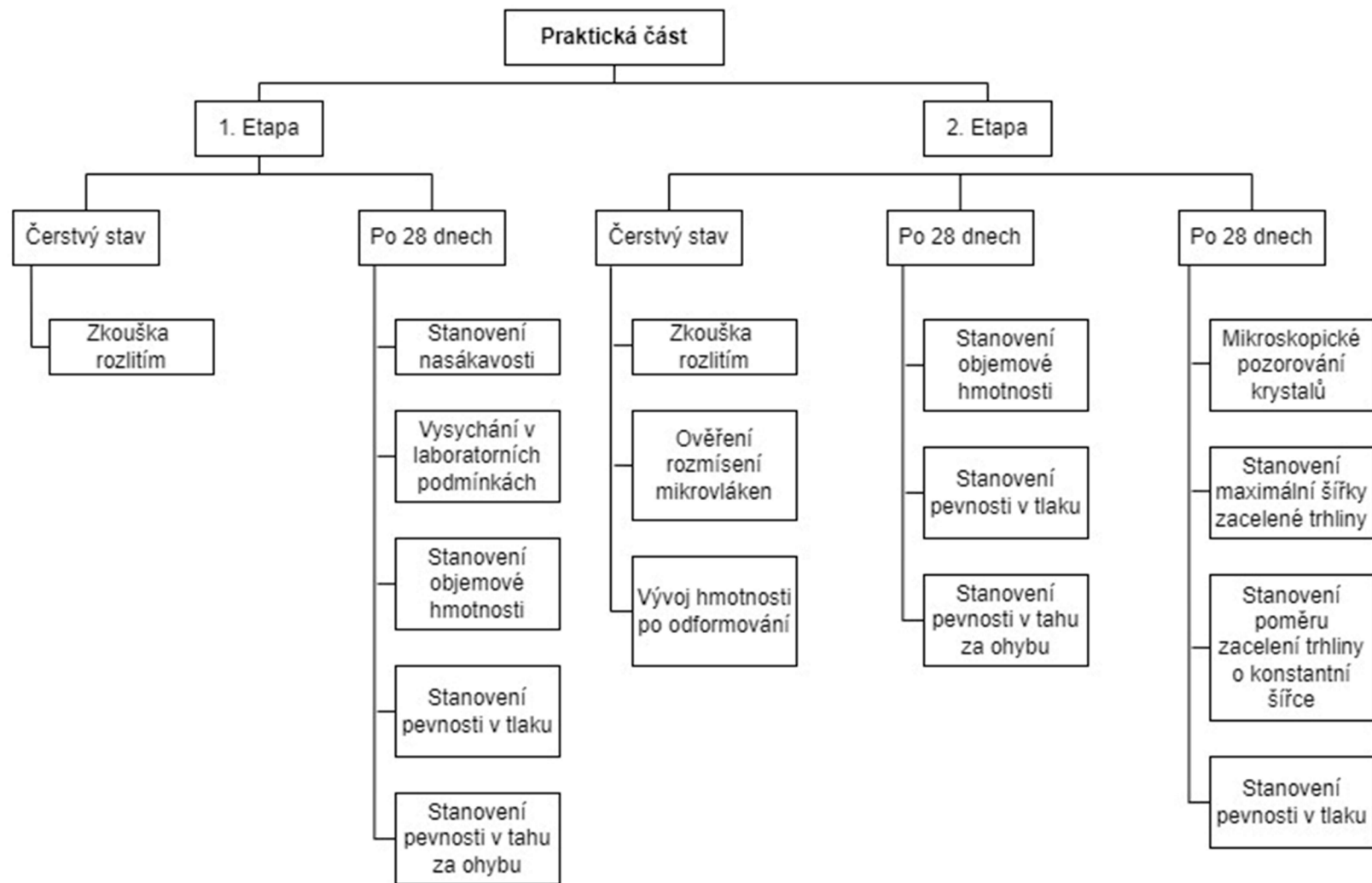
Cílem práce je odzkoušení sady směsí, které spojuje právě nevyužití bakterií. Jedná se o využití práškových přísad a mikrovláken, které mohou být bez větších problémů nasazeny ve velkovýrobě betonu. Je očekáváno, že nebude dosaženo takového samohojivého efektu, jako za použití bakterií. Je ale důležité ověřit hlavně praktické využití. Cílem praktické části této diplomové práce je najít směs, která jednak vykáže nejlepší schopnost samohojení, ale také dokáže, že nebyly zhoršeny hlavní mechanické vlastnosti betonové konstrukce.

4.1. Metodika zkoušení

Praktická část je rozdělena na dvě etapy. V první etapě bude zkoušeny záměsi s různým množstvím super absorpčních polymerů. U těch je obecně známo, že ve větších koncentracích výrazně zhoršují mechanické vlastnosti. Je proto žádoucí vyzkoušet jejich optimální množství.

Druhá část zkouší už samotné vlastnosti samohojení cementových kompozitů. Jsou pozorovány jak vlastnosti v čerstvém stavu, tak i ve ztvrdlém stavu před porušením a po porušení a 28 dnech samohojení.

Návaznosti jednotlivých zkoušek jsou znázorněny na obrázku č. 15



Obrázek 15: Metodika zkoušení v rámci praktické části práce

4.2. Použité suroviny

Pro přípravu zkušebních trámečků byly použity běžně dostupné suroviny představené v této podkapitole.

Cement

Pro zkoušení byl využit portlandský cement s označením CEM I 42,5 R. Tento cement je vyráběn v závodu Mokrá společnosti Českomoravský cement a.s. Cement s označením R vykazuje rychlý nárůst pevnosti a rychlý vývin hydratačního tepla. Je dodáván v baleních po 25 kg. Složení slínku a základní technické vlastnosti uvádí tabulka č. 2 [42]

Tabulka 2: Základní fyzikální a mechanické vlastnosti užitého cementu

Parametr	Charakteristická hodnota
Počátek tuhnutí [min]	194
Konec tuhnutí [min]	260
Měrný povrch [m ² /kg]	388
Hydratační teplo 7 dní [J/g]	311
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	50,3
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	59,1
Pevnost v tahu po 7 dnech [MPa]	8,1
Pevnost v tahu po 28 dnech [MPa]	9,1

Zdroj: Českomoravský cement a.s.

Tabulka 3: Chemické složení použitého cementu

Parametr	Charakteristická hodnota
CaO [%]	63,2
SiO ₂ [%]	19,5
Al ₂ O ₃ [%]	4,7
Fe ₂ O ₃ [%]	3,3
MgO [%]	1,5
SO ₃ [%]	3,07
Cl ⁻ [%]	0,066
K ₂ O [%]	0,78
Na ₂ O [%]	0,15
Na ₂ O ekvivalnet [%]	0,66
Nerozpustný zbytek [%]	0,67
Ztráta žíháním [%]	3,38

Zdroj: Českomoravský cement a.s.

Kamenivo

Pro přípravu trámečků bylo zvoleno drobné těžené kamenivo o frakci 0-4. Dodáno výrobcem Písek Žabčice spol s.r.o. Před použitím bylo sušeno na konstantní hmotnost, aby byla zajištěna kontinuální konzistence čerstvé směsi.

Voda

Pro přípravu betonové směsi byla využita pitná voda. Splňuje všechny podmínky na záměsovou vodu uvedené v normě ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu. A jakožto pitná voda z vodovodu se nemusí zkoušet před použitím do betonu.

Superabsorpční přísada

Super absorbenty (SAP) jsou polymery, které se chovají jako super-houba. Jsou extrémně nasákavé a vytváří gel. Volně smísené s vodou dokážou absorbovat i stonásobek vlastní hmotnosti. Vodu následně může pomalu předávat zpět do konstrukce. Do směsi byl zvolen superabsorbent CREABLOC®SIS. Nabízí jej firma Falconry s.r.o. [43]

Zvolený SAP se vyznačuje dlouhodobou stabilitou a odolností proti solím a solným roztokům. Tento výrobek je speciálně upraven pro stavebně inženýrské použití a v porovnání s konkurencí nabízí nejlepší absorpci v rámci AAP (Absorption Against Pressure) tzn. absorpce proti tlaku nebo AUL (Absorbency Under Load) tj. Absorpce pod nátlakem. [43]

PP mikrovlákná

Polypropylenová mikrovlákná byly zvoleny délky 6 mm. K dispozici byly vlákna FIBRIBET – PPV 6 mm. Dávkování je doporučeno 0,6 – 0,9 kg/m³ betonu. Pro zkoušenou recepturu bylo zvoleno dávkování 0,6 kg/m³. Vlákna jdou dodávána v sáčcích po 900 g pro usnadnění výpočtu dávkování při použití v betonárnách. [44]

Obrázek 16: PP mikrovlákná a jejich balení



Zdroj: VŠEDOBETONU.cz, FIBRIBET – PPV 6 mm

PVA mikrovlákná

Vlákná z polyvinyl alkoholu byly taktéž zvoleny délky 6 mm a přidány ve shodném množství $0,6 \text{ kg/m}^3$ pro lepší porovnání výsledků. Použitá vlákna jsou dostupná například od čínského výrobce Shandong LUKE Composite Co., Ltd. PVA vlákna jsou vizuálně dobře odlišitelná díky jejich zažloutlému odstínu. [45]

Obrázek 17: PVA mikrovlákná



Zdroj: Alibaba.com, Polyvinyl alcohol PVA fiber 6 mm

Laktát Vápenatý

Jako zdroj vápníku byl použit běžně dostupný laktát vápenatý zakoupený od společnosti Dr. Hoffmann. Sloučenina je nejčastěji označována jako laktát vápenatý. Správný název ale zní mléčnan vápenatý pentahydrát o chemickém vzorci $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Jedná se o zdroj organicky vázaného vápníku, užívaného běžně v potravinářství či farmacii. Vzhledově se jedná o bílý krystalický prášek bez zápachu. Tabulka č. 4 udává další charakteristiky, které deklaruje výrobce.

Tabulka 4: Charakteristiky použitého laktátu vápenatého

Parametr	Charakteristická hodnota
Ca [%]	16,5-20,1
těžké kovy jako Pb [ppm]	5
Chloridy [ppm]	80
pH Vodního roztoku	6-8

Zdroj: Dr. Hoffmann, *Mléčnan vápenatý pentahydrát*

Obrázek 18: Použitý Laktát vápenatý



Zdroj: Vlastní foto

5. Průběh zkoušení

Jak je znázorněno v grafu metodiky zkoušení práce je rozdělena na dvě části. Jako první je zkoušen vliv množství superabsorpční přísady na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu. V druhé, obsáhlejší části je ověřen vliv přísad na samohojící schopnosti cementového kompozitu.

5.1. 1. Etapa zkoušení

Zdroje uvedené v teoretické části diplomové práce se výrazně rozcházejí v množství SAPu, které je ještě efektivně použitelné pro betonovou konstrukci. Bylo proto navrženo 5 záměsí s různou koncentrací této přísady pro vytvoření vlastního názoru na tuto problematiku.

5.1.1. Navržená receptura

Jak již bylo zmíněno, bylo navrženo 5 záměsí s rozdílnou hodnotou SAPu. Pro dávkování byly zvoleny násobky 0,3 % z hmotnosti cementu. Pro absorbování SAPem bylo v první iteraci záměsí počítáno dodatečných 30 g vody na 1 g absorbentu. Jednalo se o odhad vyvozený z práce *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction* kterou vydali roku 2012 autoři Viktor a Hans-Wolf. [31] Výsledná směs však měla konzistenci zavhlého písku. Při návrhu směsi se tedy množství vody zvýšilo o dodatečnou dávku 45 g/g SAPu. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v tabulce č. 5.

Tabulka 5: Složení zvolených testovacích záměsí

	REF	SAP 0,3	SAP 0,6	SAP 0,9	SAP 1,2
CEM I 42,5 R	550	550	550	550	550
Písek 0-4	1500	1500	1500	1500	1500
Voda	270	344	418,5	493	567
SAP	0	1,65	3,3	4,95	6,6

5.1.2. Příprava zkušebních těles

Pro zkoušení byly zvoleny trámečky o velikosti 40x40x160 mm. Čerstvá směs byla míchána v laboratorní míchačce pro přípravu cementových malt. Nejprve byla dávkována voda, do které byl přidán cement. Po rozmíchání cementové kaše byly za stálého míchání přisypány zbylé suché složky. V tomto případě se jednalo o písek 0-4 Žabčice ve kterém byl rozmísen SAP ve stanovené dávce. Jedná se o modifikovaný

postup uvedený v normě ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Je doplněný pouze o přidání SAP v dávce písku. [46]

Obrázek 19: Laboratorní míchačka



Zdroj: KÁBRTOVÁ, D., Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu.

Protože přidání SAPu velmi výrazně ovlivňuje zpracovatelnost a množství záměsové vody, která zůstane ve směsi dostupná pro reakci s cementem byla konzistence před uložením směsi ověřována zkouškou rozlítím.

Zkouška rozlítím:

Zkoušku rozlítím na střešacím stolku popisuje norma ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Před použitím stolku se provede 10 zdvihů naprázdno. Deska o průměru 300 mm se před použitím navlhčí spolu s kuželem a spodním průměru 100 mm a horním průměru 70 mm. Ten se naplní ve dvou vrstvách hutněných pomocí dusadla o průměru 40 mm. Přebytečná směs je seříznuta pomocí špachtle. Kovový kužel se následně zvedne kolmo vzhůru. Směs se poté za pomoci kliky 15krát zvedne a spustí. Poté se rozlité koláč změří dvakrát kolmo na sebe. Hodnoty se zprůměrují a udávají v mm. [48]

Obrázek 20: Střásací stůlek pro zkoušení cementových malt



Zdroj: Vlastní foto

Jako výchozí hodnota bylo určeno rozlité referenční směsi. Spolu s přidáním určitého množství SAPu musí být přidáno i dodatečné množství záměsové vody, které bude absorbováno při míchání čerstvé směsi. Určit správné množství dodané vody je ale velmi komplikované, jak již bylo zmiňováno v teoretické části práce. SAP pojímá vodu v závislosti na zásaditosti prostředí a hodnoty se mohou výrazně lišit. Proto bylo množství vody voleno tak, aby rozlité čerstvé směsi v určitém rozmezí odpovídalo právě referenčnímu vzorku. Pokud by bylo přidáno menší množství vody, než SAP dovede absorbovat, byla by absorbována i voda, která se má podílet na hydrataci cementu. Tato skutečnost by se ale nejdříve projevila na menším rozlité čerstvé směsi. Kontrola rozlité je tedy poměrně spolehlivá kontrolní zkouška. Hodnoty rozlité použitých záměsí uvádí tabulka č. 6.

Tabulka 6: Navržené záměsi doplněné o rozlité na střásacím stolku

	REF	SAP 0,3	SAP 0,6	SAP 0,9	SAP 1,2
CEM I 42,5 R	550	550	550	550	550
Písek 0-4	1500	1500	1500	1500	1500
Voda	270	344	418,5	493	567
SAP	0	1,65	3,3	4,95	6,6
Rozlité [mm]	160	150	155	153	158

Po uspokojivém stanovení množství záměsové vody byly čerstvé směsi uloženy do trojforem pro přípravu trámečků, ukládání bylo doplněno o hutnění na vibračním stolku.

Obrázek 21: Použité trojformy na cementové trámečky



Zdroj: KÁBRTOVÁ, D., Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu.

Formy byly poté uloženy 24 hodin v laboratorních podmínkách. Po uplynutí stanovené doby byly trámečky odformovány a 28 dní ponechány zrát v místnosti s konstantní teplotou 20 °C a vlhkostí vzduchu 95 %

5.1.3. Zkoušení těles po 28 dnech

Po 28 dnech zrání byly vzorky změřeny a zváženy pro určení objemové hmotnosti. Na vzorcích byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na úlomcích trámečků. Také byla stanovena nasákavost vzorků. Protože zvyšující množství SAPu má zajistit držení vody v konstrukci po delší dobu byla provedena nenormová zkouška vysychání prvků v běžném prostředí.

Objemová hmotnost

Rozměry zkoušených trámečků byly měřeny digitálním posuvným měřidlem s přesností na setinu milimetru. Hmotnost byla stanovena na digitálních váhách s přesností na setinu gramu.

Obrázek 22: Použité laboratorní měřidlo a váha



Zdroj: KÁBRTOVÁ, D., Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu.

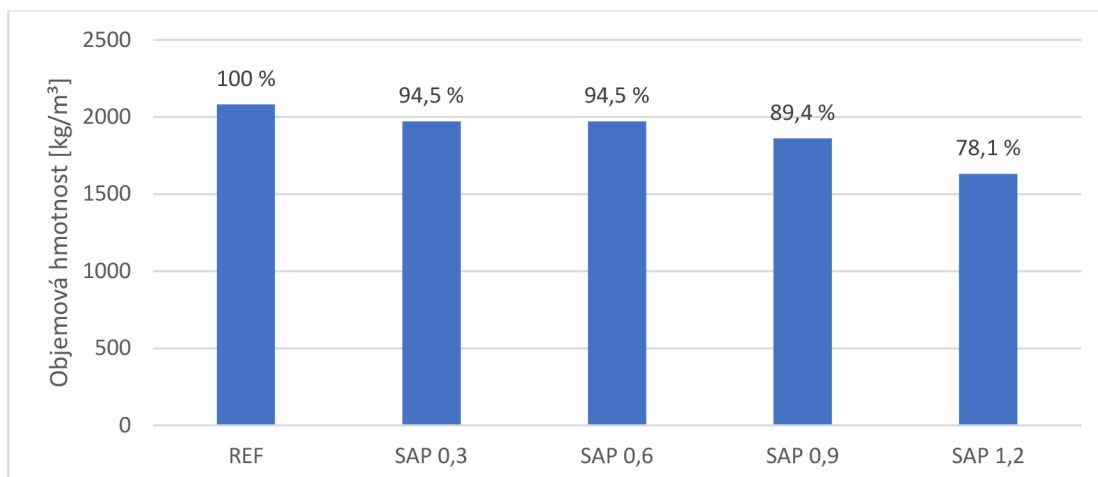
Vypočítané objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7: Objemové hmotnosti vzorků s různým množstvím SAPu

Směs	D [kg/m ³]
REF	2080
SAP 0,3	1970
SAP 0,6	1970
SAP 0,9	1860
SAP 1,2	1630

Graf č. 10 tyto výsledky přehledně porovnává a doplňuje je o procentuální údaj pro jednoduché porovnání vůči referenční objemové hmotnosti.

