



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

BETONY NA BÁZI REAKTIVNÍCH PRÁŠKŮ (RPC) S POLYMERNÍMI LATEXY

REACTIVE POWDER CONCRETES (RPC) WITH POLYMER LATEXES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ludmila Petruš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1819/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie materiálů
Studentka: **Bc. Ludmila Petrů**
Studijní program: Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Betony na bázi reaktivních prášků (RPC) s polymerními latexy

Zadání diplomové práce:

- literární rešerše na zadané téma
- příprava RPC s přídavkem vybraných polymerních latexů
- stanovení základních fyzikálně–mechanických vlastností RPC v čerstvém a zatvrdlém stavu
- studium mikrostruktury vybraných vzorků RPC
- vyhodnocení vlivu polymerních latexů na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu RPC

Termín odevzdání diplomové práce: 8.5.2023:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Ludmila Petrů
studentka

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem polymerních latexů na vlastnosti betonu na bázi reaktivních prášků. Pro přípravu vzorků byly použité tři druhy komerčních latexů, a to Revacryl, Duvilax a Plectol. Revacryl AE 2091 je vodná disperze styren-akrylátového kopolymeru s vysokým obsahem pevných látek. U Duvilaxu BD-20 se jedná o homopolymerní polyvinylacetátovou disperzi, která neobsahuje plnidla se změkčovadly. Plectol X 4002 je vodná, samosíťující akrylátová emulze s vysokým obsahem pevných látek. Tyto latexy byly do vzorků přidávány s koncentrací 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 %. Pro zjištění vlivu latexu na zpracovatelnost byl měřen rozliv čerstvé směsi. Hlavním cílem bylo zjistit balistickou odolnost modifikovaných betonů na bázi reaktivních prášků. Pro stanovení byla použita zkouška DOP. Dále byla zjišťována změna mechanických vlastností přidáním polymeru do betonu na bázi reaktivních prášků. Zlepšení vlastností by mělo být zapříčiněno vznikem polymerního filmu a polymer-cementové ko-matrice. Pro prokázání vzniku filmu byla mikrostruktura vzorků pozorována rastrovacím elektronovým mikroskopem.

ABSTRACT

This thesis deals with the effect of polymeric latexes on the properties of concrete based on reactive powders. Three types of commercial latexes were used for the preparation of the samples, namely Revacryl, Duvilax and Plectol. Revacryl AE 2091 is an aqueous dispersion of styrene-acrylate copolymer with a high content of solids. Duvilax BD-20 is a homopolymer polyvinyl acetate dispersion that does not contain fillers with plasticizers. Plectol X 4002 is an aqueous, self-setting acrylic emulsion with a high content of solids. These latexes were added to the samples at concentrations of 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 and 2,50 %. To determine the effect of latex on processability, the flow rate of the fresh mixture was measured. The main objective was to determine the ballistic resistance of modified concretes based on reactive powders. The DOP test was used for the determination. Furthermore, the change in mechanical properties was determined by adding a polymer to concrete based on reactive powders. The improvement in properties is expected to be due to the formation of a polymer film and a polymer-cement co-matrix. To demonstrate the film formation, the microstructure of the samples was observed by a raster electron microscope.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokohodnotný beton, latexem modifikovaný beton, latex, vodní součinitel, balistická odolnost

KEYWORDS

High-Performance Concrete, latex modified concrete, latex, water coefficient, ballistic resistance

PETRŮ, Ludmila. Betony na bázi reaktivních prášků (RPC) s polymerními latexy [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148010>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce František Šoukal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Františku Šoukalovi, Ph.D., za jeho čas při práci v laboratořích a také rady a pomoc při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Radoslavu Novotnému, Ph.D. za pomoc v laboratoři a Bc. Nele Ondrůškové za pomoc v laboratořích a při měření vlastností betonu. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mým rodičům a manželovi za psychickou podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	10
2.1	Vysokohodnotný beton	10
2.1.1	Porovnání HPC a OPC	10
2.1.2	Vlastnosti vysokohodnotného betonu.....	11
2.1.3	RPC.....	13
2.1.3.1	Vlastnosti RPC.....	13
2.1.3.2	Využití RPC	16
2.1.4	Složení vysokohodnotného betonu	16
2.1.4.1	Cement	16
2.1.4.2	Kamenivo.....	21
2.1.4.3	Křemičitý úlet	22
2.1.4.4	Mikromletý písek	23
2.1.4.5	Jemně mletý vápenec	23
2.1.4.6	Výztuž.....	24
2.1.4.7	Voda.....	24
2.1.4.8	Superplastifikátory	24
2.2	Latexem modifikovaný beton	27
2.2.1	Úvod	27
2.2.2	Typy polymerních latexů.....	27
2.2.3	Princip vzniku latexem modifikovaného cementu	28
2.2.4	Vlastnosti latexem upraveného cementu	31
2.2.4.1	Mechanické vlastnosti.....	31
2.2.4.2	Rázová houževnatost	32
2.2.4.3	Odolnost proti korozi	32
2.2.4.4	Vlastnosti mikrostruktury	32
2.2.4.5	Vodotěsnost.....	33
2.2.5	Využití modifikovaných betonů	33
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3.1	Použité materiály	34
3.1.1	Křemičitý písek.....	34
3.1.2	Dorsilit 9 a mikrodorsilit 110	34
3.1.3	Mikropísek ST2	34

3.1.4	Bílý cement Aalborg.....	35
3.1.5	Mikrosilika Füller-Q.....	35
3.1.6	Voda.....	35
3.1.7	Superplastifikátor.....	35
3.1.8	Latex	36
3.1.8.1	Plextol	36
3.1.8.2	Revacryl.....	36
3.1.8.3	Duvilax.....	36
3.1.9	Mikrovlákna.....	37
3.2	Příprava vysokopevnostního betonu s latexem.....	37
3.2.1	Příprava surovin.....	37
3.2.2	Postup přípravy vzorků.....	39
3.2.3	Postup přípravy vzorků pro balistické zkoušky.....	40
3.3	Použité metody – zkoušky betonu	40
3.3.1	Zpracovatelnost	40
3.3.2	Objemová hmotnost.....	41
3.3.3	Pevnost v tahu za ohybu	41
3.3.4	Pevnost v tlaku.....	42
3.3.5	Balistická zkouška	43
3.3.6	Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)	44
4	VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE.....	45
4.1	Zpracovatelnost.....	45
4.2	Pevnost v tahu za ohybu	46
4.3	Pevnost v tlaku	47
4.4	Objemová hmotnost	49
4.5	Balistická zkouška	51
4.6	Rastrovací elektronová mikroskopie.....	52
5	ZÁVĚR.....	56
6	POUŽITÉ ZDROJE	58
7	PŘÍLOHY.....	65
7.1	Příloha č. 1: Fotodokumentace vzorků z balistické zkoušky.....	65
7.2	Snímky ze rastrovacího elektronového mikroskopu.....	69
7.2.1	Duvilax 0,40 % při zvětšení 50 x	69

7.2.2	Duvilax 0,40 % při zvětšení 500 x	70
7.2.3	Plextol 0,60 % při zvětšení 50 x	71
7.2.4	Plextol 0,60 % při zvětšení 500 x	72
7.2.5	Plextol 2,50 % při zvětšení 50 x	73
7.2.6	Plextol 2,50 % při zvětšení 500 x	74

1 ÚVOD

Vysokohodnotný beton je druh betonu, který se od běžného betonu odlišuje lepšími mechanickými vlastnostmi. Těchto vlastností se docílí nízkým poměrem vody a cementu, jehož hodnota je nižší než 0,5. Tohoto nízkého vodního součinitele se dosáhne využitím superplastifikátorů, jejichž přidávkem se zlepšuje zpracovatelnost a snižuje množství potřebné vody do směsi. Podskupinou vysokohodnotných betonů jsou betony na bázi reaktivních prášků. Ty se od těch vysokohodnotných betonů odlišují nižším vodním součinitelem, který je pod hodnotou 0,2, a velikosti kameniva, jejichž maximální hodnota je 600 μm .