Graf 10: Objemové hmotnosti vzorků s různým množstvím SAPu



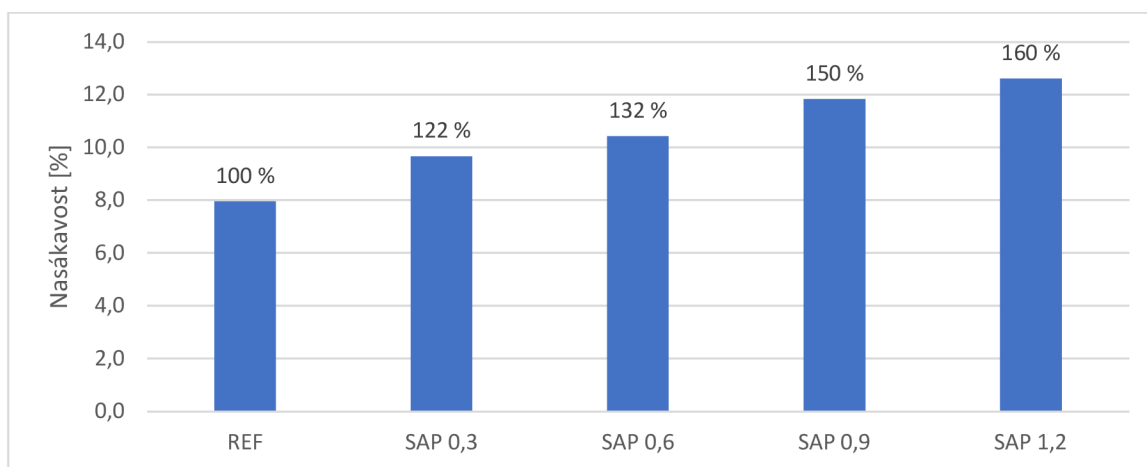
Nasákavost

Přidáním SAPu do záměsi se vnese větší množství vody do čerstvého betonu, sníží se objemová hmotnost, ale také se zvýší i nasákavost. I když SAP vodu vydá do konstrukce v rámci samošetřovacího procesu zůstává stále aktivní a může vodu znovu absorbovat. Je proto žádoucí ověřit o kolik se zvýší nasákavost prvků v závislosti na dávce superabsorpčního polymeru. Tyto hodnoty udává tabulka č. 8 a graf č. 11

Tabulka 8: Nasákavost vzorků s různým množstvím SAPu

Směs	n [%]
REF	7,9
SAP 0,3	9,7
SAP 0,6	10,4
SAP 0,9	11,8
SAP 1,2	12,6

Graf 11: Porovnání nasákavosti vzorků s různým množstvím SAPu

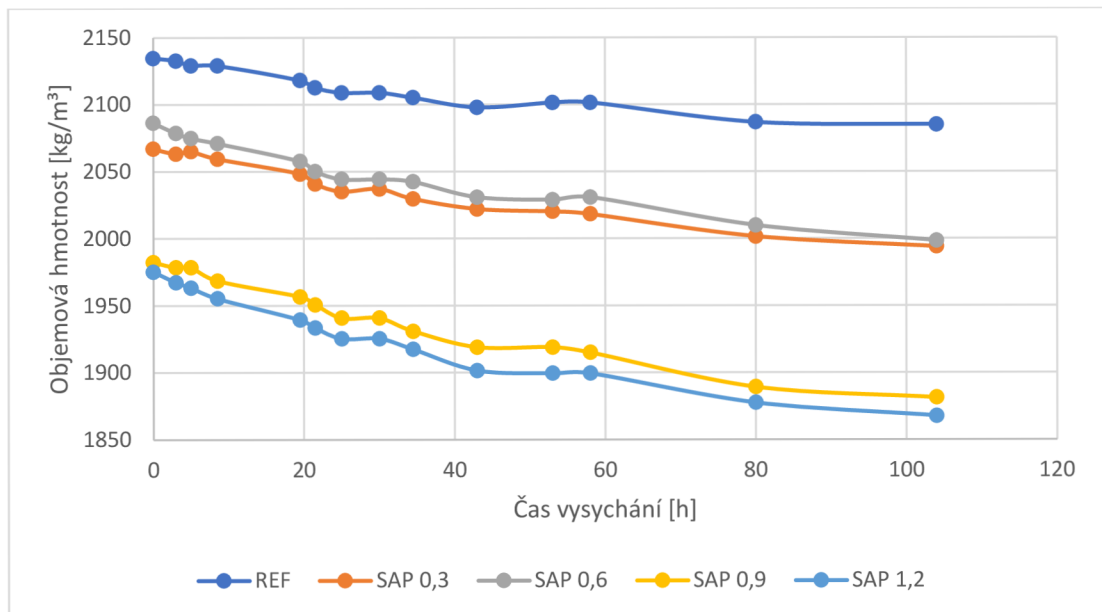


Vysychání

Větší množství SAPu v konstrukci zajistí větší absorpci vody a také by mělo dosáhnout pomalejšího vysychání. To hraje důležitou roli především v oblastech, kde jsou atmosférické srážky vzácné. Čím déle si konstrukce udržuje určitou vlhkost, tím déle je schopná se částečně samohojit. Pro zaznamenání schopnosti udržet vlhkost v konstrukci v běžném prostředí byla navržena nenormová zkouška. Zkušební prvky byly ponechány ve vodním prostředí až do kompletního nasáknutí. Poté byly lehce povrchově osušeny a umístěny na nenasákavou podložku v běžném prostředí. Následně byly v krátkých časových intervalech váženy. Následující graf č. 12 ukazuje

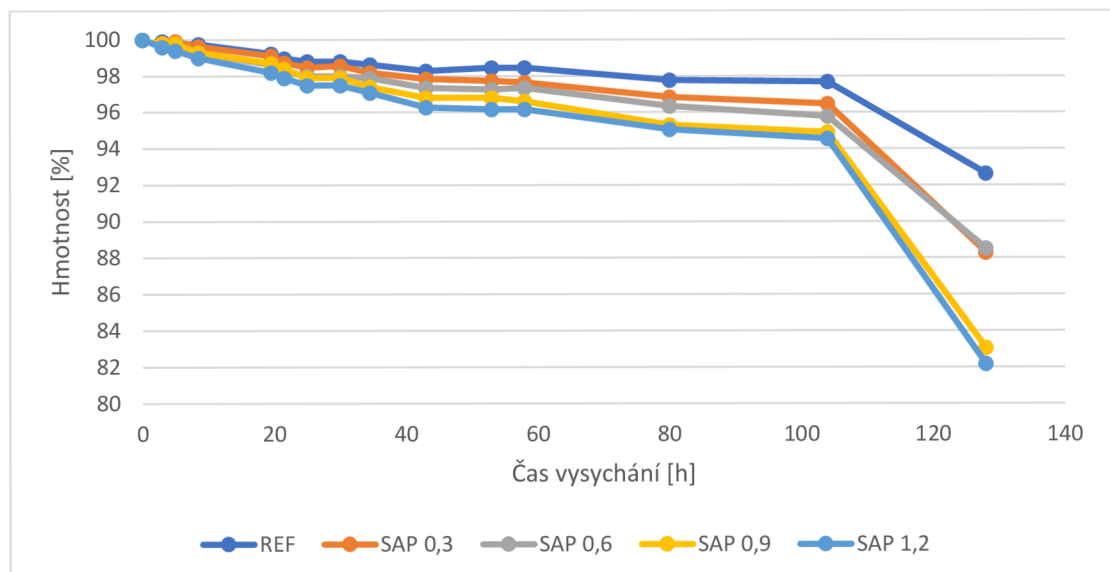
rozdíl ztráty vlhkosti v závislosti na množství superabsorpčního polymeru. Na křivkách je opět dobře znatelný již počáteční rozdíl v objemových hmotnostech jednotlivých vzorků.

Graf 12: Průběh vysychání vzorků v závislosti na množství SAPu



Jiný pohled nabízí graf č. 13. Ten znázorňuje úbytek hmotnosti ze 100 % při nasáknutí až do konečného vysušení. Sušení znázorňuje poslední sekce grafu, kdy byly vzorky během 24 hodin vysušeny na konstantní hmotnost.

Graf 13: Procentuální úbytek hmotnosti zkoušených vzorků při vysychání



Obrázek 23: Uložení vzorku v běžném prostředí na nenasákavé podložce



Zdroj: Vlastní foto

Pevnost v tahu za ohybu

Trámečky byly zkoušeny na pevnost v tahu za ohybu tříbodovým ohybem. Pro vyvození tříbodového ohybu byl připraven zkušební nástavec do lisu uvedený na obrázku č. 24. Zkouška je provedena dle normového postupu uvedeného v ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. [46]

Obrázek 24: Zkušební přípravek pro vyvození tříbodového ohybu

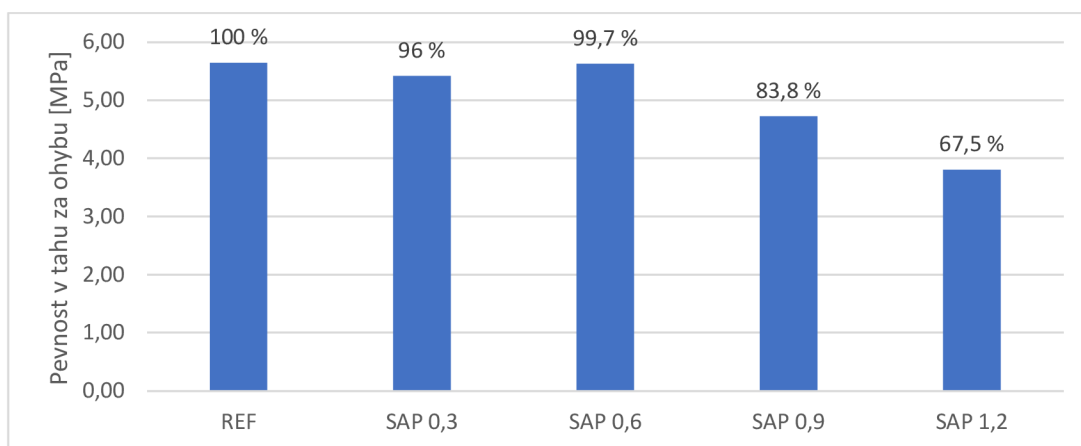


Zdroj: KÁBRTOVÁ, D., Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu.

Tabulka 9: Pevnosti v tahu za ohybu vzorků s různým množstvím SAPu

Směs	R _f
REF	5,64
SAP 0,3	5,42
SAP 0,6	5,63
SAP 0,9	4,73
SAP 1,2	3,81

Graf 14: Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků s různým množstvím SAPu



Pevnost v tlaku

Na polovinách trámečků po zkoušení pevnosti v tahu byla následně stanovena pevnost v tlaku provedená postupem dle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. [46] Pro zkoušení trámečků o rozměrech 40x40 mm je využit přípravek s čelistmi přesně kalibrovanými na tento rozměr. Výsledné pevnosti jsou zaznamenány, zprůměrovány a uvedeny v tabulce č. 9. Porovnány jsou následně v grafu č. 14.

Obrázek 25: Přípravek na zkoušení pevnosti v tlaku

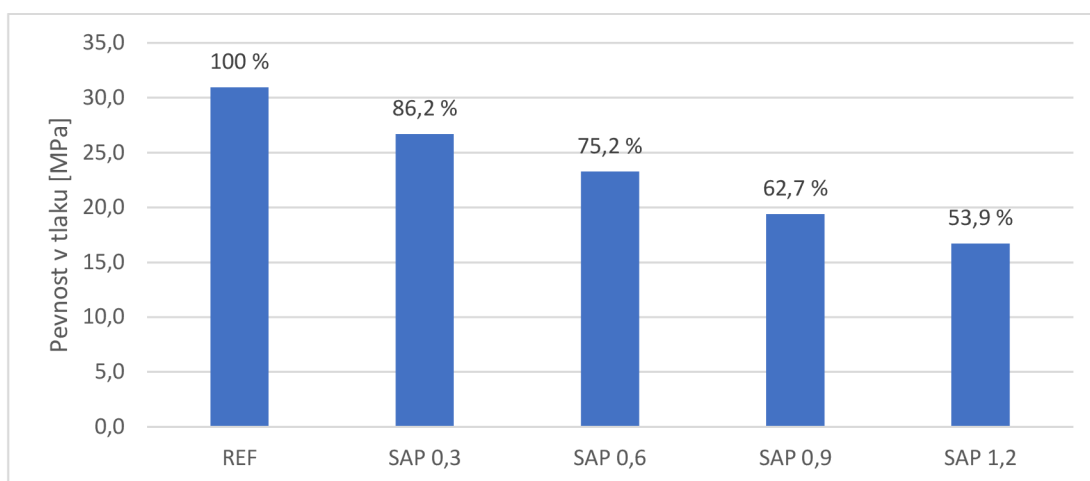


Zdroj: KÁBRTOVÁ, D., Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu.

Tabulka 10: Pevnosti v tlaku vzorků s různým množstvím SAPu

Směs	R _c
REF	31,0
SAP 0,3	26,7
SAP 0,6	23,3
SAP 0,9	19,4
SAP 1,2	16,7

Graf 15: Porovnání pevností v tlaku vzorků s různým množstvím SAPu



5.1.4. Diskuse výsledků

Cílem první etapy zkoušení bylo získat přehled o vlivu množství superabsorpčního polymeru na základní vlastnosti cementového kompozitu. Příprava záměsi ukázala, že pro dosažení obdobné zpracovatelnosti jako referenční směs je potřeba přidat značné množství vody navíc. Objemová hmotnost ztvrdlých vzorků byla dle očekávání ovlivněna přidávkem SAPu, ale značného poklesu bylo dosaženo až při překročení dávky 1 % hmotnosti cementu. Nasákavost vzorků se ukázala přímo úměrná zvyšující se dávce absorbentu. U maximální dávky 1,2 % SAPu bylo dosaženo 160 % nasákavosti referenčního vzorku.

Dle některých autorů zmíněných v teoretické části by zvyšující množství SAPu, a tudíž absorbované vody, mohlo prodloužit proces vysychání a dovolit konstrukci uchovat v sobě vlhkost po delší dobu. Jak ale ukázal graf. č 12 při porovnání vysychání vzorků, došlo k vyschnutí vzorků za téměř shodnou dobu. U vzorků s vyšší dávkou SAPu došlo k desorpci vyššího množství vlhkosti, neodcházela však delší dobu.

Pevnost v tahu za ohybu byla při nižších dávkách snížena jen mírně pro dávku 0,3 a 0,6 % bylo snížení do 4 %. Zajímavostí může být, že dle výsledků byla pevnost v tahu za ohybu výrazněji snížena při dávce 0,3 než při dávce 0,6 %. Toto může být zapříčiněno shlukem molekul absorbentu uvnitř struktury, které vytvořily slabé místo a zhoršený výsledek mohl mírně ovlivnit výsledný průměr pro tuto záměs. K výraznému snížení pevnosti v tahu za ohybu došlo až při dávkách 0,9 a 1,2 %, kdy byla pevnost v tahu za ohybu na úrovni 83,7 a 63 % pevnosti v tahu za ohybu referenčního vzorku.

Lineární pokles pevnosti v tlaku byl zaznamenán se zvyšující se hodnotou super absorbentu. Při nejvyšší zkoušené dávce 1,2 % byla naměřená pevnost v tlaku pouhých 53 % hodnoty pevnosti v tlaku referenčního vzorku. Tento výsledek je tedy v rozporu s tvrzením autorů Snoeck a kol., kteří ve své publikaci uváděli dávku 1 % SAPu z hmotnosti cementu jako ideální. Naopak naměřený výsledek koresponduje s tvrzením H. Schreiberové, která tvrdí, že maximální použitelná dávka je 0,5 % z hmotnosti cementu.

5.2. 2. Etapa zkoušení

V druhé, hlavní části, zkoušení bylo ověřeno přidání SAPu zmiňovaného v první etapě, laktátu vápenatého a dvou druhů mikrovláken. Bylo také porovnáno, která ze záměsí nejvíce podpořila schopnost samohojení, ale zároveň výrazně nezhoršila mechanické vlastnosti konstrukce.

5.2.1. Navržená receptura

Při návrhu záměsí bylo zamýšleno porovnání jak jednotlivých přísad samostatně, tak v kombinacích pro nalezení ideální směsi. Pro přidání super absorbentu byla na základě předchozích testů zvolena dávka 0,5 % z hmotnosti cementu. Tato dávka taktéž umožní porovnání s výsledky H. Schreiberové.

Laktát neboli mléčnan vápenatý byl dávkován v literatuře doporučených 3 % z hmotnosti cementu. Protože s přidáváním této látky téměř nejsou zkušenosti byla zvolena právě doporučená hodnota také pro možné porovnání prací mezi sebou.

Vlákna byla dávkována po vzoru práce *Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete*. Tu roku 2019 vydali Feng, Su a Qian. Pro dávku PP mikrovláken délky 6 mm byla zvolena běžná dávka 0,6 kg/m³ betonu. Při pozorování samohojení ale řešíme především dodatečnou plochu vláken, kterou vznikající novotvary využijí k růstu. Proto při porovnávání dvou vláken o rozdílných materiálech potřebujeme, aby vláken potažmo dodatečné plochy bylo obdobné množství. PVA vlákna mají vyšší hustotu než PP vlákna. Jednoduchým dopočtem byla tedy navržena vyšší hmotnostní dávka PVA vláken, která zajistí porovnatelné množství dodaných vláken a plochy. Při porovnání hustoty PP vláken 0,91 g/cm³ a hustoty PVA vláken 1,29 g/cm³ vychází navržená dávky zvolených PVA vláken 0,85 kg/m³ betonu. Takto udávané dávkování je v zahraniční literatuře zabývající se vlákny velmi běžné. Dávky se udávají v % objemu, který daná vlákna zabírají v 1 m³ betonu.