Druhá skupina betonů, která je v této práci rozebírána jsou polymer modifikované betony. Připravují se smícháním polymeru s betonovou směsí. Polymer se může používat v práškové nebo kapalné formě. V této práci se přidává ve formě latexů. Tyto polymery vytváří v betonech polymerní film. Díky přítomnosti tohoto filmu betonu dochází ke zlepšení vlastností materiálu.

Cílem této práce je přidání polymeru do betonu na bázi reaktivních prášků a zjištění, zda dochází ke zlepšení jeho vlastností. Celá diplomová práce je rozdělena do tří částí. V teoretické části této práce jsou popsány základní vlastnosti a vysokohodnotného betonu a betonu na bázi reaktivních prášků. Následně jsou uvedeny vlastnosti jednotlivých složek v betonu, kde se zaměřuje na superplastifikátory jako důležitou složku vysokohodnotných betonů. Poslední kapitolou v teoretické části jsou polymer modifikované betony. V této kapitole se zaměřilo na vznik polymerního filmu v betonu a vlastnosti toho materiálu. Druhá část nazvaná experimentální v úvodu popisuje základní vlastnosti použitých materiálů. Následně je zde popsána příprava vzorků pro měření a metody použité pro zjišťování vlastností betonu. V poslední části jsou uvedeny výsledky z měření, která byla zpracována do grafů či tabulek pro lepší přehlednost a srovnání. Tyto hodnoty byly v závěru okomentovány.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Vysokohodnotný beton

Vysokohodnotný beton (High-Performance Concrete – HPC) lze charakterizovat jako beton s vylepšenými vlastnostmi, mezi něž patří pevnost či zpracovatelnost. Tento druh betonu se začal používat na začátku 60. let 20. století v Chicagu. V této době byla pevnost vysokohodnotného betonu v porovnání s dnešním nízká, ale při porovnání s běžným betonem se téměř zdvojnásobila. Postupem doby došlo ke zlepšování vlastností betonu, a to lepší kvalitou nebo úpravou surovin [1].

Vysokohodnotný beton dosahuje vysokých pevností v tlaku, a to až hodnoty 140 MPa. Zvýšení pevnosti je možné dosáhnout snížením poměru vody a pojiva. Poměr vody a pojiva se u tohoto betonu pohybuje mezi 0,3–0,5. Tato hodnota určuje hranici mezi vysokohodnotným betonem a běžným betonem. Snížením poměru vody a plniva se změní vlastnosti betonu. Kromě zvýšení už zmíněné pevnosti se změní mikrostruktura, ale i celkové vlastnosti.

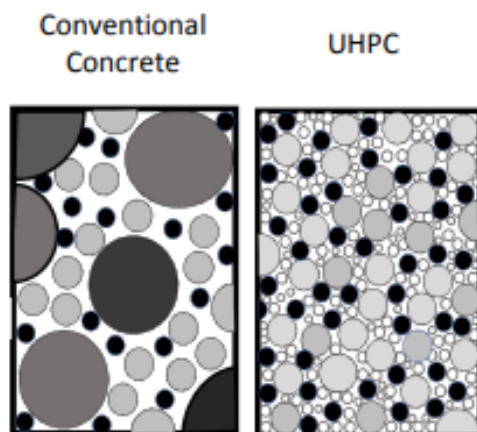
V dnešní době se vědci snaží vylepšovat vlastnosti vysokohodnotného betonu, a proto se dnes nahrazuje ultra vysokohodnotným betonem neboli UHPC (Ultra-High-Performance Concrete). Tento druh betonu se od vysokohodnotného liší velikostí zrn a poměrem vody a plniva. Velikost zrn u ultra vysokohodnotného betonu je maximálně 8 mm a poměr vody a plniva se pohybuje okolo 0,2. Snížením tohoto poměru nedojde k hydrataci všech zrn cementu, a proto nezhydratovaná zrna zde mají funkci plniva [2, 3].

Vývoj betonu se neustále posouvá dopředu. Cílem je zlepšit jejich vlastnosti. Začátkem 90. let došlo k vyvinutí betonu na bázi reaktivních prášků (Reactive Powder Concrete – RPC), který se od vysokohodnotného betonu odlišuje maximální velikostí hrubého kameniva a složením, které ovlivňuje hydrataci cementu. Změnou těchto vlastností bylo dosaženo vyšších pevností v tlaku [1].

2.1.1 Porovnání HPC a OPC

Změnu vlastností oproti běžnému betonu (OPC) lze dosáhnout několika způsoby. Jednotlivé složky betonu jsou u obou druhů téměř stejné. Liší se obsahem křemičitého úletu. Vysokohodnotný beton tuto složku obsahuje, zatímco běžný beton ji neobsahuje. Místo ní se využívá popílek nebo vysokopecní struska [2, 3].

Další rozdíl je ve výběru kameniva. Oba betony se v zásadě neliší druhem, ale spíše velikostí. Maximální velikost částic u vysokohodnotného betonu dosahuje 10–14 mm. Menší velikost částic má výhodu ve zmenšení počtu vzniklých mikrotrhlin, neboť dojde ke snížení obsahu vad u většího kameniva. Druhou výhodou je snížení napětí mezi kamenivem a cementem. Rozdíl ve velikosti částic vysokohodnotného betonu a běžného betonu lze pozorovat na obr. 1 [2, 3].



Obr. 1: Porovnání běžného betonu a vysokohodnotného betonu [4]

Jedním z hlavních rozdílů mezi běžným betonem a vysokohodnotným je vodní součinitel, tedy poměr záměsové vody a plniva U běžných betonů je tento poměr nad 0,4. Naopak právě vysokohodnotné betony se vyznačují tímto poměrem výrazně pod hodnotou 0,4. Snížení obsahu vody má veliký vliv na výsledné vlastnosti betonu. Minimální množství vody, které by mělo být pro výrobu použito, je takové, aby došlo k hydrataci všech zrn cementu. V kapitolách níže bude toto téma podrobněji rozebíráno [1, 2, 3].

Posledním rozdílem mezi těmito betony je výrazně menší spotřeba HPC pro stejný konstrukční prvek navržený z běžného betonu. Při stejné návrhové pevnosti konstrukčního prvku běžného i vysokohodnotného betonu, je potřeba menší množství vysokohodnotného betonu. Tohoto se využívá při výstavbě vysokých budov, neboť je možné při stavbě používat menší sloupy, a tudíž dojde k úspoře prostoru [2, 3].

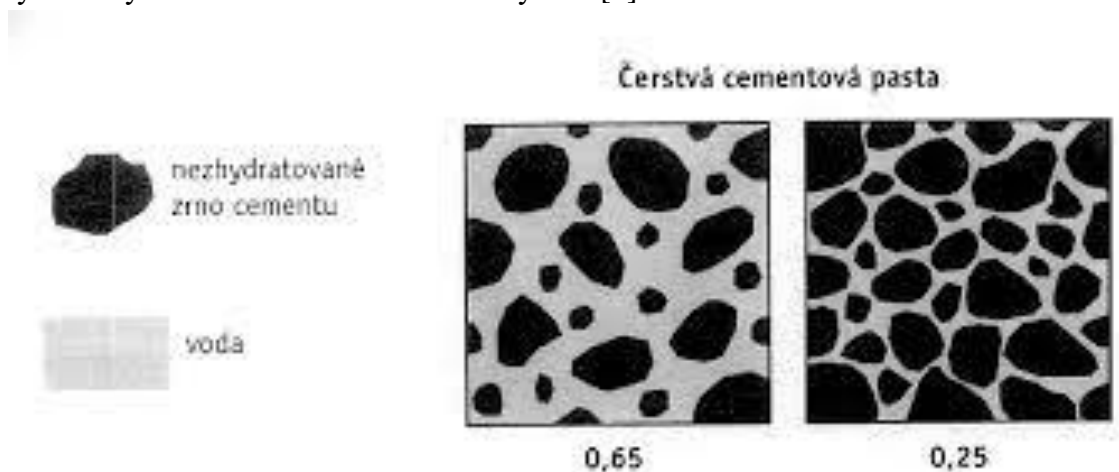
2.1.2 Vlastnosti vysokohodnotného betonu

Vlastnosti vysokohodnotného betonu se mohou v porovnání s běžným betonem zlepšovat, ale naopak může dojít i k jejich zhoršení. Ovlivnit je lze vodním součinitelem, tedy poměrem vody a pojiva, ale také mikrostrukturou.

Vysokohodnotné betony se vyznačují nízkým poměrem vody a cementu. Tato hodnota se pohybuje mezi 0,3–0,4. U běžných betonů platí, že se snižujícím se vodním součinitelem roste pevnost výsledného materiálu. Nejslabším článkem v tomto případě je hydratovaná cementová pasta a přechodová zóna. Právě zde dochází k porušení při zatížení betonu, neboť při vyšším poměru vody a pojiva vzniká poréznější struktura s širokou přechodovou zónou, která se vyznačuje nízkou pevností. Ve vysokohodnotných betonech, jejichž vodní součinitel je nízký vzniká méně porézní struktura, jak je možné vidět na obr. 2. Snížením vodního součinitele se dostávají zrna více k sobě a díky tomu vzniká méně pórovitá struktura. Pro vznik hydratačních produktů je méně místa, a proto musí překonat menší vzdálenost, aby se mezi zrny vytvořila vazba. Tyto hydratační produkty vznikají rychle, z tohoto důvodu se vysokohodnotné betony vyznačují vysokou počáteční pevností. Při vyšším poměru vzniká při hydrataci porézní struktura obsahující vnější hydratační produkty vznikající srážením v roztoku. Naopak struktura při nižším vodním součiniteli je celistvá a obsahuje většinu vnitřních hydratačních produktů.

Tato struktura vzniká difuzí. Tento rozdíl v mikrostruktuře má veliký vliv na mechanické vlastnosti betonu a na trvanlivost [1, 2].

Při nízké hodnotě poměru vody a pojiva vzniká slabá nebo téměř žádná přechodová zóna, která u běžných betonů ovlivňovala pevnost betonu. U vysokohodnotných betonů bude tedy mechanické vlastnosti ovlivňovat i hrubé kamenivo, které díky nízkým pevnostem přechodové zóny u běžných betonů nemělo téměř žádný vliv [1].



Obr. 2: Znázornění cementové pasty s vodním součinitel 0,65 a 0,25 [1]

Při snižování vodního součinitele roste pevnost do určité hodnoty. Při dalším snížení už pevnost neporoste. Pevnost betonu v tento moment ovlivňují vlastnosti hrubého kameniva, které závisí na jeho původu a velikosti zrna. Vyšších pevností dosahují menší zrna, neboť obsahují menší počet vad. Tyto vady mohou být způsobené při získávání horniny, neboť při tryskání a drcení může docházet ke vzniku mikrotrhlin v kamenivu. Tyto mikrotrhliny snižují pevnost kameniva. U vysokohodnotných betonů dochází tedy k náhradě hrubého kameniva jemným [1].

Tyto rozdíly v mikrostruktuře ovlivňují pevnost v tlaku. U normálního betonu pevnost v tlaku se pohybuje kolem 20 MPa. Oproti tomu u vysokohodnotného betonu při poměru vody a plniva lze dosáhnout pevnosti v tlaku až přes 100 MPa. Pokud bude předpokládáno hrubé kamenivo s vysokou pevností, je možné stanovit maximální hodnoty pevnosti v tlaku v závislosti na poměru vody a pojiva (viz tab. 1) [1, 5].

Tab. 1: Hodnoty pevností v tlaku v závislosti na hodnotě vodního součinitele [1]

Vodní součinitel	Očekávaná pevnost v tlaku [MPa]
0,40–0,35	50–75
0,35–0,30	75–100
0,30–0,25	100–125
0,25–0,20	<125

Při porovnání hodnot pevnosti tlaku a tahu lze pozorovat výrazně nižších hodnot pevností tahu. Při ohybových zkouškách dochází k rychlejšímu vzniku mikrotrhlin a defektů. Pro vznik mikrotrhliny je potřeba mnohem menší množství energie než při působení tlakem.

Podle Griffithovy teorie je možné usoudit, že pevnost v tlaku je osmkrát větší než pevnost v tahu. Vliv na pevnost v tahu má porozita materiálu. Tuto závislost je možné vyjádřit vztahem:

$$S = S_0 \cdot e^{-bp}, \quad (1)$$

kde jednotlivé veličiny vyjadřují:

S – tahová pevnost materiálu

S₀ – tahová pevnost při nulové pórovitosti

p – obsah pórů

b – faktor velikosti a tvaru pórů.

Zvýšit pevnost vysokohodnotného betonu lze použitím výztuže. Použitá výztuž může být ocelová nebo plastová ve formě prutů či rozptýlené vláknové výztuže [1, 6].

Vysokohodnotný beton díky svým vylepšeným vlastnostem se může využívat pro balistickou ochranu. Běžný beton je velmi křehký a nevyhovuje požadavkům pro odolnost při výbuchu. Vysokohodnotný beton obsahuje výztuž, která rázovou pevnost může zvýšit 2 až 15krát, v závislosti na množství a rozptýlení vláken. Při nárazu vzniká deformace, při které dochází k překročení pevnosti v tahu. Toto způsobí porušení betonu, které se šíří po povrchu. Pokud jsou v betonu vlákna dostatečně náhodně rozptýlená tak, tuto vrstvu vyztuží a porušení se dále nešíří [7].

Mikrostruktura má vliv kromě pevnosti v tlaku i na propustnost. Vysokohodnotný beton při porovnání s běžným má nižší propustnost. Vysokohodnotný beton má propojenou síť a díky tomu nemůže voda ani chloridové ionty strukturou protékat. Propustnost vysokohodnotného betonu je tak nízká, že chloridové ionty téměř nepronikají betonem, a proto nemůže dojít ke korozi oceli. Pomalé pronikání chloridových iontů je způsobeno nízkým vodním součinitelem, který ovlivňuje pórovitost. Nízkým poměrem vody a pojiva obsahuje mikrostruktura nesouvislé póry, a proto je pohyb chloridových iontů složitější [1, 2].

2.1.3 RPC

Betony na bázi reaktivních prášků (Reactive power concrete – RPC) jsou kompozitní materiály s vysokou pevností a tažností. Byly vyvinuté v roce 1993 pro francouzskou stavební společnost Bouygues. Jedná se o speciální beton, u něhož změnou některých parametrů došlo ke zlepšení mechanických vlastností. Jedním z nejdůležitějších parametrů je snížení velikosti částic, z důvodu snížení pórovitosti a zvýšení homogenity. Maximální velikost hrubého kameniva činí 600 μm. Pro výrobu betonu se kromě portlandského cementu, jemných písků a superplastifikátorů využívají křemičité prášky a křemičité úlety, které ovlivňují hydrataci cementové pasty [1, 8, 9].

2.1.3.1 Vlastnosti RPC

Betonu na bázi reaktivních prášků vyniká svými vlastnostmi, mezi něž patří vysoká trvanlivost, vynikající houževnatost, vysoká pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Tyto betony mohou dosahovat hodnot pevnosti v tlaku 200 až 800 MPa. Zvýšení pevností je způsobeno zlepšením homogenity, které je spojeno se změnou velikosti částic a změnou poměru práškové směsi. Zlepšení vlastností, jak již bylo výše zmíněno, je tedy dosaženo eliminací hrubého

kameniva, snížením vodního součinitele a přidávkem mikrovláken, které způsobují zlepšení houževnatosti. [10, 11].

2.1.3.1.1 Vliv velikosti kameniva

Betony na bázi reaktivních prášků se od vysokohodnotných betonů odlišují v některých parametrech. Jedním z nich je odstranění hrubého kameniva, které je nahrazeno jemným křemičitým pískem. Maximální velikost jemných částí je 600 μm . Heterogenní struktura u běžného betonu způsobuje vznik vnitřních vad materiálu. Snížením velikosti kameniva se zvyšuje homogenita betonové směsi, a proto se snižuje vznik vad materiálu, mezi které patří póry a mikrotrhliny [1, 10, 11].