Množství kameniva a cementu, stejně jako záměsové vody zůstává obdobné jako u vzorků použitých v 1. etapě zkoušení. Na základě poznatků z předchozí etapy bylo pro přípravu vzorků s přidáním super absorpčním polymerem počítáno dodatečných 45 g vody na 1 g SAPu.

Tabulka 11: Navržené receptury pro ověřování vlivu přísad na samohojení

	REF	PP	PVA	REF+SAP	PP+SAP	PVA+SAP	REF+LV	PP+LV	PVA+LV	REF+SAP+LV	PP+SAP+LV	PVA+SAP+LV
CEM I 42,5R	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
Písek 0-4	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Voda	275	287,5	287,5	398,5	400	405	275	287,5	287,5	398,5	400	405
PP vlákna		0,6			0,6			0,6			0,6	
PVA vlákna			0,85			0,85			0,85			0,85
SAP				2,75	2,75	2,75				2,75	2,75	2,75
Lak. Váp.							16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5

5.2.2. Příprava zkušebních těles

Stejně jako v první etapě, pro zkoušení byla záměs připravena modifikovaným postupem uvedeným v ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Nejprve je přidána voda a cement a po uplynutí normou stanovených dob míchání je postupně přisypávána suchá složka. Dle druhu záměsi se jednalo buďto o samotný písek nebo o písek doplněný o kombinaci zkoušených přísad.

Zkouška rozlívání

Čerstvá směs byla opět zkoušena normovou zkouškou rozlívání na střešacím stolku dle normy ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Jak je patrné z tabulky č. 12 správně navržené množství dodatečné vody pro absorpci v SAPu neovlivní rozlívání potažmo obecně konzistenci. Zato přidání laktátu vápenatého ovlivnilo zpracovatelnost poměrně výrazně. Směsi byly výrazně méně viskózní jak u vzorku pouze s laktátem, tak i s laktátem a SAPem.

Tabulka 12: Zkoušené záměsi 2. etapy doplněné o rozlití na střešacím stolku

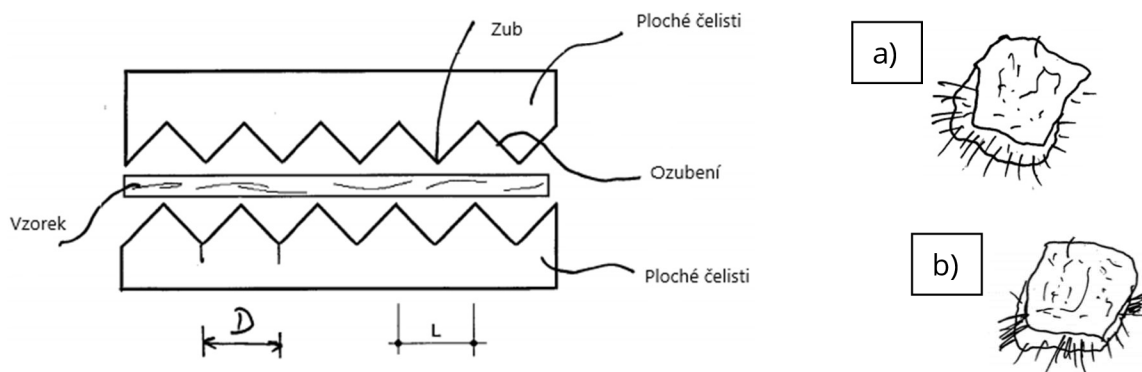
	REF	PP	PVA	REF+SAP	PP+SAP	PVA+SAP	REF+LV	PP+LV	PVA+LV	REF+SAP+LV	PP+SAP+LV	PVA+SAP+LV
CEM I 42,5R	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
Písek 0-4	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Voda	275	287,5	287,5	398,5	400	405	275	287,5	287,5	398,5	400	405
PP vlákna		0,6			0,6			0,6			0,6	
PVA vlákna			0,85			0,85			0,85			0,85
SAP				2,75	2,75	2,75				2,75	2,75	2,75
Lak. Váp.							16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
Rozlití [mm]	160	167	161	158	162	160	180	178	180	191	190	189

Ověření rozmísení vláken

Při výrobě vláknobetonu obecně je zásadním bodem dokonalé rozmísení vláken v záměsí. Ověřit rozmísení polymerních makrovláken či ocelových drátků není příliš problém, ověřit však pravidelné rozmísení mikrovláken je ale obtížné. Norma ČSN EN 14721 + A1S uvádí jako postup odebrání vzorku, jeho podrcení, separování vláken a jejich zvážení. Tento postup ale nelze použít pro mikrovlákna. S řešením přišla Bodnářová, Hela a spol a tento postup zveřejnili pod patentem číslo 305770 s názvem *Zařízení pro přípravu vzorků pro posouzení rozptýlení vláknité polypropylenové výztuže v cementových kompozitech a způsob přípravy vzorků na tomto zařízení*. [49]

Postup uvedený v patentu spočívá ve vytvoření čtvercové desky o tloušťce do 25 mm. Ta je po zatuhnutí umístěna do speciálních čelistí, které ji rozlomí na pravidelné úlomky. Ty jsou poté opticky zhodnoceny. Pokud ze stran trčí vlákna v pravidelném rozmísení a netvoří shluky může se tato záměs použít. Pokud však na více místech došlo k vytvoření shluků je nutné konstatovat, že nedošlo k řádnému rozmísení mikrovláken. [49]

Obrázek 26: Přípravek pro rozlámání vzorku na posouzení rozmísení vláken dle patentu 305770



Zdroj: Kopkáně, D., Bodnárová, L., Hela, R., Herka, P., Štáhel, P., (2016). Patent č. 305770

Pro ověření rozmísení byl pro účely této práce použit shodný princip. Nebyl využit patentovaný přípravek, ale zbylý postup zůstal zachován. Ze zkoušených záměsí obsahujících mikrovlákna byly vytvořeny koláče tlusté 10-20 mm a odloženy, dokud nezatuhly. Poté byly rozlámány na malé kusy. Následně bylo rozhodnuto, zda je záměs dostatečně rozmísená.

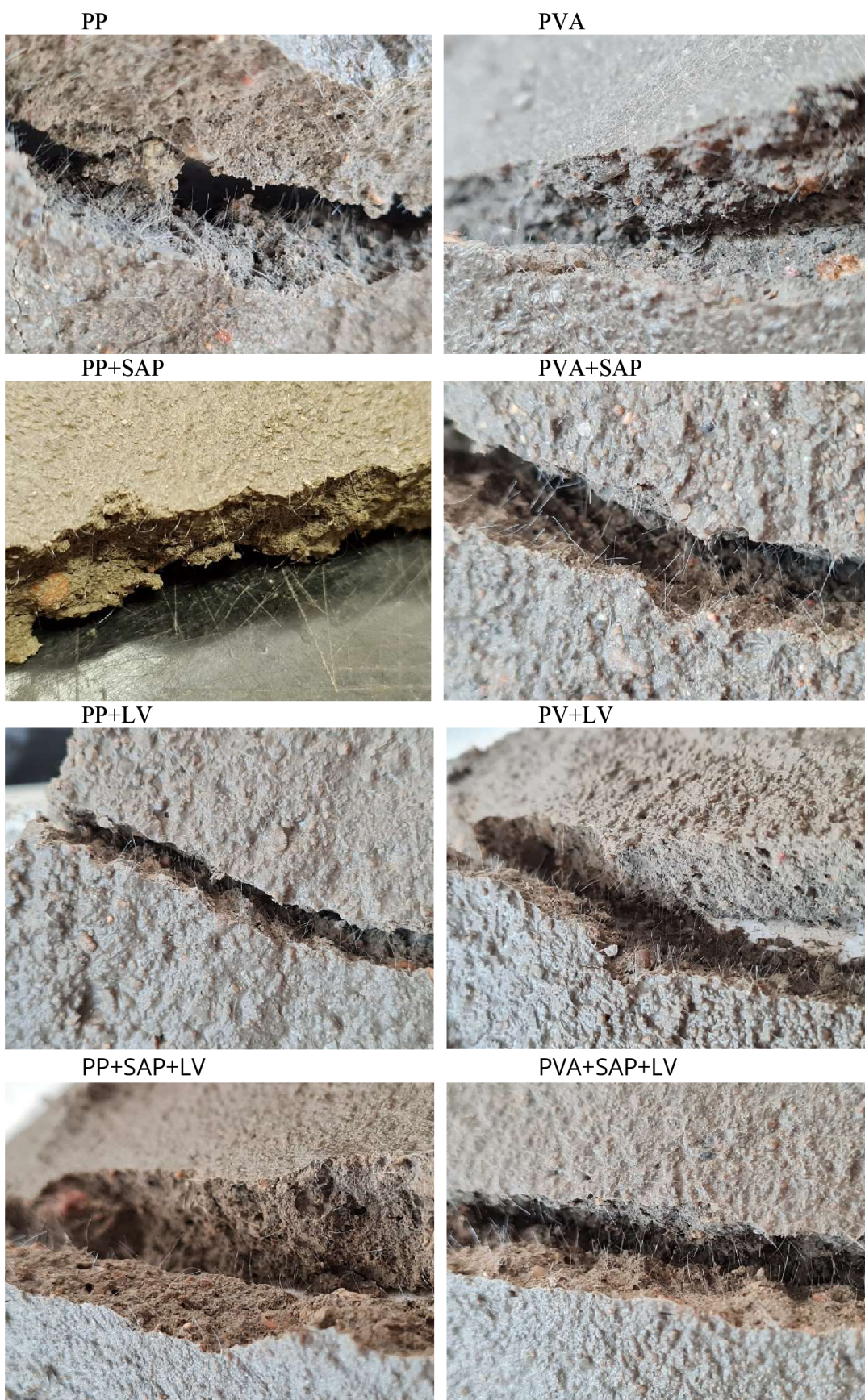
Obrázek č. 27 zachycuje vytvořené koláče a následně obrázek č. 28 zachycuje ukázky lomů jednotlivých záměsí.

Obrázek 27: Ukázka vytvořených koláčů pro ověření rozmísení mikrovláken



Zdroj: Vlastní foto

Obrázek 28: Ukázky pravidelného rozmístění mikrovláken ve zkoušených záměsích



Zdroj: Vlastní foto

U záměsi PVA byl v jednom místě objeven shluk mikrovláken. Protože se ale jednalo o jediný shluk a na žádné další z velké řady trhlin se tento problém neopakoval byla záměs použita. Ukázka nežádoucího shluku vláken je zachycena na obrázku č. 29.

Obrázek 29: Nerozmísený shluk mikrovláken



Zdroj: Vlastní foto

Čerstvá směs je uložena do trojforem pro vytvoření trámečků o rozměrech 40x40x160 mm. Po 24 hodinách tuhnutí a tvrdnutí v laboratorním prostředí jsou vzorky odformovány a uloženy do místnosti s konstantní teplotou 20 °C a vlhkostí 95 %.

Po odformování bylo na první pohled zřejmé, že vzorky s přidáním absorbentem obsahovaly po 24 hodinách výrazně vyšší množství vlhkosti a měly vyšší hmotnost.

Obrázek 30: Odformované vzorky PVA+SAP (nalevo) a PVA (napravo)



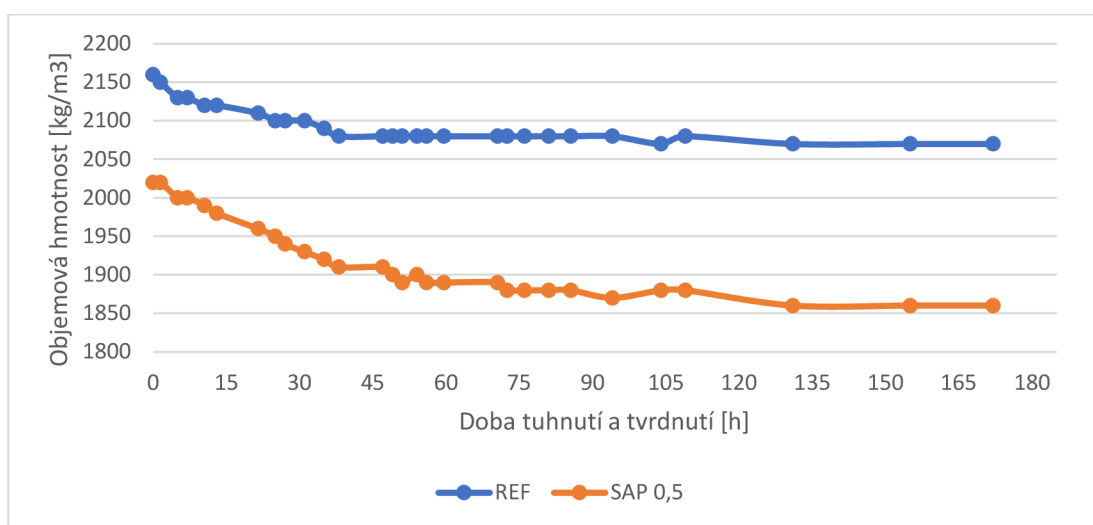
Zdroj: Vlastní foto

Vývoj hmotnosti při tvrdnutí

Takto rozdílné vlhkosti naznačovali, že i když přídavek SAPu neovlivní rychlost vysychání, jak dokázalo pozorování v 1. etapě, mohl by ovlivnit odchod vlhkosti při procesu tuhnutí a tvrdnutí.

Bylo proto rozhodnuto, že bude detailně zaznamenán vývoj hmotnosti v prvních dnech tvrdnutí. Graf č. 16 znázorňuje klesající objemovou hmotnost až do jejího ustálení.

Graf 16: Vývoj objemové hmotnosti tvrdnoucích vzorků s a bez přídavku SAPu



Objemová hmotnost u referenčního vzorku přestala výrazně klesat po přibližně 38 hodinách. Na rozdíl od reference docházelo ke snižování objemové hmotnosti u vzorku s dávkou SAPu 0,5 % z hmotnosti cementu až do cca 130 hodiny.

Vzorky byly po dobu 28 dní uchovávány v místnosti s konstantní teplotou a vlhkostí. Uložení vzorků je zachyceno na obrázku č. 31.

Obrázek 31: Uložení vzorků po dobu 28 dní



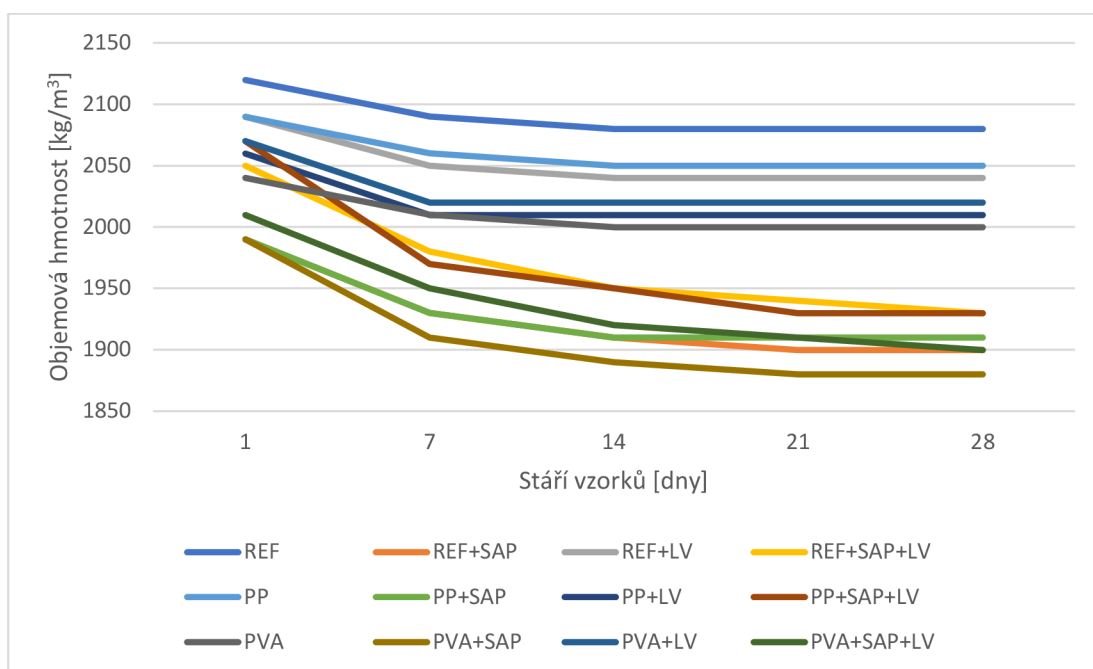
Zdroj: Vlastní foto

5.2.3. Zkoušení těles po 28 dnech

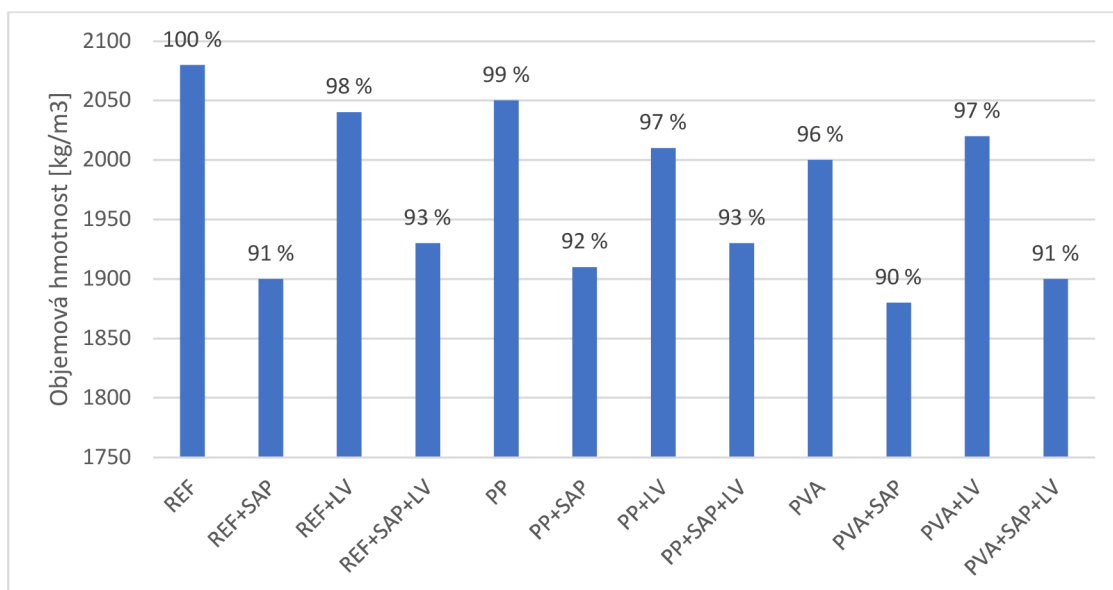
Objemová hmotnost

Po pozorování tvrdnutí v prvních dnech byla následně objemová hmotnost zaznamenávána po 7 dnech až do stáří 28 dní. Na křivkách v grafu č. 17 je patrně znatelná sada vzorků, ve kterých byl přidán super absorbent. Objemové hmotnosti jsou u vzorků se SAPem bez vláken asi o 200 kg/m³ nižší a u vzorků s PP a PVA tvořil přídavek SAPu rozdíl kolem 100 kg/m³.

Graf 17: Vývoj objemových hmotností na zkoušených vzorcích



Graf 18: Porovnání objemových hmotností po 28 dnech zrání



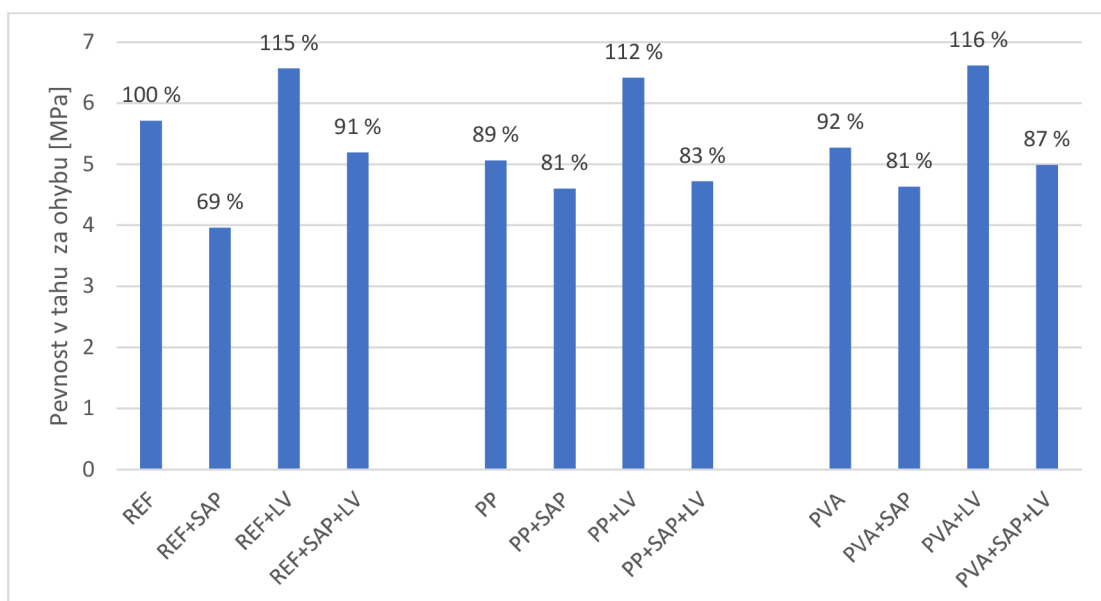
Pevnost v tahu za ohybu

Po změření rozměrů a zaznamenání hmotností vzorků pro výpočet objemové pevnosti byla provedena zkouška pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem. Byla provedena stejně jako v 1. etapě normovým postupem uvedeným v ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Stanovené pevnosti jsou zaznamenány v tabulce č. 13 a porovnány mezi sebou a procentuálně s referenčním vzorkem v grafu č. 19.

Tabulka 13: Naměřená pevnost v tahu za ohybu na vzorcích 2. etapy zkoušení po 28 dnech zrání

	R_f
REF	5,71
REF+SAP	3,96
REF+LV	6,57
REF+SAP+LV	5,19
PP	5,06
PP+SAP	4,6
PP+LV	6,42
PP+SAP+LV	4,72
PVA	5,27
PVA+SAP	4,63
PVA+LV	6,62
PVA+SAP+LV	4,99

Graf 19: Porovnání pevnosti v tahu vzorků 2. etapy zkoušení



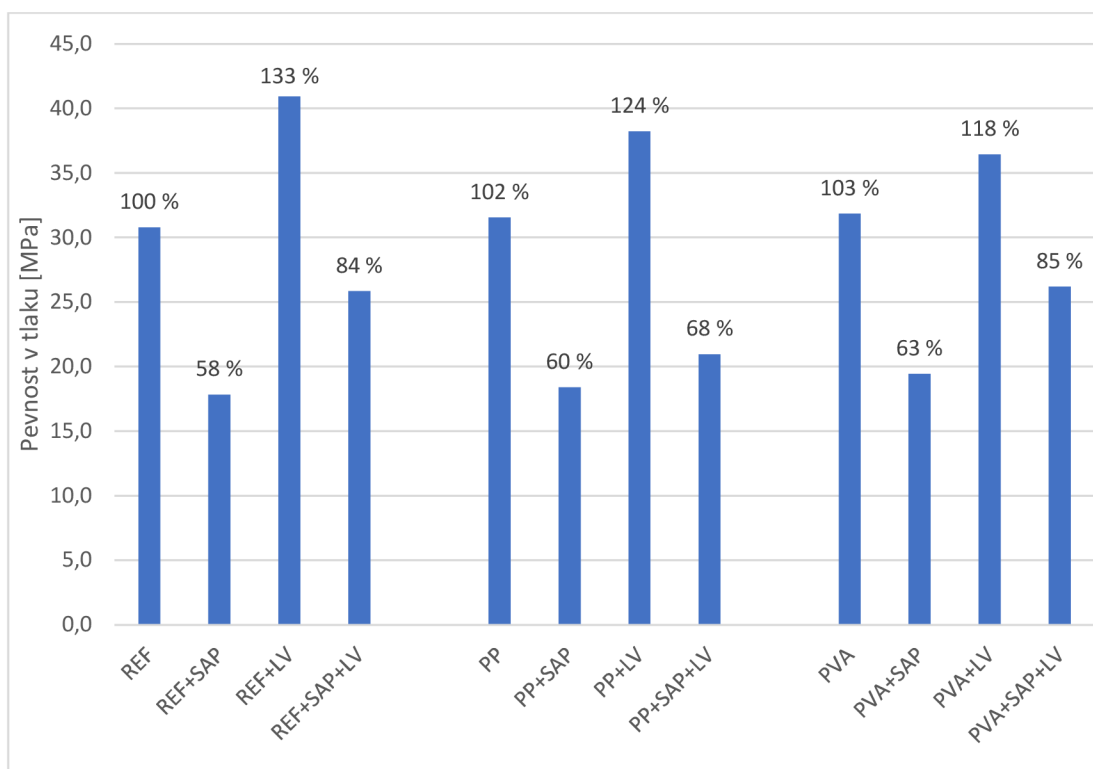
Pevnost v tlaku

Na části polovin trámeček byla následně stanovena pevnost v tlaku dle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Výsledky jsou opět uvedeny v tabulce a grafu níže.

Tabulka 14: Stanovené pevnosti v tlaku na vzorcích 2. etapy zkoušení po 28 dnech

	R_c
REF	30,8
REF+SAP	17,8
REF+LV	40,9
REF+SAP+LV	25,8
PP	31,6
PP+SAP	18,4
PP+LV	38,2
PP+SAP+LV	21,0
PVA	31,8
PVA+SAP	19,4
PVA+LV	36,4
PVA+SAP+LV	26,2

Graf 20: Porovnání pevnosti v tlaku vzorků 2. etapy zkoušení po 28 dnech



5.2.4. Příprava vzorků před samohojením

Způsobů, jak ověřovat schopnost konstrukce samohojit se je nespočet. Téměř každá práce na toto téma přijde s novým způsobem. Pro tuto problematiku neexistují žádné normy a autoři ve svých pracích používají takové zkoušky, které podle nich nejvíce zaznamenají samohojení daného prvku. Pro tuto práci byla zvolena kombinace několika způsobů tak, aby byla tato problematika zaznamenána co možná nejobsáhleji.

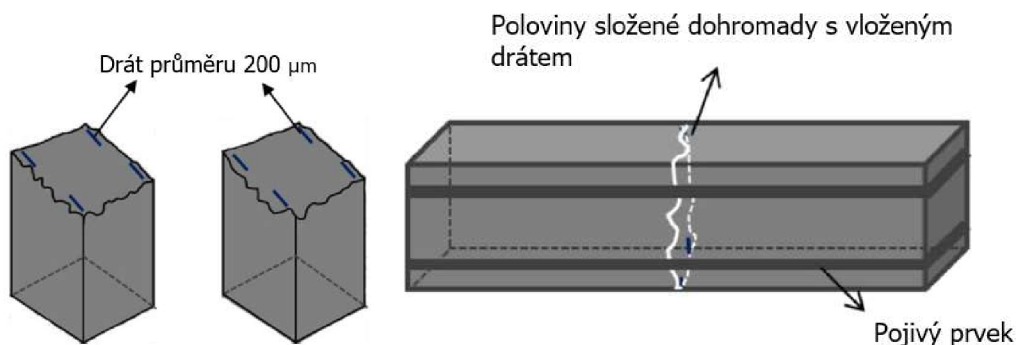
Pro zkoušky samohojení byly využity trámečky, které byly po 28 dnech rozlomeny při stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Z řady používaných postupů byly zvoleny dva níže popsané.

Prvním typem zkoušení bylo pozorování procentuálního zacelení trhliny o konstantní šířce. Výsledná hodnota byla udávána v %, přesněji o kolik procent se zmenšila plocha trhliny po uplynutí stanovené doby.

Poloviny trámečků byly pečlivě znovu sestaveny s drátem vloženým po bocích trhliny. Pro přípravu těchto vzorků byl využit nerezový drát o průměru 200 μm . Takto byla zajištěna trhlina s poměrně konstantní šíří.

Výroba zkušebních vzorků je znázorněna na obrázku č. 32 převzatého se zahraniční literatury.

Obrázek 32: Příprava vzorků s konstantní šíří trhliny



Zdroj: ZHENG T., QIAN CH., SU Y., (2021). Influences of different calcium sources on the early age cracks of self-healing cementitious mortar.

Druhý způsob stanovení efektivity samohojení bylo určení maximální šířky trhliny, kterou je daný prvek ještě schopný zacelit.

Postup přípravy preparátů byl obdobný jako na obrázku výše. Drát byl však vložen jen na jednu stranu trhliny a v tomto případě byl použit nerezový drát průměru 600 μm . Vznikla tak rozšiřující se trhlina opět s poměrně konstantními rozměry, kdy na délce hrany 40 mm docházelo k zúžení trhliny ze 600 μm na 0 μm . Po samohojení bylo stanoveno, do jakého rozpětí trhliny došlo ke kompletnímu zaplnění.

Jako pojivý prvek u obou druhů preparátů byly použity kaučukové gumičky o síle 4 mm a průměru 8 cm.

Obrázek 33: Ukázka připravených vzorků po sestavení polovin



Zdroj: Vlastní foto

Všechny připravené vzorky byly vyfoceny ve vysokém rozlišení z konstantní výšky, s konstantním přiblížením a s přiloženým měřítkem pro ověření kontinuity. Tyto fotky budou po uplynutí 28dní samohojení znovu pořízeny a dle porovnání snímků bude stanoven výsledek experimentu.

Po nafocení byly vzorky uloženy do vodního prostředí tak, aby se vzájemně nedotýkaly a voda měla rovný přístup ke všem vzorkům. Ponechány ponořeny byly uloženy po dobu 28 dní.

5.2.5. Zkoušení těles po samohojení

Vzorky byly ponechány ve vodním prostředí v oddělených nádobách dle záměsí. Voda byla kontrolována a doplňována do stálé hladiny tak, aby byly vzorky neustále ponořeny. Tento stav je v běžné praxi téměř nereálný. Velmi výjimečně bude celá konstrukce ponořena pod vodu, aby byl procesu samohojení dodáván dostatek vody. Přesto je ale tento způsob zkoušení používán ve všech výzkumech a pracích. Vliv vodního prostředí je konstantní, a tudíž opakovatelný a porovnatelný, a navíc se jedná o formu zrychlení procesu samohojení, které by v praxi probíhalo postupně v delším časovém úseku vždy po dodání vlhkosti.

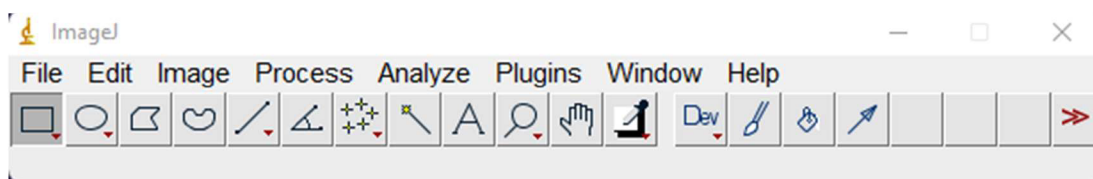
Po uplynutí stanovené doby 28 dní samohojení byly vzorky vyjmuty z vodního prostředí a povrchově osušeny. Poté byly vzorky znovu nafoceny stejným způsobem jako před uložením do vodního prostředí. To znamená zachyceny z konstantní výšky se shodným přiblížením.

Procento zacelení konstantní trhliny

U vzorků s konstantní šířkou trhliny bylo porovnáno, o jaký procentní podíl byla při samohojení zúžena či uzavřena. Pro analýzu snímků byl použit program ImageJ. Jedná se o program pro zpracování obrazu vyvinutý na univerzitě ve Wisconsinu. Byl původně vytvořen pro zpracování a analyzování snímků z rastrovacího mikroskopu. ImageJ umí otevřít širokou škálu formátů obrazů, které mimo jiné dokáže zobrazovat, upravovat, analyzovat, zpracovávat, ukládat a tisknout. Pro použití v této práci byla klíčová schopnost vypočítat statistiku plochy a hodnoty pixelů uživatelem definovaných výběrů a objektů s prahovou hodnotou intenzity. [50]

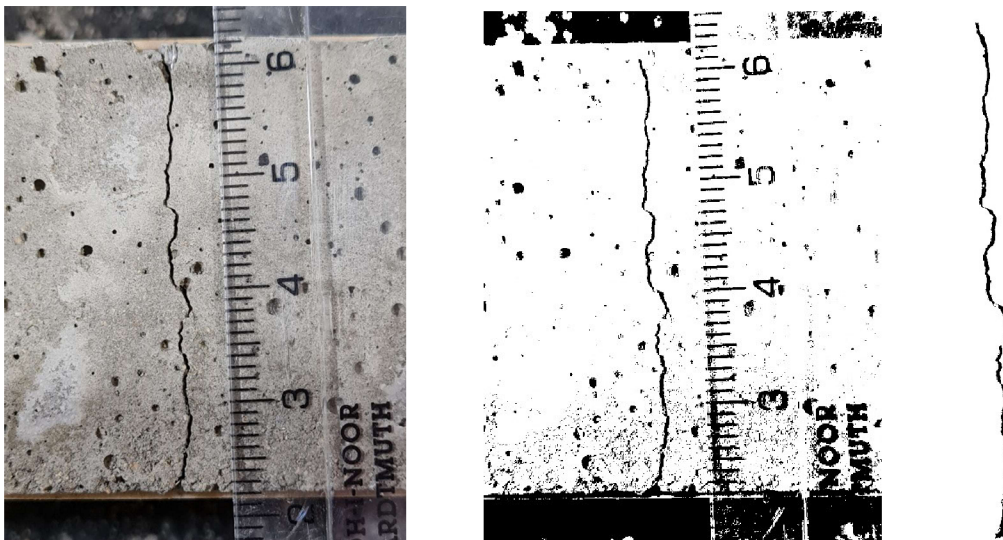
Snímky trhlin byly převedeny do 8bitových obrazů a po úpravě prahu intenzity byla izolována trhlina a pomocí analýzy vybrané oblasti bylo stanoveno množství pixelů v ploše. Toto bylo provedeno jak pro snímek před, tak i po samohojení. Jednoduchým porovnáním těchto dvou hodnot bylo stanoveno o kolik procent se trhlina zúžila.