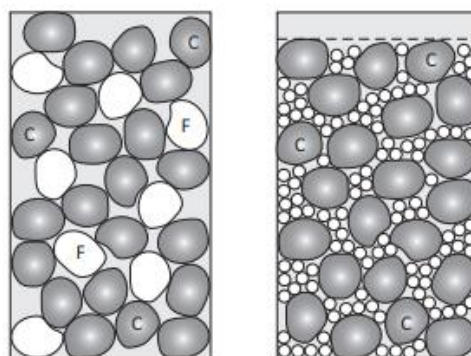
U běžných betonů při působení tlakové síly vzniká na rozhraní mezi kamenivem a pastou smykové a tahové napětí, které způsobuje vznik trhlin. Trhliny mohou vznikat vlivem vnějšího zatížení, smršťováním či rozdílnou roztažností mezi pastou a kamenivem. Velikost trhlin je ovlivněna tvarem a velikostí kameniva. Právě u RPC zmenšením hrubého kameniva dochází k výraznému poklesu vzniku a šíření mikrotrhlin. Snížení vzniku mikrotrhlin je způsobeno zvýšením pevností vazby uvnitř matrice [1, 10, 11].

U betonů na bázi reaktivních prášků je hodnota Youngova modulu vyšší než 50 MPa, což je způsobeno změnou heterogenity materiálu. Betony s vysokou hustotou mohou dosahovat až 75 MPa. Vyšší Youngův modul u RPC způsobuje tlumení mechanického napětí, díky kterému dochází k narušení struktury [1, 10, 11].

2.1.3.1.2 Vliv jemných prášků

Zvýšení mechanické pevnosti a vynikající trvanlivosti je dosaženo přidáním malých částic, z důvodu zaplnění větších dutin. Důležitý je poměr a velikost těchto částic. Tyto práškové částice zaplní dutiny, které vznikají mezi zrny cementu a kameniva. Zaplněním těchto dutin dochází ke zlepšení vlastností betonu. Tím se odlišuje RPC od běžného betonu, neboť přidáním práškových částic negativně ovlivňuje jeho vlastnosti. Práškové částice v RPC vytváří velký měrný povrch. Zvýšením povrchu je potřeba více cementu a tím se zvýší množství vzniklého CSH gelu [8, 12].

Přidávkem jemných částic se vytváří vyšší hustota balení, a tím se zmenšuje vzdálenost mezi částicemi cementu, což lze pozorovat na obr. 3. Pro dosažení vyšších pevností betonu, je důležitá malá vzdálenost mezi zrny cementu. Při bližších vzdálenostech mezi zrny je menší prostor, který se musí vyplnit hydratačními produkty a díky tomu se dosahuje vysokých pevností [12, 13].



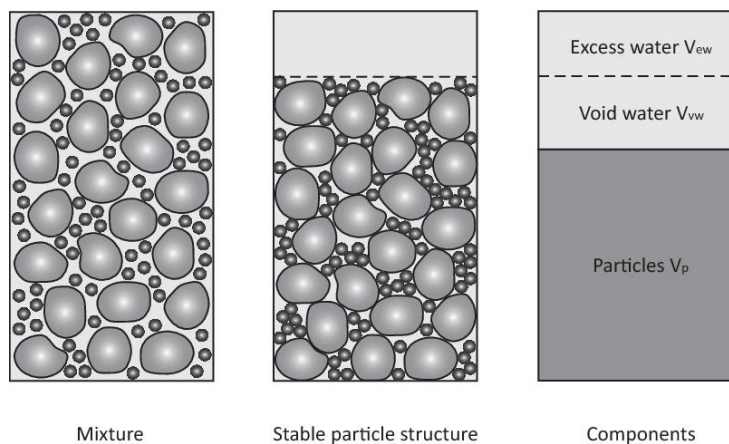
Obr. 3: Vyplnění pórů mezi zrny cementu jemnými částicemi [12]

Mezi jemné prášky, které se využívají pro plnění dutin, patří například křemičitý úlet, křemičitá dýmky nebo vysokopecní granulovaná struska. Některá zrna cementu nepodléhají hydrataci, kvůli nízkému obsahu vody, a proto mohou také pomáhat při plnění.

Použitím těchto přísad do práškového betonu dochází ke zvýšení odolnosti proti chloridům nebo síranům. Zvýšení odolnosti proti působení těchto iontů je způsobeno vysokou jemností přísady [8, 12, 13].

2.1.3.1.3 Vliv vodního součinitele

Jednou z nejdůležitějších vlastností RPC je nízký vodní součinitel vody, jehož hodnota se pohybuje pod 0,2. Snížení poměru vody a pojiva je možné dosáhnout díky již zmíněnému přídatku jemných částic. Přídatkem jemných částic dojde k vyplnění dutin, a tudíž se sníží potřebné množství vody, které bylo potřeba pro jejich zaplnění. Tato voda nebyla potřebná k hydrataci, ale sloužila pouze vyplnění mezer a zvýšení tekutosti. Čím jsou tedy zrna menší vzniká hutnější směs s menším množstvím vody. Na obr. 4 je možné pozorovat snížení obsahu vody, při ztuhnutí zrn materiálu [8, 12].



Obr. 4: Znázornění snížení vody při zmenšení velikosti mezer mezi zrna [12]

Snížením množství vody dochází k nižší hydrataci cementu. Při hodnotě vodního součinitele 0,20 zhydratuje asi 26 % cementových zrn. Zbylá zrna slouží jako plnivo, jak již bylo zmíněno výše. Při nižším obsahu vody se snižuje vzdálenost mezi částicemi, a proto se zvyšují výsledné pevnosti betonu. Při snižování množství vody, je důležité stanovit optimální vodní součinitel. Při nedostatečném množství vody nedojde k dostatečné hydrataci a výsledné vlastnosti betonu se snižují. Pro získání vysokých pevností je důležité stanovit ideální množství vody [8, 13].

Při snížení vodního součinitele dochází ke snížení tekutosti. Pro zvýšení zpracovatelnosti při nízkém vodním součiniteli se používají superplastifikátory. Popis funkce a rozdělení superplastifikátorů je uveden v kapitole 2.1.4.8. Kromě zlepšení tekutosti betonové směsi je výhodou superplastifikátorů i snížení hodnoty vodního součinitele. Jejich použitím se může hodnota vodního součinitele snížit až o 10 %. Kromě snížení poměru vody a pojiva je jejich výhodou zvýšení tekutosti betonové směsi, a tedy zlepšení zpracovatelnosti [8, 13].

2.1.3.1.4 Vliv mikrovláken

Při náhradě hrubého kameniva dochází ke zvýšení smrštění při sušení. Přidáním ocelových vláken do směsi je toto smrštění potlačeno. Další výhodou při použití vláken do betonové směsi je zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin [1, 8].

Nevýhodou vysokopevnostních betonů je nízká hodnota houževnatosti, kterou způsobila vysoká homogenita těchto betonů. Přidáním ocelových vláken do RPC se její hodnota zvýší až čtyřikrát. Použitím ocelových vláken do betonu se zabrání šíření těchto trhlin. Pokud se do betonu přidá přibližně 3 % vláken, houževnatost se může zvýšit až o 80 % [1, 13].

Betony na bázi reaktivních prášků dosahovaly nízkých hodnot pevnosti v tahu asi 8 MPa. Aby došlo ke zlepšení těchto vlastností, začaly se do betonové směsi přidávat vlákna. Jako vlákna se používají především krátká vlákna, díky nimž dochází ke zpevnění výsledného betonu a ke zvýšení tažnosti. V dnešní době RPC dosahují hodnot pevnosti v tahu 25–150 MPa [1, 8, 13].

2.1.3.2 Využití RPC

Betony na bázi reaktivních prášků díky svým mechanickým vlastnostem nachází své využití ve stavebnictví. Využívá se pro výstavbu mrakodrapů, mostů, chodníků, budov odolných proti nárazům. Mezi stavby, kde byl využitý beton na bázi reaktivních prášků, patří pěší lávka v kanadském městě Sherbrooke, ocelový most Pulaski Skyway. RPC se nepoužívá jen k výstavbě nových staveb, ale i k opravě stávajících [8, 9].

Důležitou vlastností RPC je její chemická odolnost a díky tomu tento typ betonu nachází uplatnění jako konstrukce odolné proti korozi, štíty proti jadernému záření či výstavba jaderných budov [8, 9, 13].