Obrázek 34: Příkazová lišta programu ImageJ



Zdroj: Vlastní snímek obrazovky při užití programu ImageJ

Obrázek 35: Ukázka procesu úpravy snímku



Zdroj: Vlastní foto

Obrázek 36: Tabulka s výsledky analýzy trhliny před a po samohojení

File	Edit	Font				
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mea	
bin REF+LV 5.jpg	24	74255	3093.958	34.735	255	
REF+LV 5 trhlina po hojení.jpg	20	58331	2916.550	12.601	67.1	

Zdroj: Vlastní snímek obrazovky při užití programu ImageJ

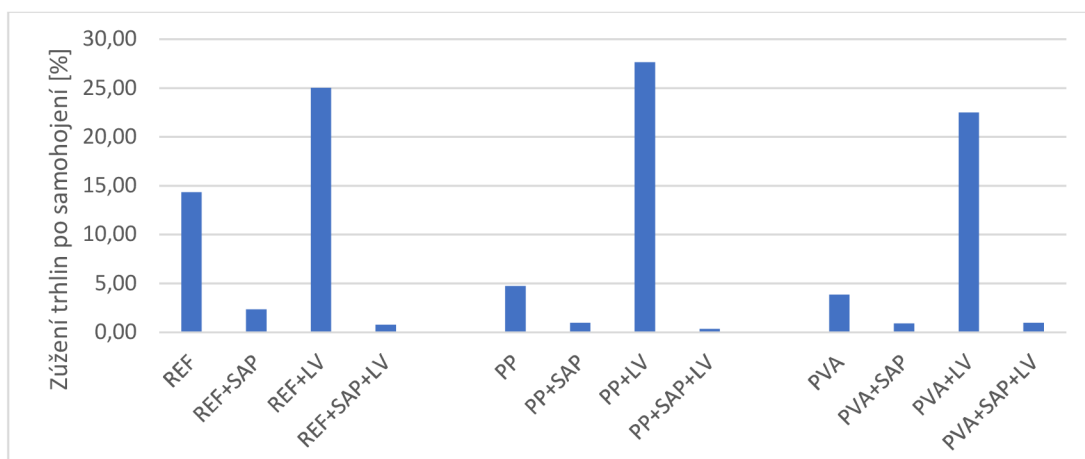
Pro výsledný výpočet byla stěžejní hodnota celkové plochy (Total Area) udávající plochu trhliny v množství pixelů. V případě zobrazených výsledků hojení trhliny u vzorku REF+LV 5 byl výsledek samohojení zúžení trhliny o 21,45 %.

Výsledky byly zprůměrovány a uvedeny v tabulce č. 15. Obrázek č. 22 ukazuje porovnání dvojic trhlin před a po samohojení u záměsí, které prokázaly schopnost zacelit trhlinu o více jak 1 %.

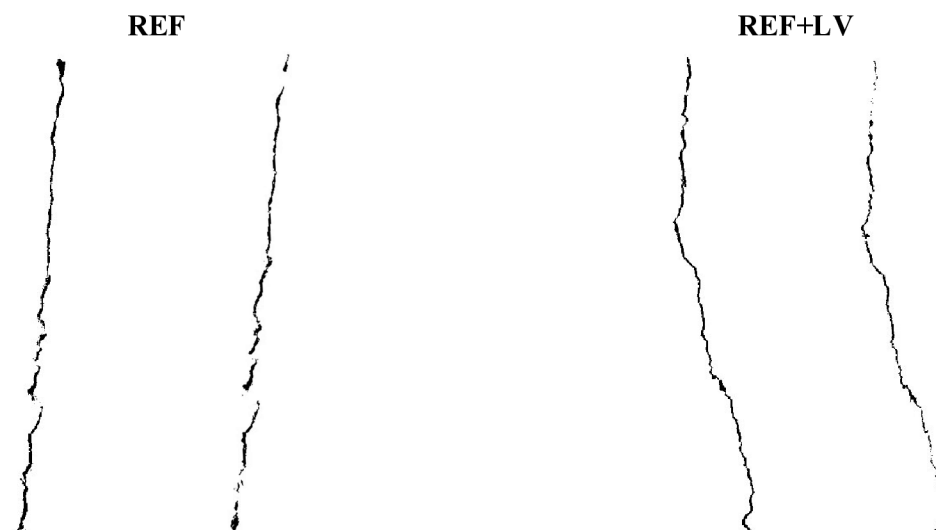
Tabulka 15: Výsledky zúžení trhlin o konstantní šířce po 28 dnech samohojení

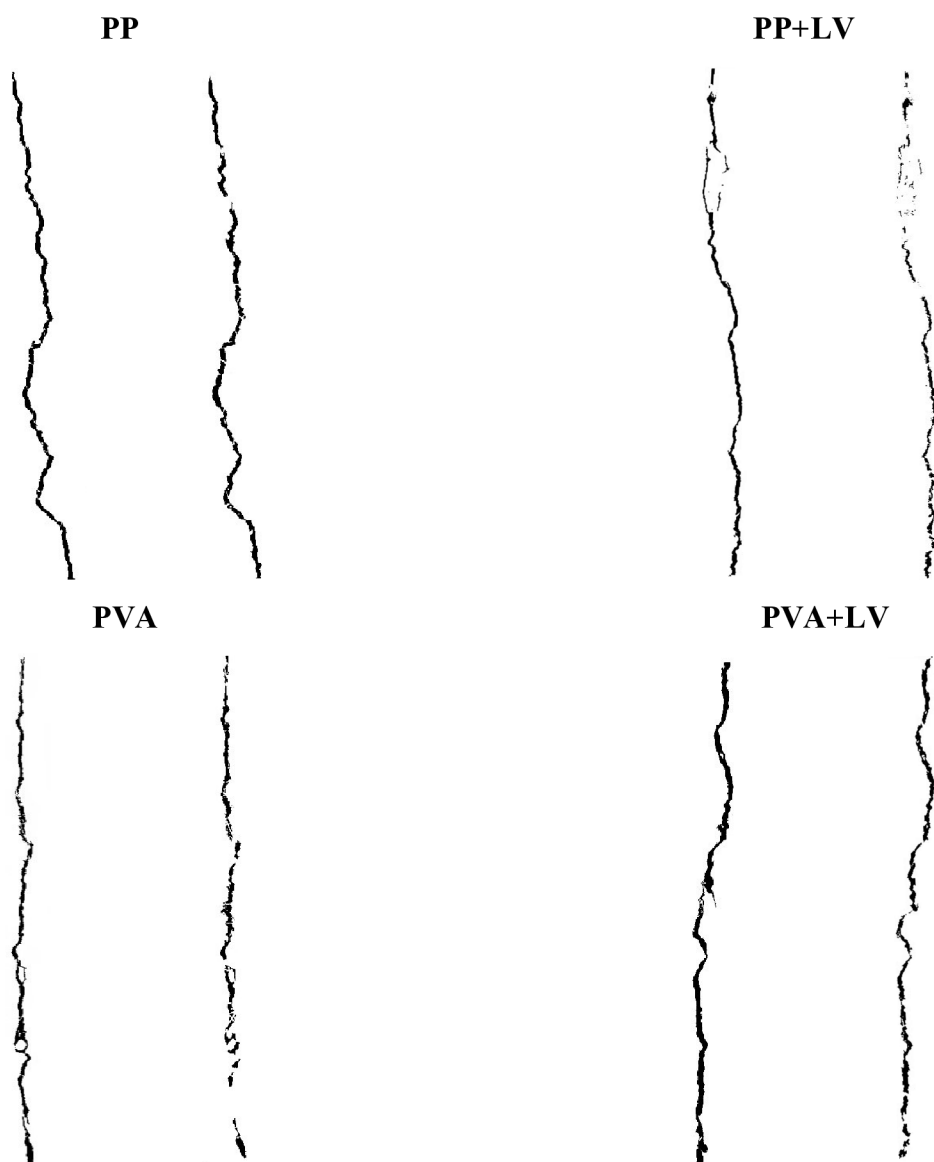
Záměs	Zhojení [%]
REF	14,32
REF+SAP	2,34
REF+LV	25,02
REF+SAP+LV	0,76
PP	4,74
PP+SAP	0,96
PP+LV	27,64
PP+SAP+LV	0,34
PVA	3,83
PVA+SAP	0,90
PVA+LV	22,49
PVA+SAP+LV	0,97

Graf 21: Porovnání výsledků zúžení trhlin s konstantní šířkou



Obrázek 37: Snímky izolovaných trhlin před (vlevo) a po samohojení (vpravo) u vzorků, které prokázaly určitou míru zúžení





Zdroj: Vlastní foto upravené v programu ImageJ

Maximální šířka zacelení trhliny

Pro analýzu vzorků s rozšiřující se trhlinou byl také využit program ImageJ pro jeho přesné měřicí vlastnosti. Snímky trhlín před a po hojení byly porovnány a bylo určeno místo maximálního zacelení trhliny. Novotvary zpravidla vznikají od začátku trhliny a postupně zaplňují rozšiřující se prasklinu. Po určení místa maximálního zacelení byla pomocí funkce měření zjištěna šířka trhliny v množství pixelů. Déle bylo na daném snímku zjištěno množství pixelů v délce jednoho milimetru pro získání měřítka možnosti dopočítání šířky trhliny v milimetrech potažmo mikrometrech.

Obrázek 38: Ukázka volby nejširšího ještě zhojeného místa



Obrázek č. 39 zachycuje ukázkou tabulky s výsledky měření délky (Length) milimetru a rozpětí trhliny v pixelech.

Obrázek 39: Ukázka výsledků měření v programu ImageJ

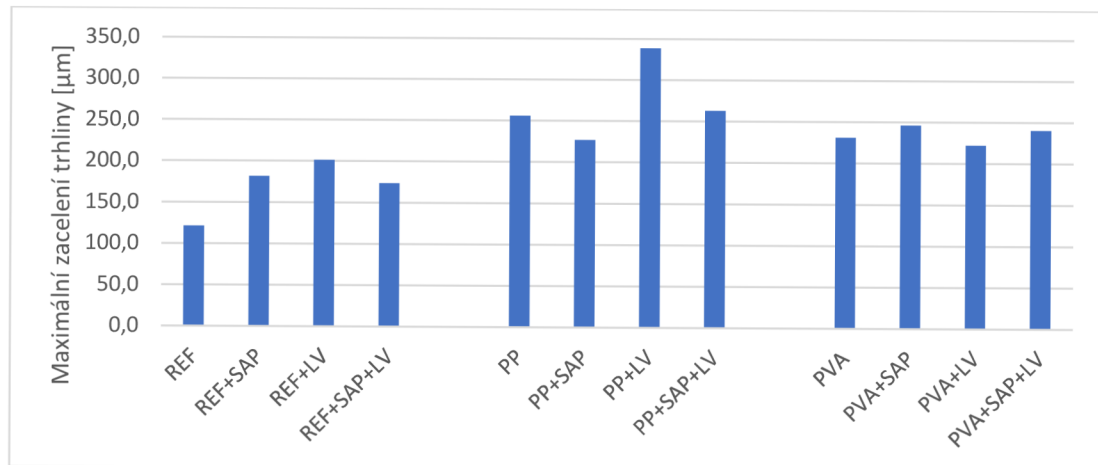
Results							
File	Edit	Font	Results				
	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length	
1	89	129.759	7.667	186.824	-87.623	88.409	
2	23	16.865	0.037	110.000	18.166	22.452	

Zdroj: Vlastní snímek obrazovky při užití programu ImageJ

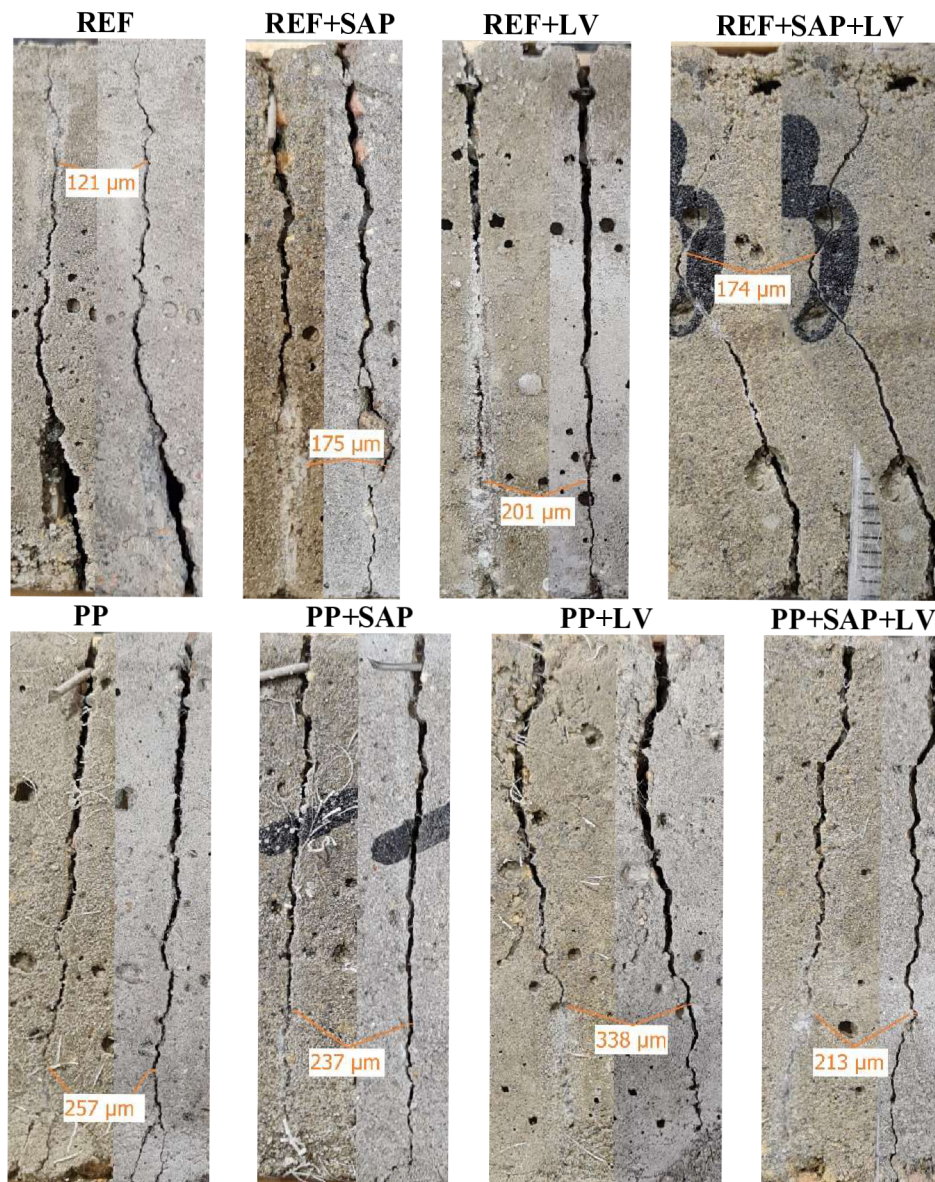
Tabulka 16: Výsledky měření maximálního zhojení trhliny

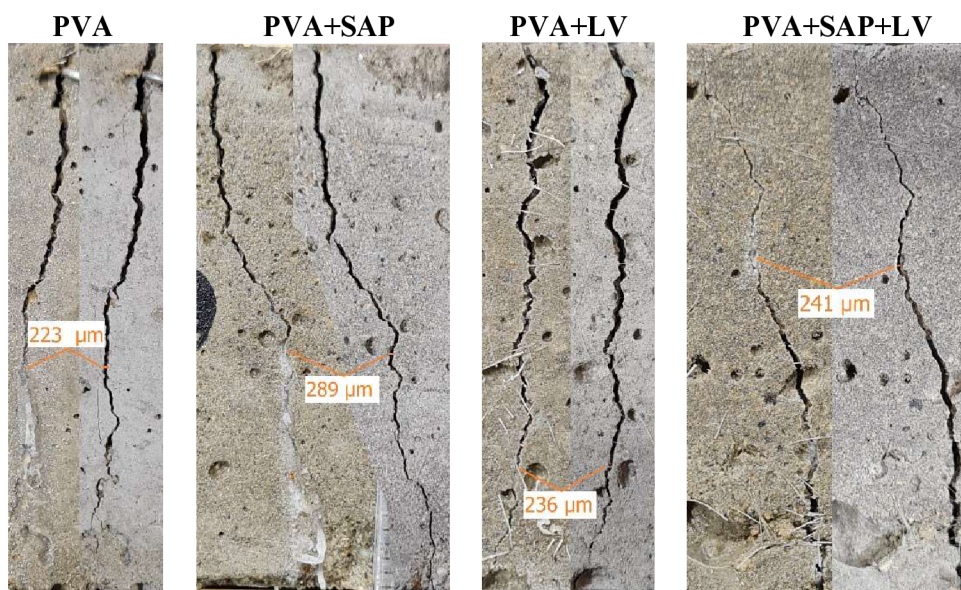
Záměs	Max. Rozpětí [μm]
REF	121,1
REF+SAP	181,4
REF+LV	201,5
REF+SAP+LV	173,5
PP	255,8
PP+SAP	226,8
PP+LV	338,4
PP+SAP+LV	263,1
PVA	231,0
PVA+SAP	246,1
PVA+LV	222,1
PVA+SAP+LV	240,5

Graf 22: Porovnání výsledků uvedených v tabulce č. 16



Obrázek 40: Zacelení trhlin u vzorků jednotlivých záměsí





Pozorování novotvarů pod mikroskopem

Zkušební vzorky byly kromě focení ve vysokém rozlišení zachyceny také digitálním mikroskopem KEYENCE VHX-6000.