2.1.4 Složení vysokohodnotného betonu

Složení betonu lze rozdělit na dvě základní složky voda a pojivo, jejichž poměr je důležitý pro zpracovatelnost a vlastnosti. Mezi základní látky, které se smíchají při výrobě betonové směsi, patří cement, kamenivo, křemičitý úlet, mikromletý písek a jemně mletý vápenec. Hlavní tekutou složkou je voda. Kromě ní se v kapalném skupenství přidávají superplastifikátory. Poslední složka tvořící betonovou směs je výztuž, která se přidává pro zlepšení mechanických vlastností.

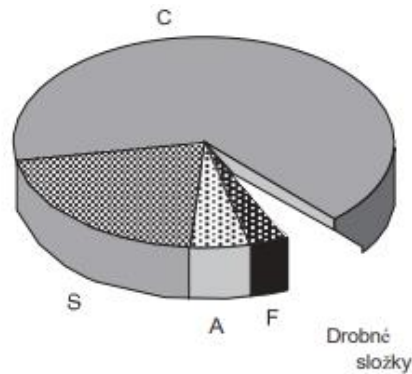
2.1.4.1 Cement

Hlavní složku při výrobě betonu tvoří cement. Vlastnosti jsou ovlivněny povahou jednotlivých složek. Jelikož cement tvoří hlavní pojivovou složku, je důležitý jeho správný výběr. Podle složení se cementy rozdělují do pěti skupin, které označujeme zkratkou CEM a příslušnou římskou číslicí označující právě druh cementu. Do těchto pěti skupin se tedy řadí: portlandský cement (CEM I), portlandský cement směsný (CEM II), vysokopecní cement (CEM III), pucolánový cement (CEM IV) a směsný cement (CEM V). Dále se cementy mohou dělit podle třídy pevnosti nebo podle rychlosti vývoje počáteční pevnosti [1].

Na cement v RPC nejsou kladeny žádné vysoké nároky. Nevýhodné je přidání velice jemného cementu, neboť tento cement spotřebuje velké množství vody. Pro RPC, jak již bylo výše zmíněno, je důležitý nízký poměr vody a pojiva. Z tohoto důvodu se nesmí používat velice jemný cement. Při hydrataci všechna zrna nezhydratují a velké množství jich zůstane volných. Tato zrna mají veliký vliv na pevnost výsledného materiálu [1].

2.1.4.1.1 Složení

Na typ a vlastnosti cementu má vliv jeho složení. Pro výrobu jsou důležité čtyři základní oxidy: oxid křemičitý, oxid vápenatý, oxid hlinitý a oxid železitý. Poměr těchto oxidů znázorňuje obr. 5. Jednotlivé zkratky představují počáteční písmena příslušných oxidů [1, 14].

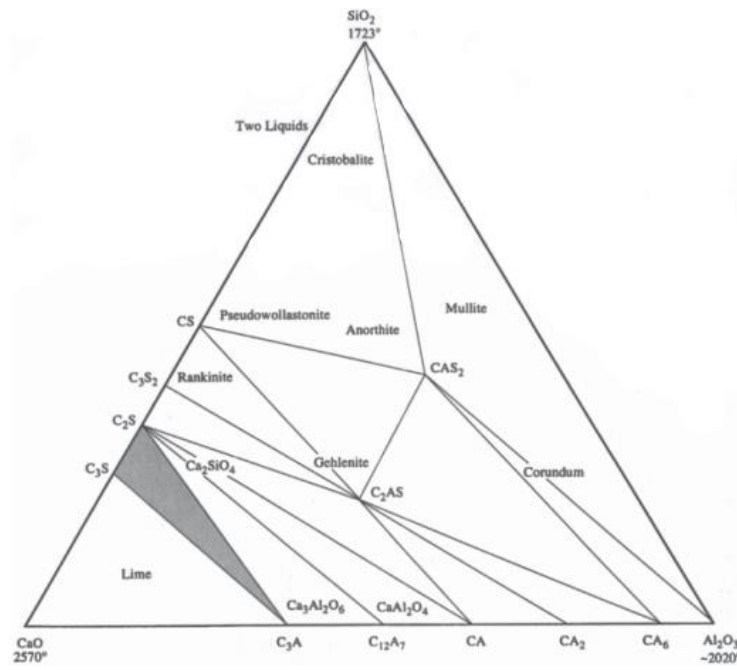


Obr. 5: Běžné chemické složení portlandského slínku [14]

Největší zastoupení tvoří oxid vápenatý, který se získává z vápence nebo křídly. Protože tvoří většinu směsi, bývá označován jako primární látka. Zbylé tři oxidy se označují jako sekundární látky. Často se získávají z břidlice nebo jílu. Mezi drobné složky, které jsou obsaženy ve směsi, patří oxid hořečnatý, oxid manganitý, oxid fosforečný, chloridy či jiné látky.

Při výpalu těchto oxidů na slínek se jako palivo používá uhlí, zbytky z rafinace ropy nebo pneumatiky automobilů. Nečistoty uvolněné výpalem se mohou objevit ve slínku a snižovat tak jeho kvalitu [1, 14].

Výpalem těchto oxidů se získávají čtyři slínkové minerály trikalciumpilikát (C_3S), dikalciumsilikát (C_2S), trikalciumaluminát (C_3A) a tetraalkaliumaluminoforit (C_4AF). Důležité je složení směsi, neboť portlandský slínek se získává jen při určitém poměru těchto fází. Složení směsi se upravuje tak, aby poměr slínkových minerálů spadl do oblasti koexistence těchto fází (viz obr. 6). Důležité jsou především C_3S a C_2S . Tyto dva minerály ovlivňují nejen pevnost výsledného materiálu, ale také strukturu portlandského cementu. Tyto slínkové minerály vznikají reakcí CaO a SiO_2 . Tato reakce je velice obtížná, a proto se přidává oxid hlinitý a železitý, neboť pomáhají vytvářet roztavené tavidlo pro lepší reakci oxidů [1, 14].



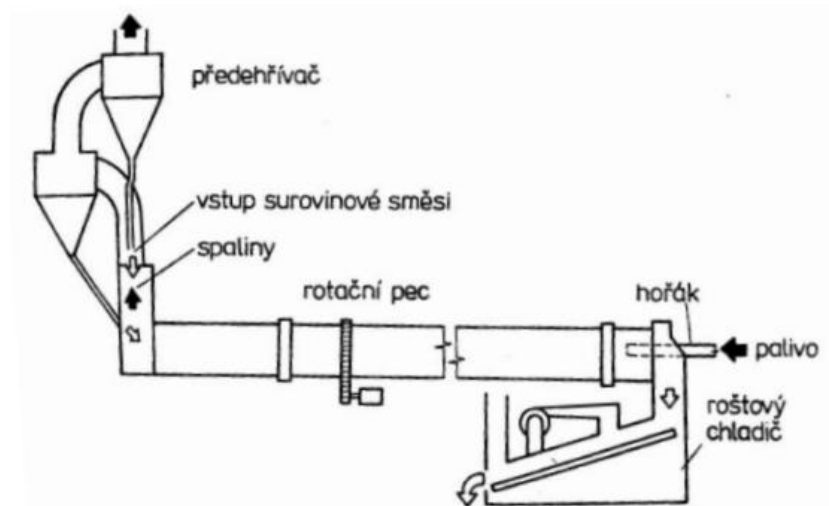
Obr. 6: Fázový diagram SiO_2 , CaO a Al_2O_3 [1]

2.1.4.1.2 Výroba

Výsledné vlastnosti portlandského cementu ovlivňuje složení surovin a jeho výroba. Mezi základní suroviny potřebné pro výrobu patří vápenaté a jílovité horniny, které obsahují křemík a hliník. Nejdůležitější složkou je uhličitan vápenatý. Mezi další suroviny ovlivňující výsledné složení cementu nebo výpal se řadí např. ocelářenské kaly, bauxit, křemičitý písek nebo vápenec.

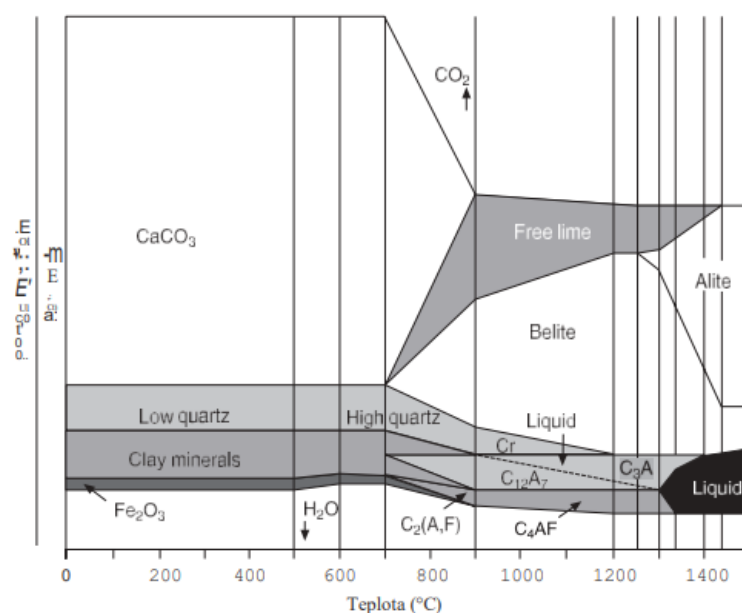
Výroba cementu začíná těžbou surovin, které se často přímo v lomu drtí. Nejčastěji se používají kladivové nebo kuželové drtiče. Podrcené suroviny se homogenizují. Zajišťuje se potřebné složení pro určitý typ cementu. Následně dochází k mletí surovin. Dalším krokem je výpal surovin. Výpal probíhá v rotační peci, která je zobrazeno na obr. 7. Jedná se o pec vyloženou žáruvzdornou vyzdívkou. Rotační pec je dlouhá 60–100 m o průměru 6–7 m a sklonu 3–7°. Suroviny postupují pecí k hořákům. Postupem surovin pecí se mění teplota, a proto tento proces lze rozdělit do několika kroků. Sled reakcí probíhajících při různých teplotách je zobrazen na obr. 8 [14, 15].

V první části, kde teplota dosahuje asi 200 °C, dochází k sušení surovin. V druhé části pece dochází k přehřívání surovin ve vlnosku, kdy se materiál postupně ohřívá z teploty 200 °C až na teplotu 800 °C. V tomto kroku se oddělují spaliny od materiálu. Dalším zvýšením teploty na 1200 °C se úplně rozloží uhličitan vápenatý na volné vápno, které reaguje s dalšími látkami. K tomu to se používá kalcinátor, díky němuž se zvýší účinnost. Čtvrtý krok se nazývá exotermický, při kterém teplota dosahuje až 1300 °C. Důležitým krokem je slinování, k němuž dochází při 1450 °C. Při slinování se přeměňuje oxid vápenatý spolu s oxidem křemičitým, oxidem hliníovým a oxidem železitým. Výpalem vznikají čtyři základní minerály: trikalciumpsilikát (C_3S), dikalciumpsilikát (C_2S), trikalciualuminát (C_3A) a tetrakalciualuminoferit (C_4AF).



Obr. 7: Schéma rotační pece [16]

Nejdůležitějšími minerály jsou trikalciumpilíkát a dikalciumpilíkát, které tvoří převážnou část slinkových minerálů, a to přibližně asi 80 %. Při teplotě 1250 °C reaguje oxid vápenatý s oxidem křemičitým za vzniku dikalciumpilíkátu neboli belitu. Jedná se o slinkový minerál, který se vyznačuje pomalým růstem teploty a nižším vývinem hydratačního tepla. Zahříváním dochází k postupné přeměně tohoto minerálu na trikalciumpilíkát neboli alitu. Přeměna je dosažena při teplotě 1450 °C. Podle obsahu alitu lze ovlivnit výsledné vlastnosti betonu, mezi které patří rychlost tvrdnutí, pevnost a uvolněné hydratační teplo. Chlazením taveniny začnou krystalizovat trikalciumpilíkát a tetralciumpilíkát. Slínek se chladí až na teplotu 1000 °C. Důležitá je rychlost chlazení, neboť při pomalém ochlazení se zvyšuje obsah belitu na úkor alitu a mění se tím vlastnosti. Vypálený slínek se následně mele a míchá s dalšími surovinami, mezi které patří například sádrovec. Tímto procesem vzniká cement. Poměrem smícháním slínek a surovin lze ovlivnit výsledné vlastnosti betonu [14, 15].



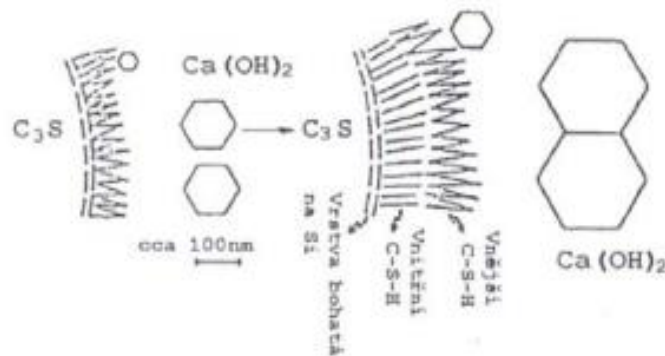
Obr. 8: Sled reakcí při tvorbě portlandského cementového slíneku [14]

2.1.4.1.3 Hydratace

Během hydratace dochází k reakci mezi vodou a cementem. Jedná se o proces, při kterém cement tuhne a tvrdne. Slinkové minerály hydratují v jiném čase. Nejdříve reaguje C_3A v období několika minut. V řádu hodin hydratuje C_3S a v řádu několika dní nejdříve C_4AF a nakonec C_2S . Při hydrataci vznikají reakcí alitu a vody dva hlavní produkty, a to CSH gel a portlandit [17].



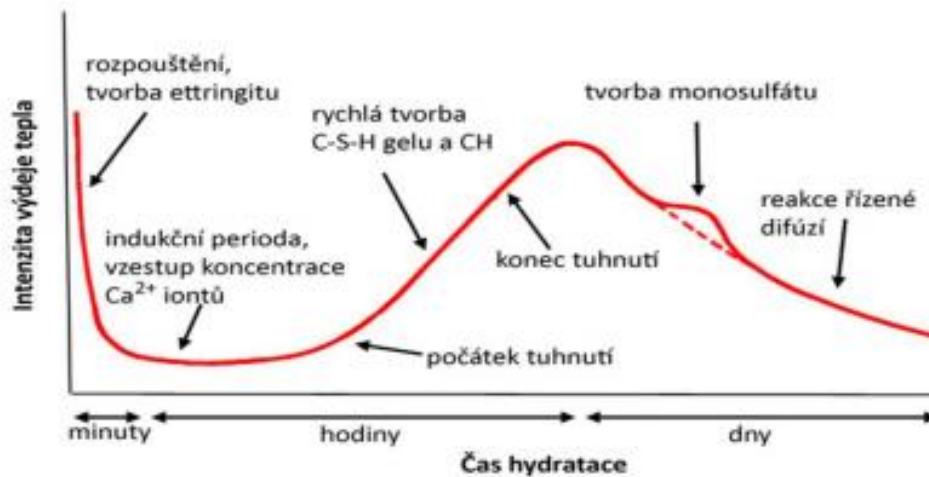
CSH gel je amorfní fáze, která způsobuje tuhnutí materiálu a jeho výslednou pevnost. Vzniká rozpuštěním C_3S . Vápenaté ionty se rozpouští do roztoku, které se jím sytí. Na povrchu se vytváří vrstvička hydratovaná tetraedry SiO_2 . Reakcí křemičitých tetraedrů a vápenatých iontů rozpuštěných ve vodě vznikají jehličkovité útvary CSH gelu. Na povrchu vzniká vnější CSH gel a postupnou reakcí do hloubky vzniká vnitřní CSH gel, který se od vnějšího jehličkového liší hutnou strukturou (viz obr. 9). Vznikající portlandit vyplňuje meziprostory [18, 19].



Obr. 9: Znárodnění vzniku CSH gelu a portlanditu [20]

Hydrataci může ovlivnit množství použité vody, teplota a jiné minerální příměsi. Často se využívají látky, které urychlují nebo zpomalují tuhnutí. Důležitým regulátorem tuhnutí je sádrovec. Při reakci s vodou se začnou uvolňovat vápenaté ionty, které reagují s hlinitanovými a síranovými ionty za vzniku ettringitu. Vznikající ettringit obaluje zrna C_3A a díky tomu dochází ke zpomalení hydratace. Pokud by se sádrovec do směsi nepřidal, došlo by k okamžitému rozpouštění C_3A , které by způsobilo zrychlení tuhnutí.