Obrázek 41: Použitý mikroskop KEYENCE VHX-6000



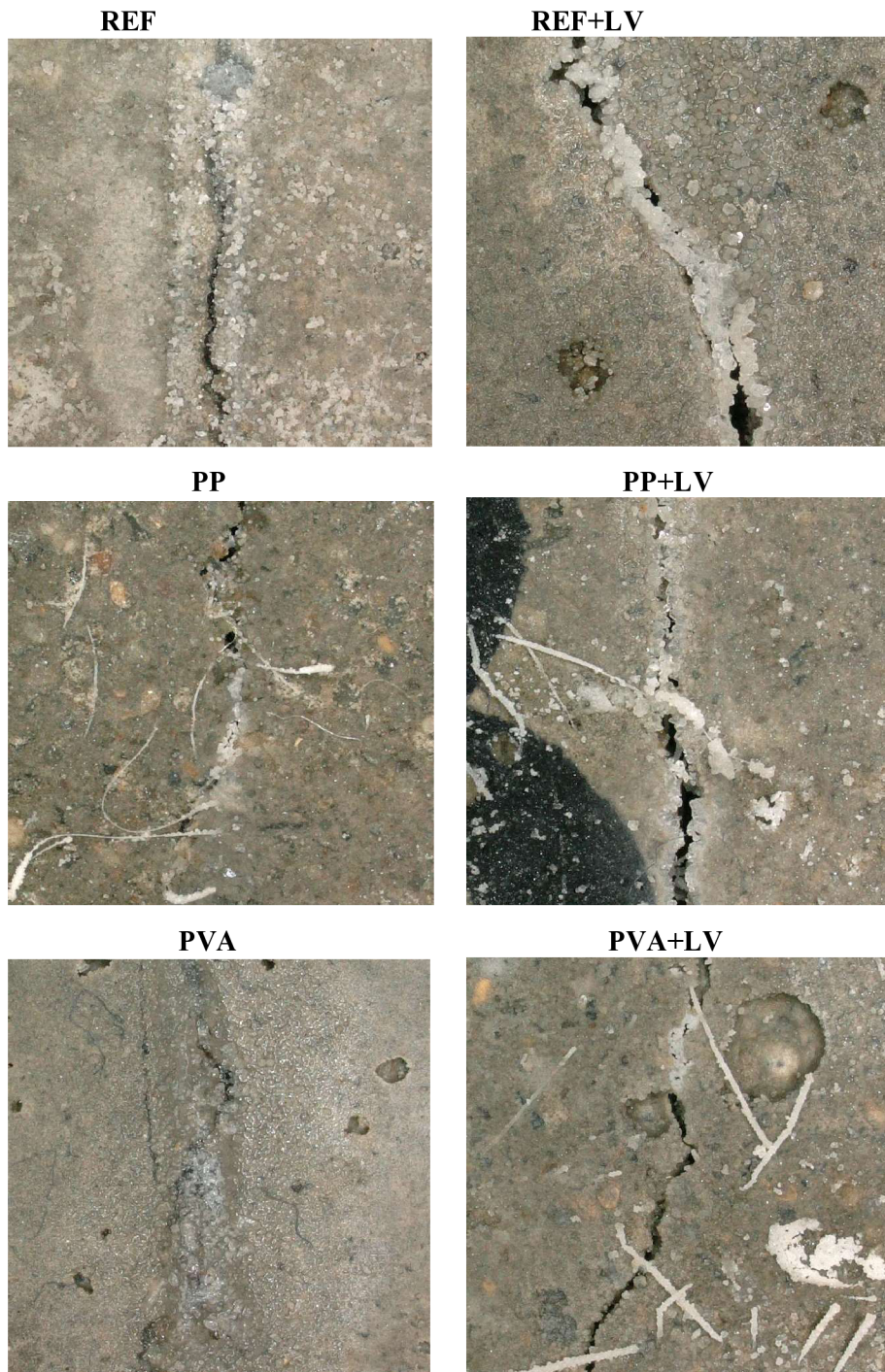
Zdroj: keyence.eu

Krystaly uhličitanu vápenatého byly zaznamenávány ve třech zvětšeních. Byly pořízeny snímky v přiblížení 20x, 100x a 200x. Nejedná se o velké rozlišení, ale snímky umožní určit, zda vliv přísady či materiálu vlákna mělo vliv na velikost či strukturu krystalu. Následující série obrázků zachycují vzorky jednotlivých záměsí v daných přiblíženích a porovnávají je mezi sebou.

Porovnání snímku ukázalo, že přidání laktátu vápenatého mělo za následek růst krystalů větší velikosti v porovnání se záměsemi bez laktátu. Vzorky s přídavkem

SAPu neprokázaly rozdílné výsledky, co se týče velikosti krystalů. Toto pozorování je dobře zřetelné na snímcích ve 20násobném zvětšení.

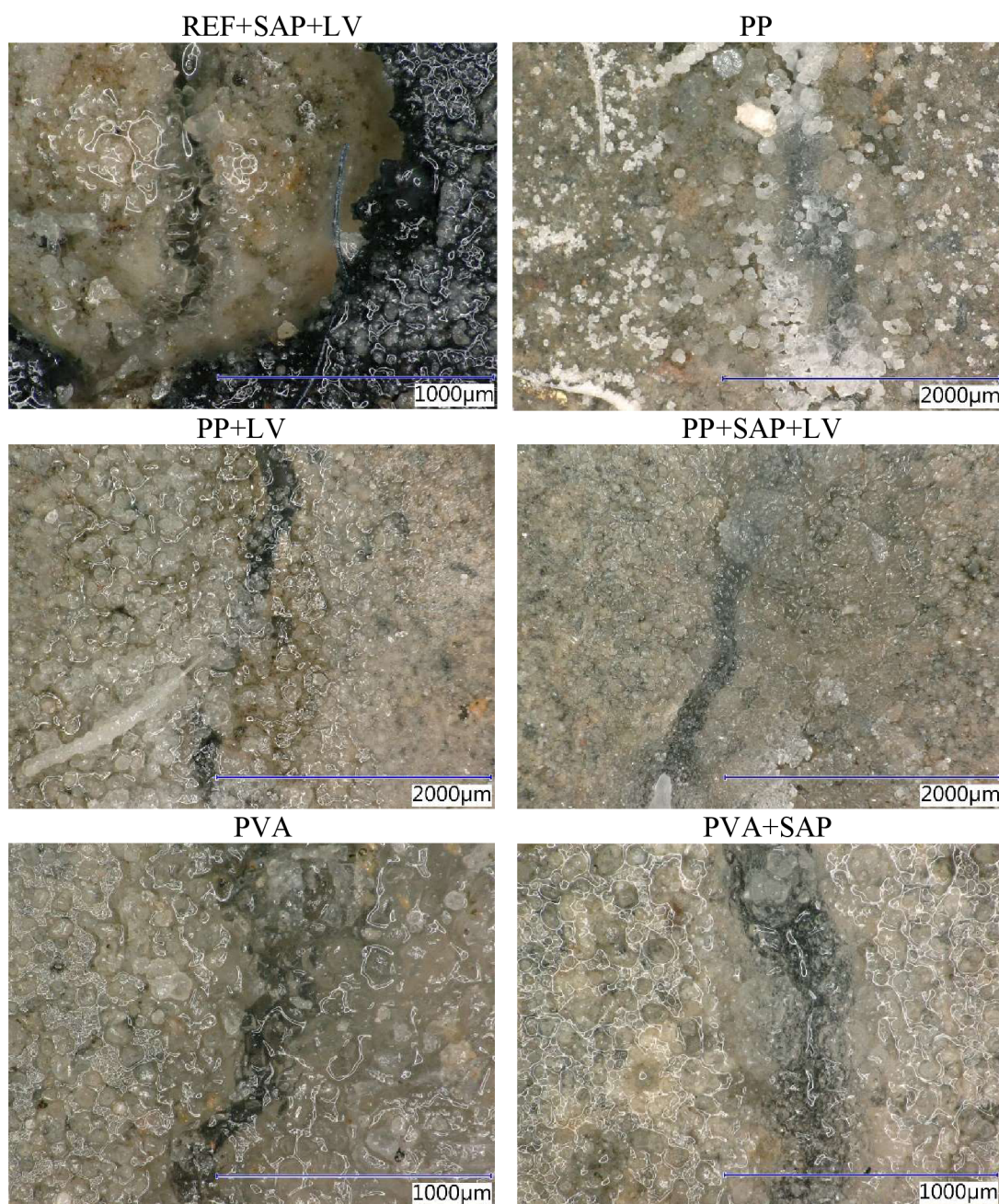
Obrázek 42: Porovnání záměsí bez obsahu laktátu vápenatého a s ním na snímcích se zvětšením 20x.



Zdroj: Vlastní foto

Snímky na obrázku č. 42 ukazují plně nezhojené trhliny, na kterých je vidět velikost krystalů. Následující snímky ukazují plně uzavřenou trhlinu, kde již není vidět rozdíl mezi záměsí s a bez laktátu.

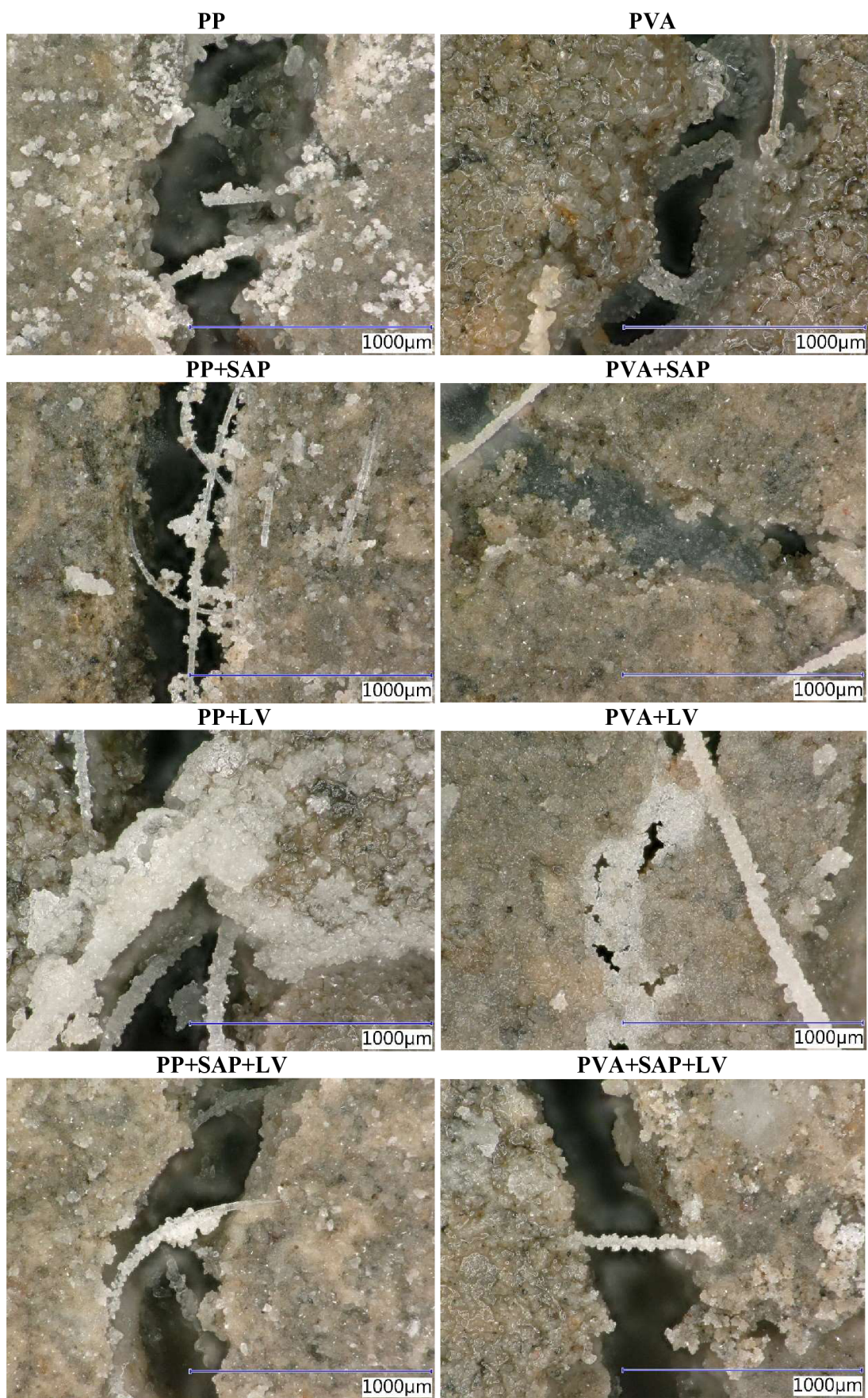
Obrázek 43: Snímky kompletně zacelených trhlin ve zvětšení 100x a 200x.



Zdroj: Vlastní foto

V teoretické části bylo zmíněn rozdíl v růstu a velikosti krystalů při užití PP nebo PVA vláken. Mikroskopické snímky ze zkoušených prvků neprokázaly zřetelný rozdíl ve velikosti krystalů, ze snímků mikrovláken ale vyplývá, že PVA vlákna sloužila jako kvalitnější zárodek pro nové krystaly. Jak je zachyceno na snímcích níže, PP vlákna jsou novými krystaly v trhlinách obalena méně, a ne vždy po celém povrchu. PVA vlákna na obrázcích jsou jednolitě obalena hustou sítí krystalů jak na povrchu vzorků, tak i uvnitř trhliny.

Obrázek 44: Snímky vzorků s PP a PVA vlákny ve zvětšení 200x



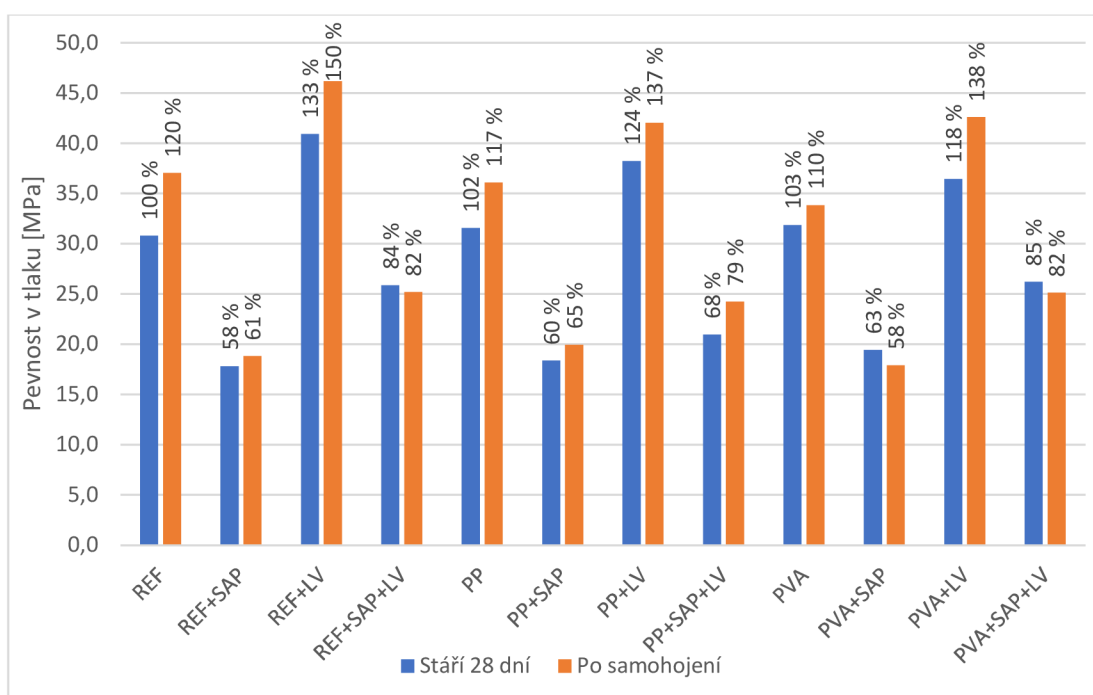
Pevnost v tlaku

Po zachycení všech snímků byly vzorky rozloženy a byla provedena konečná zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Konečné výsledky pevnosti jsou uvedeny v tabulce č. 17 spolu s výsledky pevností před samohojením. Procentuální porovnání výsledků mezi sebou stejně jako vůči pevnostem před samohojením je znázorněno v grafu č. 23. Jako hodnota 100 % je uvedena pevnost referenčního vzorku před samohojením.

Tabulka 17: Pevnosti v tlaku po 28 dnech a po následném samohojení po dobu 28 dní

	R_c	$R_{c\text{-hoj}}$
REF	30,8	37,0
REF+SAP	17,8	18,8
REF+LV	40,9	46,2
REF+SAP+LV	25,8	25,2
PP	31,6	36,1
PP+SAP	18,4	19,9
PP+LV	38,2	42,0
PP+SAP+LV	21,0	24,2
PVA	31,8	33,8
PVA+SAP	19,4	17,9
PVA+LV	36,4	42,6
PVA+SAP+LV	26,2	25,1

Graf 23: Porovnání pevností v tlaku před samohojením a po 28 dnech samohojení



5.2.6. Diskuse výsledků 2. etapy zkoušení

Výsledky zkoušení vzorků v 2. etapě praktické části potvrdily některé výsledky uváděné v teoretické části, a naopak některé neprokázaly.

Pro porovnání bylo navrženo 12 receptur. Pro záměsi s přídavkem SAPu bylo dle zkušeností z 1. etapy použito dodatečné množství vody pro absorpci do polymeru. Proto pro záměsi s přídavkem i bez přídavku SAPu byly výsledky rozlití na střešacím stolku odpovídající. Pro záměsi s přídavkem mikrovláken bylo mírně navýšeno množství vody pro dosažení odpovídající zpracovatelnosti. Zajímavým poznatkem byl vliv laktátu vápenatého na rozlití zkoušených směsí. U všech směsí i u záměsí se SAPem poměrně výrazně zlepšil zpracovatelnost. Jeho použití v záměsí betonu by tedy umožnilo snížení množství záměšové vody za stejné zpracovatelnosti jako ukázala referenční směs.

Navržené receptury a vodní součinitele stejně jako normový postup míchání byly dostatečné pro pravidelné rozmísení mikrovláken v záměsí. Tento záměr ukázalo pozorování rozlámaných testovacích koláčů zavadlé směsí.

Při míchání záměsí s přídavkem SAPu je do směsí přidáváno podstatně větší množství vody, které je při míchání absorbováno. Tato voda ve vzorku zůstává podstatně delší dobu. Detailní měření vývoje objemových hmotností vzorku bez a s přídavkem absorpčního polymeru ukázalo, že referenční vzorek vysychá do ustálené hmotnosti asi 38 hodin, kdežto vzorek s dávkou SAPu 0,5 % z hmotnosti cementu vysychá až 130 hodin. Tento jev může být velmi žádaný především v letních měsících, kdy takovéto samoošetřování tvrdnoucího betonu bude velkou výhodou.