Hydrataci lze rozdělit do tří období, které lze popsat pomocí závislosti uvolněného tepla na čase, neboť během hydratace dochází ke změně vývinu tepla (viz obr. 10).



Obr. 10: Vývoj hydratačního tepla cementu v čase [21]

První období lze rozdělit na dvě části, a to na preindukční období a indukční. Preindukční období trvá 10–15 minut a uvolňuje se veliké množství tepla, které vzniká rozpouštěním C_3A . Při kontaktu cementu a vody se smáčí zrna cementu a dochází tedy k rozpouštění látek, které se uvolňují do kapalně fáze. Rozpouštěním síranových a vápenatých iontů vzniká ettringit a portlandit. V indukčním období dochází ke zpomalení hydratace díky vznikajícímu ettringitu, a proto toto období probíhá 1–2 hodiny. V této fázi roste koncentrace vápenatých iontů, které dosahuje maxima. Přesycením roztoku těmito ionty začne vznikat CSH gel [18, 19].

Druhé období probíhá v rozmezí 3–12 hodin po zamíchání. Dochází ke značnému vývinu hydratačního tepla a hydrolýze C_3S . V tomto období hydratace zrychluje, což je způsobeno růstem hydratačních produktů. Začíná vznikat vnější CSH gel [18, 19].

Poslední období je období dozrávání a vzniká stabilní struktura. Pokračuje hydratace C_3S a přidává se k ní hydratace C_2S . Hydratace zpomaluje, neboť množství nezreagovaného materiálu klesá a rychlost hydratace je řízena difúzí. Hydratační procesy probíhají až do spotřebování veškerého původního cementu. Větší zrna cementu mohou zůstat ovšem nezreagované, což může být způsobeno nedostatkem vody. Toto poslední období lze rozdělit na dvě části. První probíhá do 28 dnů po zamíchání a dochází při něm k poklesu hydratace. Druhá část se nazývá dozrávání a trvá i několik let. Proti dozrávání působí stárnutí materiálu, které způsobují snížení pevnosti [18, 19].

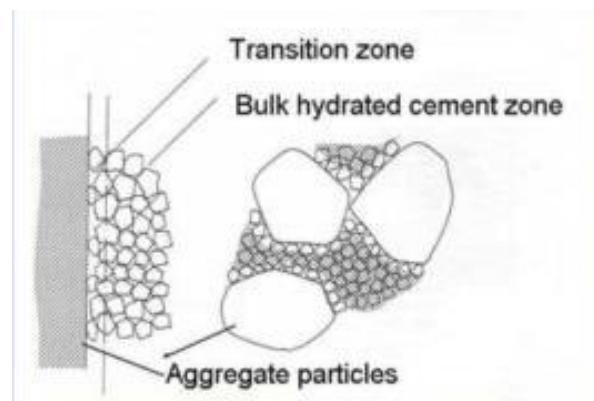
2.1.4.2 Kamenivo

Kamenivo je anorganický materiál, který se využívá ve stavebnictví jako plnivo pro výrobu betonů a malt. Jedná se o materiál přírodního původu či umělého. Přírodní kamenivo se těží z řek, pískoven či lomů. Umělý materiál se získává drcením ztvrdlého nepoužitého betonu. Velikost zrna je do velikosti 125 mm. Důležitými vlastnostmi kameniva v betonu je nízká nasákavost, trvanlivost, pevnost zrn a objemová hmotnost. Mezi negativní vlastnosti se řadí nekubický tvar zrn či obsah nežádoucích částic. Mezi ně se řadí sloučeniny síry amorfni oxid křemičitý, který spolu s cementem může vytvářet alkalicko-křemičité rozpínání. Z celkového objemu betonu kamenivo tvoří 75 % až 80 %. Kamenivo se do betonu přidává z důvodu vytvoření kostry, která bude pevná a tlakově odolná [22, 23, 24].

Beton je heterogenní materiál. V cementové hmotě, která obsahuje vodu, cement a přísady, tvoří kamenivo zrnité prvky. U vysokohodnotných betonů dochází ke zvýšení homogenity

odstraněním hrubého kameniva náhradou jemných písků, snížením poměru agregátu a matrice a zlepšením mechanických vlastností pasty [23].

U běžných betonů působením tlakové síly dochází na hranicích zrna mezi pastou a kamenivem ke vzniku smykových a tahových napětí, čímž vznikají trhliny. Jedná se o přechodovou zónu (viz obr. 11), která má velký vliv na mechanické vlastnosti betonu. Ke vzniku zóny dochází rozdíl velikosti cementových zrn, která se pohybují od méně než jednoho mikronu až po 100 μm , a velikosti kameniva, jejíž velikost je o několik řádů nižší. Právě velikost kameniva způsobuje narušení nabalování cementových zrn a vznik heterogenní struktury. U vysokohodnotných betonů se snižuje velikost kameniva přibližně na 400 μm . Zmenšením kameniva se zmenší velikost trhlin [23, 25, 26].

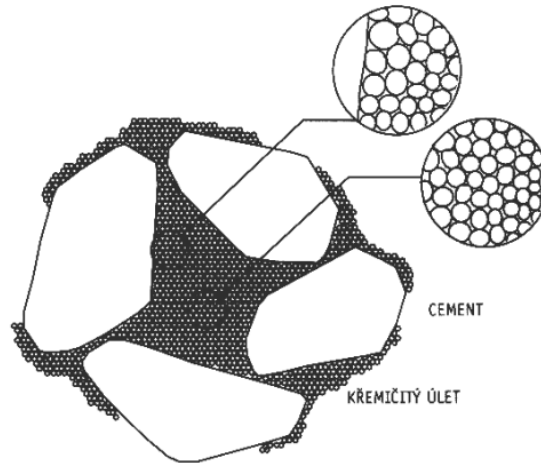


Obr. 11: Přechodová zóna v betonu [25]

2.1.4.3 Křemičitý úlet

Křemičité úlety vznikají jako vedlejší produkt průmyslové výroby křemíku a ferosiliciových slitin. Výroba probíhá redukcí vysoce čistého křemene za vysokých teplot v elektrické peci v přítomnosti koksu. Křemen se redukuje na kovový křemík a při tomto ději dochází k uvolňování plynného oxidu křemnatého. Tento plyn se oxiduje a kondenzuje za vzniku mikrokuliček oxidu křemičitého, který má tvar velice jemných jehliček. Tento vzniklý prášek obsahuje 85–95 % SiO_2 . Zbylý obsah tvoří nečistoty, které obsahují uhlík uvolněný z elektrod či uvolněné částice paliva. Díky vysokému obsahu oxidu křemičitého se úlety nazývají mikrosilika. Obsah tohoto oxidu lze ovlivnit při výrobě, a to výběrem surovin [27, 28].

Křemičité úlety mají amorfni charakter, neboť díky rychlému ochlazení jejich par nemají částice čas se uspořádat do krystalické struktury. Měrný povrch částic se pohybuje od 15 000 do 25 000 m^2/kg . Velikost částic je menší než 1 μm . Částice mikrosiliky mají přibližně stokrát menší průměr než částice cementu [27, 28].



Obr. 12: Zaplnění plochy mezi křemičitým úletem a částicemi cementu [27]

Přítomnost křemičitých úletů má vliv na rychlost pucolánové reakce. Další výhodou mikrosiliky je nižší pórovitost výsledného produktu. Díky své velikosti a jemnosti vyplňuje mezery mezi částicemi cementu (viz obr. 12). Aby došlo ke snížení pórovitosti, musí být částice dobře rozdispergovány, čehož lze dosáhnout užitím vhodného plastifikátoru. Použitím křemičitých úletů se snižuje vznik přechodových zón mezi částicemi cementu a kamenivem (viz kapitola 2.1.4.2) [1, 28].

Mezi další výhody použití křemičitých úletů do betonu patří vysoká odolnost proti chemickým vlivům, trvanlivost, vysoká odolnost proti oděru a zlepšení mechanických vlastností, kam se řadí pevnost v tahu, ohybu a tlaku.