Po 28 dnech zrání byl velmi výrazný vliv SAPu na objemovou hmotnost. Větší množství záměšové vody absorbované v polymeru vytvořilo rozměrné gelové částice, které po vytvrnutí vzorků a desorpci vody ponechalo vzorky s výrazně nižší objemovou hmotností u všech záměsí, které byly doplněny o SAP. Přídavek absorpčního polymeru snížil objemovou hmotnost průměrně o 8 % v porovnání s referenční záměsí.

Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu opět ukázalo příznivý vliv laktátu vápenatého. Zde se jednalo především o charakter jemného prášku, který vytvořil hutnější strukturu, která lépe odolala tahovým zatížením. Kromě záměsí s přídavkem pouze LV, kde

došlo ke zvýšení kolem 15 %, došlo u všech záměsí v porovnání s referenční směsí ke snížení pevnosti v tahu za ohybu. Nejnižších pevností dosáhly záměsí s přídavkem SAPu. Póry vzniklé desorpcí molekul absorpčního polymeru vytvořili defekty, které snížily pevnost v tahu. Snížení pevnosti v tahu u vzorků s vlákny bez přídavků SAPu může být způsobeno dodatečným vzduchem, který je do směsi vnesen při mísení vláken ve směsi. Směs s kombinací SAPu a LV prokázala jen o málo vyšší pevnosti než záměs se samotným SAPem. Příznivý efekt jemné příměsi tedy téměř nevyvážil negativní efekt sítě volných pórů po desorbované vodě.

Téměř stejných výsledků, co se týče rozdílů oproti referenci bylo dosaženo při porovnání výsledků pevnosti v tlaku po 28 dnech. Záměsí s LV prokázaly až o 33 % vyšší pevnost než referenční vzorky. Naopak přidání super absorpčního polymeru snížilo pevnost na průměrně 60 % hodnoty pevnosti referenčního vzorku. Vzorky pouze s vlákny na rozdíl od pevnosti v tahu za ohybu vykazaly téměř shodnou pevnost v tlaku. Přidání LV do záměsí s absorpčním polymerem zde zmírnilo negativní efekt absorbentu výrazněji, pořád ale vzorky vykazaly výrazně nižší pevnost v tlaku než referenční.

Po rozlomení trámečků byly prvky sestaveny a na části bylo provedeno pozorování zacelení trhliny o konstantní šířce 200-300 μm a na druhé části bylo stanoveno jaká šířka trhliny byla ještě zhojena v rozšiřující se trhlíně. Ty postupovaly od nulového rozpětí až do šířky 600-800 μm na konci trhliny.

Výsledky prvního pozorování, a to pozorování zúžení či zacelení trhliny vyšly poměrně jasně. Záměsí s přídavkem SAPu, ať už samotného či v kombinaci s LV neměly prakticky žádný vliv na šířku trhliny ani po 28 dnech ve vodním prostředí. Vzorky referenční a pouze s vlákny bez přísad dosáhly určitých zacelení, avšak všechny záměsí s přidaným zdrojem vápníku ve formě laktátu vápenatého prokázaly překvapivě vysokou schopnost uzavření trhliny. Nejvýraznější schopnost zacelení ukázala záměs PP+LV, která průměrně zmenšila plochu trhliny o 27,64 %.

U zkoušek zacelení maximálního rozpětí nebylo dle očekávání dosaženo hodnot, které při shodných zkouškách získávaly bakteriální samohojivé kompozity. Ty v uvedených pracích dosahovaly zacelení například trhliny až 600 μm široké. U ostatních směsí

ale autoři dosahovali zacelení v řádu 200-300 μm . To odpovídá i výsledkům získaným v této práci. Poměrně zřetelně byl také prokázán vliv přídavku mikrovláken na samohojení, neboť všechny záměsi s mikrovláknem prokázaly lepší výsledky. Stejně jako u předchozí zkoušky nejlepšího výsledku dosáhl vzorek PP+LV, který kompletně zacelil trhlinu o rozpětí průměrně 338,4 μm . U této jediné zkoušky navíc výsledky ukázaly příznivý vliv všech použitých přísad, neboť referenční vzorek prokázal nejnižší výsledek.

Pozorování zhojených vzorků pod digitálním mikroskopem přineslo zjištění, že přídavek laktátu vápenatého poměrně výrazně zvyšuje růst krystalů uhličitanu vápenatého a že nově vzniklé krystaly mají u těchto záměsí větší velikost. Přídavek SAPu neprokázal žádný pravidelný vliv na růst či velikost krystalů.

Pozorování krystalů uhličitanu vápenatého na povrchu a okolí mikrovláken ale částečně potvrdilo závěry autorů Fengema a spol., že PVA vlákna poskytují lepší základ pro růst krystalů uhličitanu vápenatého. Autoři ve své práci nechávali na mikrovláknech růst novotvary uhličitanu vápenatého v roztoku a došli k závěru, že na PVA vláknech v porovnání s PP vlákny vznikají také krystaly větších rozměrů. To se ale při pozorování krystalů na cementovém kompozitu nepotvrdilo. I přesto, že PVA mikrovlákna poskytovala lepší základ pro růst krystalů, jak již bylo zmíněno výše, celkově lepších samohojivých vlastností dosáhly vzorky záměsí PP+LV.

Poslední provedenou zkouškou bylo opětovné provedení pevnosti v tlaku, tentokrát ale na vzorcích po procesu samohojení. Zde výsledky ukazují poměrně výrazný nárůst pevnosti většiny záměsí. Výjimkou jsou směsi obsahující SAP. Ty vykazaly pouze mírné navýšení a v některých případech i dokonce snížení pevnosti v tlaku po samohojení. U zbylých záměsí byl nárůst podstatnější. Nárůsty se pohybovaly okolo 15 až 20 % v porovnání s hodnotami před samohojením. Záměs REF+LV dosáhla nejvyšší konečné pevnosti a výsledek ukázal hodnotu odpovídající 150 % pevnosti referenčního vzorku před samohojením. Výrazné navýšení pevnosti u záměsí s LV ukazuje, že vyšší pevnost těchto záměsí nebyla zapříčiněna pouze přídavkem jemné přísady, která ztuhlila matici, ale také vlivem LV na dodatečnou krystalizaci uhličitanu vápenatého, který zaplnil póry a dále zvýšil pevnost v tlaku.

ZÁVĚR

Diplomová práce volně navazovala na bakalářskou práci, která se zabývala vláknobetonem a novými trendy v jeho použití. Jako jeden z nových slibných trendů v ní byl zmiňován samohojivý vláknobeton.

V teoretické části práce byly představeny principy samohojení, a hlavně v jednotlivých kategoriích rozebrány vlivy jak vláken, tak bakterií, super absorpčních polymerů či dodatečných zdrojů vápníků především ve formě laktátu vápenatého.

V první kapitole byl uveden postup přípravy vláknobetonu, zkráceně uveden postup výroby mikrovláken podrobně uvedený v předcházející bakalářské práci, a hlavně byl podrobně popsán rozdíl mezi užitím mikrovláken z polypropylenu a polyvinyl propylenu. V této problematice mezi autory panuje neshoda. Dle některých není rozdíl mezi materiálem mikrovláken, kdežto velká část se shoduje, že PVA vlákna jsou pro samohojivý beton vhodnější. Tato teorie byla testována v praktické části práce.

Druhá kapitola pojednává o vlivu bakterií na samohojení betonu. Představuje možnosti jejich použití a uvádí nejčastěji používané druhy bakterií používaných v publikacích. Bakterie jsou v této práci řešeny pouze teoreticky. Jejich vliv není ověřován v praktické části práce.

Třetí kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly. První popisuje možný vliv super absorpčních polymerů na samohojivé vlastnosti. Ze všech zmiňovaných přísad je tato nejrizikovější. I přes závěry některých autorů, že přidání nižších množství nesnižuje mechanické vlastnosti betonové konstrukce se většina autorů shoduje na výrazném snížení pevností a dalších základních vlastností konstrukce již při nižších dávkách. Tento negativní vliv byl potvrzen i praktickou částí této práce, která závěry uvádí níže. I přes negativní vliv na mechanické vlastnosti cementového kompozitu jsou v publikacích uváděny kladné vlivy na schopnost samohojení, což byl důvod zvolení této přísady pro zkušební záměsi. Druhá podkapitola a poslední část teoretické části práce představuje novinku na poli přísad do betonu, které mohou podpořit samohojivé vlastnosti. Dodatečné zdroje vápníku, a především laktát vápenatý byly v prvních publikacích přidávány v živném roztoku bakterií, ale ukázalo se, že mají kladný vliv na samohojení i jako samostatná přísada. Dodatečný zdroj vápníku podpoří růst uhličitanu vápenatého, pro jehož růst jsou odebírány ionty Ca^+ z konstrukce.

Praktická část byla rozdělena na dvě etapy. V první byl ověřen vliv superabsorpčního polymeru na mechanické vlastnosti cementového kompozitu. Následně byla pozorována změna vlastností v závislosti na dávce SAPu. Z těchto výsledků se poté stanovila dávka SAPu, která byla použita pro druhou etapu zkoušení a také bylo určeno, jaké množství dodatečné vody se musí do směsi přidat pro zachování zpracovatelnosti.

Druhá, hlavní, etapa se zaměřila především na schopnost zacelení potažmo zmenšení praskliny v betonové konstrukci. Byly využity postupy již dříve zmíněné v publikacích či od nich odvozené pro možnost snadného porovnání výsledků a také pro potenciální budoucí návaznost na toto téma. Na téma zkoušení samohojení či samohojivý beton jako takový neexistují normy či zkušební postupy. Proto jsou voleny takové postupy, které dle názoru daného autora práce dovedou nejlépe demonstrovat schopnost konstrukce zacelit mikrotrhlinu v reálném prostředí.

Práce se zaměřila na určení samohojivých vlastností 12 záměsí. Záměsí byly voleny jako kombinace přídavku dvou druhů mikrovláken, absorpčního polymeru a laktátu vápenatého. Záměrně nebyla volena záměs s bakteriálním roztokem. Bakteriální samohojivý beton dle všech výzkumů dosahuje vyšší úrovně samohojení, ale jeho příprava je zatím možná především v laboratorním prostředí. Tvorba živného roztoku a dalších příprav není prakticky realizovatelná na klasických betonárnách. Proto byly voleny pouze obecně dostupné suché přísady, které mohou být bez větších problémů zapojeny do velkoobjemové výroby betonu.

Na základě provedených zkoušek a vyhodnocených výsledků diplomové práce lze vyvodit tyto závěry:

- Při přidání SAPu do betonové směsi je nutné přidat 45 g vody na 1 g absorbentu pro zamezení odebrání záměsové vody potřebné pro hydrataci cementu a zhoršení zpracovatelnosti.
- Nutné přidání 45 g vody/g SAPu je vyšší, než uvádí zahraniční literatura. Ta pracuje s hodnotami kolem 30 g vody/1 g SAPu.
- Se zvyšujícím se množstvím SAPu dochází ke snížení objemové hmotnosti. Toto snížení je výraznější u vyšších dávek SAPu. Do dávky 0,9 % z hmotnosti cementu je snížení objemové hmotnosti do 10 % v porovnání s referenčním vzorkem.

- Se zvyšující se dávkou SAPu dochází k lineárnímu zvýšení nasákavosti. Dávka SAPu 1,2 % z hmotnosti cementu zvýšila nasákavost vzorku na 160 % referenční hodnoty.
- Nepotvrdila se teorie, že vyšší nasákavost, a tedy větší množství vody v konstrukci bude mít za následek delší dobu vysychání neboli delší dobu uchování vlhkosti. Objemová hmotnost vzorků se při pravidelném vážení ustálila téměř ve stejném čase. Prvky tedy nevysychaly déle, pouze při vysychání ztrácely větší množství vlhkosti.
- Pevnost v tahu za ohybu byla u vzorků s různým množstvím SAPu výrazně snížena až dávkami vyššími než 0,6 %.
- Pevnost v tlaku byla snížena úměrně množství absorbentu. Dávka SAPu 0,6 % snížila pevnost v tlaku vzorku na 75 % referenční hodnoty a dávka 1,2 % na pouhých 54 %. Pro využití v konstrukci tedy není doporučeno využití dávky přesahující cca 0,5 % z hmotnosti cementu.
- Při užití znalostí z 1. etapy zkoušení a dodání 45 g vody na 1 g SAPu u daných záměsí bylo dosaženo shodného rozlité na střešacím stolku, tudíž shodné konzistence. Této konzistence bylo dosaženo také u záměsí s mikrovláknou po mírném zvýšení vodního součinitele.
- Přidání LV do záměsí výrazně zvýšilo rozlité čerstvé směsi. Dávka 0,5 % z hmotnosti cementu zvýší rozlité asi o 20 mm u směsí bez dodatečného SAPu a o cca 30 mm u směsí s kombinací SAPu a LV. Přídavek LV tedy pozitivně ovlivňuje konzistenci.
- I když přídavek SAPu neovlivní rychlost vysychání po zatvrdnutí, velmi výrazně prodloužil dobu, po kterou voda setrvala v prvku při tuhnutí a tvrdnutí. Vlhkost z tvrdnoucího vzorku odcházela u záměsí se SAPem více jak 3krát déle, a tedy přídavek SAPu má výrazné samoošetřující vlastnosti.
- U všech záměsí, kde byl přidán laktát vápenatý byl zaznamenán nárůst pevnosti v tahu za ohybu. Výsledné pevnosti v tahu za ohybu se pohybovaly okolo 115 % referenční hodnoty.
- I v druhé etapě zkoušení byl potvrzen negativní vliv SAPu na pevnost v tlaku i tahu za ohybu.
- Laktát vápenatý výrazně zlepšil také pevnost v tlaku po 28 dnech. Zvýšení pevnosti dosáhlo hodnoty až 133 % v porovnání s referencí.

- Záměsi s přídavkem LV jako jediné prokázaly významnější schopnost zúžení, potažmo částečného uzavření trhliny o konstantním rozpětí. Nejlepšího výsledku dosáhla směs PP+LV, která plochu trhliny zmenšila o 27,6 % během 28 dní samohojení.
- Při pozorování maximálního rozpětí zacelené trhliny byly získány výsledky, které odpovídaly závěrům uvedeným v teoretické části.
- Žádná ze záměsí dle očekávání neprokázala samohojivé vlastnosti srovnatelné s bakteriálním betonem.
- Všechny záměsi s mikrovlákny dosáhly lepších výsledků než referenční směs.
- Přidání mikrovláken nejenže omezuje samotný rozvoj trhlin, mikrovlákna navíc po rozvoji trhlin slouží jako podklad pro růst krystalů uhličitanu vápenatého a pomáhají kvalitněji uzavírat trhlinu.
- Při pozorování novotvarů pod mikroskopem bylo prokázáno, že mikrovlákna z PVA slouží jako lepší podklad pro vznik zárodků. Vlákna z PVA byla oproti PP mikrovláknům lépe obalena krystaly.
- I přes tuto skutečnost nejlepších samohojivých schopností, co se týče maximálního zhojeného rozpětí dosáhla opět směs PP+LV.
- Zkouška pevnosti v tlaku po 28 dnech samohojení ukázala znatelný nárůst pevností u záměsí, které neobsahovaly SAP. U záměsí REF+LV bylo dosaženo pevnosti v tlaku až na úrovni 150 % referenční hodnoty před samohojením.

Celkově lze tedy shrnout, že přídavek super absorpčního polymeru nebyl přínosný pro samohojení a výrazně zhoršoval mechanické vlastnosti kompozitu. Není, proto tedy doporučeno jeho využití do samohojivých konstrukcí. Přídavek mikrovláken dle očekávání pozitivně ovlivnil schopnost konstrukce částečně uzavřít praskliny a je doporučeno jeho další využití v samohojivém betonu. Překvapivě pozitivních výsledků ale dosáhl laktát vápenatý, který se původně v publikacích přidával pouze jako živný roztok pro bakterie. V kombinaci s mikrovlákny dosáhl slibných výsledků a je doporučeno jeho další zkoumání.

Tato práce se nezabývala čistě přidáním laktátu vápenatého a je zde tedy možnost dalších pozorování v budoucích pracích. Bylo by vhodné porovnávat různá dávkování, sledovat mikrostrukturu uhličitanu vápenatého či se zaměřit na testování dalších dodatečných zdrojů vápníku. V této oblasti totiž může ležet další budoucnost samohojivého betonu.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] ZHENG, T., QIAN CH., SU Y., (2021). *Influences of different calcium sources on the early age cracks of self-healing cementitious mortar*. Biochemical Engineering Journal, č. 166, DOI: 10.1016/j.bej.2020.107849
- [2] LEE, Y.S., PARK, W., (2018) *Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete*, Appl. Microbiol. Biotechnol. č. 102, s. 3059–3070, DOI: 10.1007/s00253-018-8830-y
- [3] BAOGUO, H., XUN Y., JINPING O., (2014). *Self-Sensing Concrete in Smart Structures. Chapter 11.*, s. 362-373, ISBN 978-0-12-800517-0
- [4] DRY, C., (1994). *Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices*. Smart Mater. Struc. č. 3, s. 118-123. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/3/2/006>
- [5] CUENCA, E., FERRARA, L., (2017). *Self-healing Capacity of Fiber Reinforced Cementitious Composites. State of the Art and Perspectives*. 13 s. DOI 10.1007/s12205-017-0939-5
- [6] HEARN, N., MORLEY, C., (1997). *Self-sealing property of concrete – Experimental evidence. Materials and Structures*, č. 30, s. 404-411. <https://doi.org/10.1007/BF02498563>
- [7] MIHASHI, H., NISHIWAKI, T., HOMMA, D., (2009). *Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Journal of Advanced Concrete Technology, č. 7, s. 217-228, DOI:10.3151/jact.7.217
- [8] NAAMAN, A., E., (2018). *Fiber reinforced concrete: five decades of progress. 4th Brazilian Conference on Composite Materials*. Rio de Janeiro. 22 s. <https://doi.org/10.21452/bccm4.2018.02.01>
- [9] HELA, R., (2007). *Technologie betonu II, Modul M 01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAST
- [10] DOKOUPIL, T., (2020) *Studium vlastností cementových kompozitů s přidávkem polymerních vláken*. Brno, 87 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

- [11] ČSN EN 14889-2, Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007, 19 s.
- [12] VACL, J., *Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti*. Zlín, 2012. [bakalářská práce]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická
- [13] EDVARSEN, C. (1999). *Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete*. *Materials Journal*, č. 96, s. 448-454, DOI: 10.14359/645.
- [14] ALDEA, C., SONG, W., POPOVICS, J., SHAH, S. (2000). *Extend of healing of cracked normal strength concrete*. *Journal of Materials Civil Engineering*, č. 12, s. 92-96, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(92).
- [15] FENG, J., SU, Y., QIAN, CH., (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, č. 228, s. 116810-116828, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116810>.
- [16] ENPEDIÉ, EDS. [online] [cit. 11.12.2021] Dostupné z: <http://enpedie.cz/wiki/EDS>
- [17] POURFALLAHI, M., NOHEGOO-SHAHVARI, A., SALIMIZADEH, M., (2020). *Effect of direct addition of two different bacteria in concrete as self-healing agent*. *Structures*, č. 28, s. 2646-2660, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.070>.
- [18] SU, Y., QIAN, CH., RUI, Y., FENG., (2021). *Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)*. *Cement and concrete composites*, č. 116, 12 s., <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103896>.
- [19] YATISH, REDDY, P.V., RAMESH, B., PREM, KUMAR, L., (2020). *Influence of bacteria in self healing of concrete – a review*. *Materials Today: Proceedings*. č. 33, s. 4212-4218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.233>
- [20] DURGA, CH., S., S., NERELLA, R., MADDURU, S., R., CH., CHAVA V. (2020). *Performance studies on rate of self healing in bio concrete*. *Materials Today: Proceedings*. č. 27, s. 158–162, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.151>.
- [21] NIDHI, N., SURABHI, R., YATHISH, N. V., KRISHNAMURTHY, V., DEEPA, T., SEEMA, T., (2019). *Enhancement in strength parameters of concrete by application of Bacillus Bacteria*, *Constr. Build. Mater.* č. 202, s. 904-908, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.059>

- [22] KHALIQ, W., BASIT EHSAN, B. M., (2016). *Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques*, *Constr. Build. Mater.* č. 102, s. 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>.
- [23] MADHU, SUDANA, REDDY, B., REVATHI D. (2019). *An experimental study on effect of Bacillus Sphaericus bacteria in crack filling and strength enhancement of concrete.* *Materials Today: Proceedings.* č. 19, s. 803–809, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.135>.
- [24] GAVIMATH, C.C., MALI, B.M., HOOLI, V.R., MALLPUR, J.D., RAVISHANKERA, B.E., (2012). *Potential application of bacteria to improve the strength of cement concrete.* *International Journal of Advanced Biotechnology and Research.* č. 3, s. 541–44. ISSN: 0976-2612
- [25] WANG, J. Y., SOENS, H., VERSTRAETE, W., DE BELIE, N., (2014). *Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores*, *Cem. Concr. Res.*, č. 56, s. 139-152, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>
- [26] CHAHAL, N., SIDDIQUE, R., RAJOR, A., (2012). *Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete*, *Constr. Build. Mater.* č. 28, s. 351-356, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>.
- [27] PARTHASARATHY, J., SATYA NARAYANAN, K. S., ARUNACHALAM, K. D., ANNAMALAI, S. K., (2018). *Studies on the mechanical properties of bacterial concrete with two bacterial species*”. *Materials Today: Proceedings*, č. 5, s. 8875-8879, DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.320.
- [28] NAGARAJAN, V., KARTHIK PRABHU, T., GOWRI SHANKAR, M., JAGADESH, P., (2017). *A Study on the Strength of the Bacterial Concrete Embedded with Bacillus Megaterium.* *International Research Journal of Engineering and Technology.* č. 4, s. 1784-1788. e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072
- [29] WOYCIECHOWSKI, P. P., KALINOWSKI, M., (2018). *The Influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing.* *Materials* č. 11, 21 s., DOI:10.3390/ma11091600
- [30] MIGNON, A., SNOECK, D., DUBRUEL, P., VAN VLIERBERGHE, S., DE BELIE, N., (2017). *Crack Mitigation in Concrete: Superabsorbent Polymers*

as Key to Success? Materials, roč. 10, č. 237, 25s.,
<https://doi.org/10.3390/ma10030237>

- [31] VIKTOR, M., HANS-WOLF, R., (2012). *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction, State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*; Springer Science & Business Media: Berlin, Germany, 2012. 164 s., ISBN: 978-94-007-2733-5
- [32] KANG, S. H., HONG, S.-G., MOON, J., (2018). *The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete. Constr. Build. Mat.* č.172, s. 29–40. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.193, ISSN: 0950-0618
- [33] KANG, S.H., HONG, S.G., MOON, J., (2018). *Importance of drying to control internal curing effects on field casting ultra-high performance concrete. Cem. Concr. Res.*, č. 108, s. 20–30, DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.008
- [34] SNOECK, L.F., VELASCO, P., MIGNON, A., VAN VLIERBERGHE, S., DUBRUEL, P., LODEWYCKX, P., DE BELIE, N., (2015). *The effect of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by sorption experiments. Cem. Concr. Res.*, č. 77, s. 26–35, DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.013, ISSN: 0008-8846
- [35] HASHOLT, M.T., JENSEN, O.M., LAUSTSEN, S., (2015). *Superabsorbent polymers as a means of improving frost resistance of concrete. Adv. Civ. Eng. Mat.*, č. 1, s. 237–256, DOI: 10.1520/ACEM20150012, ISSN: 2165-3984
- [36] SCHREIBEROVÁ, H., (2020). *Autonomní zacelení trhlin v betonu obsahujícím bio-aktivní činidlo a superabsorpční polymer*. Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. 6 s., ISBN: 978-80-01-06774-1
- [37] SCHREIBEROVÁ, H., FLÁDR, J., (2019) *An investigation of the compatibility of different approaches to self-healing concrete: The superabsorbent polymers and microbially induced calcite precipitation, Conference Series: Materials Science and Engineering*. Prague: IOP Publishing Ltd. 8. s., DOI:10.1088/1757-899X/596/1/012039
- [38] SNOECK, D., a spol., (2012) ‘*Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers*’, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, č. 25, s. 13–24. DOI: 10.1177/1045389X12438623

- [39] VIJAY, K., MURMU, M., (2019). *Effect of calcium lactate on compressive strength and self-healing of cracks in microbial concrete*. *Front. Struct. Civ. Eng.*, č. 13, s. 515-525. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0494-2>
- [40] XU J., DU Y., JIANG Z., SHE A., (2015). *Effects of calcium source on biochemical properties of microbial CaCO_3 precipitation*. *Frontiers in Microbiology*. č. 6, článek č. 1366. DOI:10.3389/fmicb.2015.01366
- [41] JONKERS, H. M., (2011). *Healing Agent for Self-Healing Cementious Materials*. Patent č.: WO 2011/126361 A1.
- [42] ČESKOMORAVSKÝ CEMENT, CEM I 42,5 R, [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [43] FALCONRY, CREABLOC SIS, [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://falconry-cz.com/cz/creabloc-r-sis>
- [44] VŠEDOBETONU, POLYPROPYLENOVÁ VLÁKNA DO BETONU FIBRIBET – PPV 6 mm [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.vsedobetonu.cz/polypropylenova-vlakna-fibrivet-ppv-6-mm-20-ks-baleni-po-900g-2/>
- [45] ALIBABA, PVA FIBER FOR CEMENT CONCRETE FIBER, [online] [2021-12-20]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/pva-fiber-for-cement-concrete-fiber_60455285760.html
- [46] ČSN EN 196-1 (722100) Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti Praha: Český normalizační institut, 2016, 32 s.
- [47] KÁBRTOVÁ, D., (2016). Vývoj samonivelačních směsí na bázi portlandského cementu. Brno, 58s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
- [48] ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku) Praha: Český normalizační institut, 2000, 12 s.
- [49] KOPKÁNĚ, D., BODNÁROVÁ, L., HELA, R., HERKA, P., ŠTAHEL, P., (2016). Patent č. 305770: *Zařízení pro přípravu vzorků pro posouzení rozptýlení vláknité polypropylenové výztuže v cementových kompozitech a způsob přípravy vzorků na tomto zařízení*. [online]. [cit. 2021-12-23].

Dostupné

z:

https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Applications/2013/PPVCZ2013_1073A3.pdf

[50] Wikipedia, *ImageJ* [online] [cit. 2021-12-27]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/ImageJ>

SEZNAM ZKRATEK

SAP (*superabsorbent polymer*) – Superabsorpční polymer

PP – Polypropylen

PE – Polyethylen

PVA – Polyvinyl alkohol

EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) – Energiově disperzní spektroskopie

SEM (*scanning electron microscope*) – rastrovací elektronový mikroskop

LWA (*light-weight aggregates*) – lehké kamenivo

GNP (*Graphite Nanoplatelets*) – Grafitové nano destičky

LV – Laktát vápenatý

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Proces výroby vláken tavným zvlákněním	7
Obrázek 2: Princip vlivu vláken na samohojení betonu.....	8
Obrázek 3: RTG difrakční analýza sraženin vzniklých u jednotlivých vzorků	10
Obrázek 4: Vrchol kolem 29,5° na grafu RTG difrakce	10
Obrázek 5: Snímky ze SEM a výsledky EDS analýzy pro a) referenční vzorek b) vzorek s bakteriemi c) bakteriemi a PP vlákny a d) s bakteriemi a PVA vlákny	12
Obrázek 6: Mikroskopický snímek hran prasklin u vzorku a) s PP vlákny délky 6 mm, b) PP vláken délky 9 mm, c) s PVA vlákny, d) s PP vlákny délky 6 mm a bakteriemi, e) s PP vlákny délky 9 mm a bakteriemi a f) s PVA vlákny a bakteriemi. (vlákna jsou označena červenou šipkou nebo obdélníkem).....	14
Obrázek 7: Mikroskopický snímek vnitřních stěn prasklin u vzorku g) s PP vlákny délky 6 mm, h) PP vláken délky 9 mm, i) s PVA vlákny, j) s PP vlákny délky 6 mm a bakteriemi, k) s PP vlákny délky 9 mm a bakteriemi a l) s PVA vlákny a bakteriemi. (vlákna jsou označena červenou šipkou nebo obdélníkem)	15
Obrázek 8: Schéma ukládání kalcitu na vzorcích a) s PP vlákny, b) s PVA vlákny.	16
Obrázek 9: Molekulární struktura a) propylenu b) vinyl alkoholu	17

Obrázek 10: Schématické znázornění prostorového uspořádání A/B roviny PVA a kalcitu	18
Obrázek 11: Povrch vzorků po 7 dnech samohojení na a) referenční vzorek, b) vzorek s bakteriemi, c) s PP vlákny a d) s PP vlákny a bakteriemi	26
Obrázek 12: Vliv přidavku bakterií a SAPu na zacelení rozšiřující se trhliny po 28 dnech hojení	34
Obrázek 13: SEM snímky zachycující krystaly uhličitanu vápenatého při použití dusičnanu vápenatého (a,c,e) a laktátu vápenatého (b,d,f)	37
Obrázek 14: Snímky hrany trhliny před a po 28 dnech samohojení u vzorků a) referenčních, b) s N-Ca, c) s L-Ca, d) s N-Ca a bakteriemi, e) s L-Ca a bakteriemi .	39
Obrázek 15: Metodika zkoušení v rámci praktické části práce.....	43
Obrázek 16: PP mikrovlákna a jejich balení	46
Obrázek 17: PVA mikrovlákna.....	46
Obrázek 18: Použitý Laktát vápenatý	47
Obrázek 19: Laboratorní míchačka.....	49
Obrázek 20: Střásací stolek pro zkoušení cementových malt.....	50
Obrázek 21: Použité trojformy na cementové trámečky.....	51
Obrázek 22: Použité laboratorní měřidlo a váha.....	52
Obrázek 23: Uložení vzorku v běžném prostředí na nenasákavé podložce.....	55
Obrázek 24: Zkušební přípravek pro vyvození tříbodového ohybu.....	55
Obrázek 25: Přípravek na zkoušení pevnosti v tlaku.....	56
Obrázek 26: Přípravek pro rozlámání vzorku na posouzení rozmísení vláken dle patentu 305770	62
Obrázek 27: Ukázka vytvořených koláčů pro ověření rozmísení mikrovláken.....	62
Obrázek 28: Ukázky pravidelného rozmísení mikrovláken ve zkoušených záměsích	63
Obrázek 29: Nerozmísený shluk mikrovláken.....	64
Obrázek 30: Odformované vzorky PVA+SAP (nalevo) a PVA (napravo)	64
Obrázek 31: Uložení vzorků po dobu 28 dní	65
Obrázek 32: Příprava vzorků s konstantní šíří trhliny	69
Obrázek 33: Ukázka připravených vzorků po sestavení polovin.....	70
Obrázek 34: Příkazová lišta programu ImageJ	72
Obrázek 35: Ukázka procesu úpravy snímků.....	72
Obrázek 36: Tabulka s výsledky analýzy trhliny před a po samohojení.....	72

Obrázek 37: Snímky izolovaných trhlin před (vlevo) a po samohojení (vpravo) u vzorků, které prokázaly určitou míru zúžení.....	73
Obrázek 38: Ukázka volby nejširšího ještě zhojeného místa.....	75
Obrázek 39: Ukázka výsledků měření v programu ImageJ	75
Obrázek 40: Zacelení trhlin u vzorků jednotlivých záměsí	76
Obrázek 41: Použitý mikroskop KEYENCE VHX-6000	77
<i>Obrázek 42: Porovnání záměsí bez obsahu laktátu vápenatého a s ním na snímcích se zvětšením 20x.</i>	<i>78</i>
Obrázek 43: Snímky kompletně zacelených trhlin ve zvětšení 100x a 200x.....	79
Obrázek 44: Snímky vzorků s PP a PVA vlákny ve zvětšení 200x.....	80

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Znárodnění a) procentuální propad částic vysrážených u jednotlivých vzorků a b) procentuální zastoupení velikosti jednotlivých částic u testovaných vzorků	11
Graf 2: Zastoupení materiálů vláken zkoumaných v publikacích od roku 1998	19
Graf 3: Závislost opravené plochy praskliny na čase samohojení	27
Graf 4: Výsledky zkoušky kapilární absorpce	28
Graf 5: Pevnost v tahu za ohybu původní a znovuzískaná po 28 dnech samohojení.	29
Graf 6: průměrná hodnota šířky zacelené trhliny po 28 dnech samohojení.....	35
Graf 7: Vliv zdroje vápníku na pevnost v tlaku u vzorků různého stáří	38
Graf 8: Vliv zdroje vápníku na pevnost v tahu za ohybu u vzorků různého stáří.....	38
Graf 9: Vliv množství laktátu vápenatého v % z hm. cementu na pevnost v tlaku po daných stářích vzorků.	39
Graf 10: Objemové hmotnosti vzorků s různým množstvím SAPu.....	52
Graf 11: Porovnání nasákavosti vzorků s různým množstvím SAPu	53
Graf 12: Průběh vysychání vzorků v závislosti na množství SAPu.....	54
Graf 13: Procentuální úbytek hmotnosti zkoušených vzorků při vysychání.....	54
Graf 14: Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků s různým množstvím SAPu... ..	56
Graf 15: Porovnání pevností v tlaku vzorků s různým množstvím SAPu	57
Graf 16: Vývoj objemové hmotnosti tvrdnoucích vzorků s a bez přídavku SAPu....	65
Graf 17: Vývoj objemových hmotností na zkoušených vzorcích	66
Graf 18: Porovnání objemových hmotností po 28 dnech zrání.....	66
Graf 19: Porovnání pevností v tahu vzorků 2. etapy zkoušení	67

Graf 20: Porovnání pevností v tlaku vzorků 2. etapy zkoušení po 28 dnech.....	68
Graf 21: Porovnání výsledků zúžení trhlin s konstantní šířkou	73
Graf 22: Porovnání výsledků uvedených v tabulce č. 16.....	76
Graf 23: Porovnání pevností v tlaku před samohožením a po 28 dnech samohožení .	81

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry základních buněk polypropylenu, polyvinyl alkoholu, aragonitu, kalcitu a vateritu	17
Tabulka 2: Základní fyzikální a mechanické vlastnosti užitého cementu.....	44
Tabulka 3: Chemické složení použitého cementu.....	44
Tabulka 4: Charakteristiky použitého laktátu vápenatého	47
Tabulka 5: Složení zvolených testovacích záměsí	48
Tabulka 6: Navržené záměsi doplněné o rozlití na střešacím stolku	50
Tabulka 7: Objemové hmotnosti vzorků s různým množstvím SAPu.....	52
Tabulka 8: Nasákavost vzorků s různým množstvím SAPu	53
Tabulka 9: Pevnosti v tahu za ohybu vzorků s různým množstvím SAPu	56
Tabulka 10: Pevnosti v tlaku vzorků s různým množstvím SAPu.....	57
Tabulka 11: Navržené receptury pro ověřování vlivu přísad na samohožení.....	60
Tabulka 12: Zkoušené záměsi 2. etapy doplněné o rozlití na střešacím stolku	61
Tabulka 13: Naměřená pevnost v tahu za ohybu na vzorcích 2. etapy zkoušení po 28 dnech zrání	67
Tabulka 14: Stanovené pevnosti v tlaku na vzorcích 2. etapy zkoušení po 28 dnech	68
Tabulka 15: Výsledky zúžení trhlin o konstantní šířce po 28 dnech samohožení	73
Tabulka 16: Výsledky měření maximálního zhojení trhliny.....	75
Tabulka 17: Pevnosti v tlaku po 28 dnech a po následném samohožení po dobu 28 dní	81