2.1.4.4 Mikromletý písek

Písek se získává jako produkt rozpadu hornin, který se těží v lomech. Získaný materiál se rozmělněje suchým mletím. Podle velikosti se zrna rozdělují do několika skupin: jemnozrnný, středozrnný a hrubozrnný písek. Složení písků se liší v závislosti na vzniku původu. Největší zastoupení v písku tvoří zrna křemene s obsahem až 99 %. Díky tomuto vysokému zastoupení křemene se používá název křemenný písek. Kromě křemene může obsahovat nečistoty či příměsi mezi ně patří například jíla [29, 30].

Písek nachází své využití ve stavebním průmyslu, ale i v dalších odvětvích jako je výroba skla, filtrace či další. Využívá se jako jedna ze základních surovin pro výrobu betonu. Zaujímá velkou část objemu a to asi 80 %. Využívá se pro vytvoření pevné struktury bez mezer [30, 31].

2.1.4.5 Jemně mletý vápenec

Vápenec se získává drcením a následným mletím hornin obsahujících vápenec. Kvalitu vápence rozlišujeme podle jemnosti mletí, obsahu vápníku a chemického složení. Vápenec dobré kvality musí obsahovat minimálně 80 % uhličitanu vápenatého a musí být jemně mletý. Vápenec se využívá ve stavitelství. Kromě výroby vápna se využívá jako jedna ze složek při výrobě betonu. Na vápenec se dlouhou dobu hledělo jako na inertní materiál. Jemným mletím bylo však dosaženo určité reaktivnosti tohoto materiálu. Právě jemně mletý vápenec je důležitou složkou betonů, protože díky malým zrnům dochází k zaplnění prostoru mezi zrny cementu. Výhodou jeho použití je, že při tvorbě ettringitu mohou být síranové ionty nahrazeny

uhličitanovými ionty, aniž by se změnil průběh reakce. Dalším pozitivním vlivem vápence v betonu je urychlení hydratace C_3S , a to díky reakci mezi alitem a uhličitanem vápenatým [32, 33, 34].

2.1.4.6 Výztuž

Výztuž se do betonů přidává za účelem zvýšení pevnosti. Vysokohodnotný beton vyniká svojí soudržností mezi vláknem a matricí. Kromě pevnosti vlákna ovlivňují i zpracovatelnost. Vlivem přítomných vláken se zhorší zpracovatelnost betonů [1, 35].

Do betonových směsí se využívá několik druhů výztuže např. ocelová, uhlíková, polypropylénová, polyolefinová či skleněná vlákna. Ocelová vlákna se hojně používají do betonu, a to z důvodu výborných mechanických vlastností. Tato vlákna mohou být různých tvarů a délek, které ovšem musí vyhovovat podmínkám. Pevnost vláken v tahu musí být mezi 600 až 1200 N/mm², délka 12–70 mm a průměr se musí pohybovat mezi 0,15 až 1,2 mm. Průřez vláken může být obdélníkový či kruhový a podle tvaru se mohou dělit např. rovná vlákna s hladkým povrchem, rovná vlákna s profilovaným povrchem, zvlněná vlákna [35].

2.1.4.7 Voda

Pro výrobu betonu se může využívat voda pitná, povrchová, podzemní, odpadní průmyslová nebo voda získaná při recyklaci. Naopak při výrobě by se neměla používat voda splašková. Pokud se pro výrobu použije jiná než pitná voda, musí dojít ke zkoušce vody podle normy ČSN EN 1008 [36].

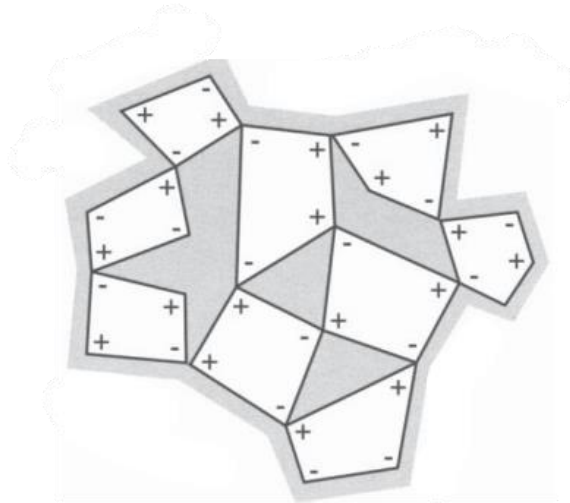
Voda potřebná pro přípravu betonu se využívá ve dvou stádiích. Prvním stádiem je voda záměsová, která se přidává na začátku při míchání betonové směsi. Ve druhém stádiu se jedná o vodu ošetřovací, jež se do betonu dodává po zatuhnutí betonu po dobu několika dní z důvodu udržení vlhkého betonu. Mezi dvě základní funkce vody v betonu patří hydratační a reologická. Smícháním vody s cementem dochází k hydrataci a vytváří se cementový kamen. Potřebné množství na hydrataci odpovídá 23–25 % hmotnosti cementu. Druhou funkcí vody je vytvářet kompaktní směs, která umožňuje tvářet čerstvý beton [37].

Na vlastnosti vysokohodnotného betonu má vliv poměr vody a plniva. Množství vody použité pro výrobu betonu má tedy vysoký vliv na jeho výsledné vlastnosti. Při vysokém množství vody se snižuje pevnost výsledného betonu, protože se přebytečná voda z betonu odpaří a následně dojde k vytvoření dutin. Zvýšení pevnosti je možné docílit snížením objemu vody použité pro výrobu betonu. V ideálním případě by mělo být potřebné množství vody takové, aby všechna zrna hydratovala. Pokud by však bylo použito jen potřebné množství vody pro hydrataci, nedošlo by k úplné hydrataci všech částic, neboť část vody zůstává zadržena ve formě flokulí, a proto je potřeba použít více než minimální množství vody [1, 38].

2.1.4.8 Superplastifikátory

Ideální beton by měl obsahovat jen takové množství vody, které je potřeba na hydrataci, jak již bylo zmíněno výše. Na povrchu cementových zrn se vytváří náboje, které mají sklon se spojovat a vytvářet flokule. K flokulaci dochází, pokud se povrch zrn dostane do kontaktu s polární kapalinou. V případě cementové pasty se jedná o vodu, která se v této struktuře zadržuje, viz obr. 13. Vlivem této zadržené vody je potřeba do směsi přidat více vody. Tato zadržaná voda způsobuje poréznost výsledné struktury, a tedy i zhoršení mechanických vlastností betonu. Aby se dosáhlo lepších vlastností, bylo potřeba snížit množství použité vody.

V druhé polovině 20. století byly nalezeny chemické látky, které snižovaly množství vody a to tím, že zabraňovali částečnému vzniku flokulí. Tyto látky se v dnešní době používají pod názvem plastifikátory nebo superplastifikátory [1].



Obr. 13: Zachycená voda ve flokulované struktuře [1]

2.1.4.8.1 Funkce superplastifikátorů

Hlavní funkcí superplastifikátorů v betonové směsi je zvýšení tekutosti a snížení přebytečné vody. Molekuly superplastifikátorů ovlivňují přitažlivé síly cementu, které způsobují flokulaci. Proti těmto silám působí sterické nebo elektrostatické síly superplastifikátorů, jež oddělují částice cementu od sebe. Díky tomuto nedochází k uzavření vody a tato voda může být použita k hydrataci cementového zrna. Při tomto ději dochází vlastně k neutralizování povrchového náboje zrn cementu. Podle chemické povahy se dělí superplastifikátory na aniontové, kationtové a nepolární (viz obr. 14). První dva druhy působí proti náboji na povrchu částice cementu. Třetí typ ovlivňuje zrno jako dipól a to tak, že působí kolem celé částice [1, 39].



Obr. 14: Rozdělení superplastifikátorů podle jejich chemické povahy [1]

Mezi první plastifikátory, které byly využívány se řadili lignosulfonáty. Jejich použitím byl obsah vody snížen o asi 5 až 10 % bez toho, aby se projevily vedlejší účinky. Zlepšováním technologie betonu došlo k rozvoji těchto prvních plastifikátorů a postupně se objevovaly nové

skupiny, které se nazývají superplastifikátory. V dnešní době je možné použitím superplastifikátorů snížit obsah vody o 12–30 % [1, 40].

2.1.4.8.2 Rozdělení

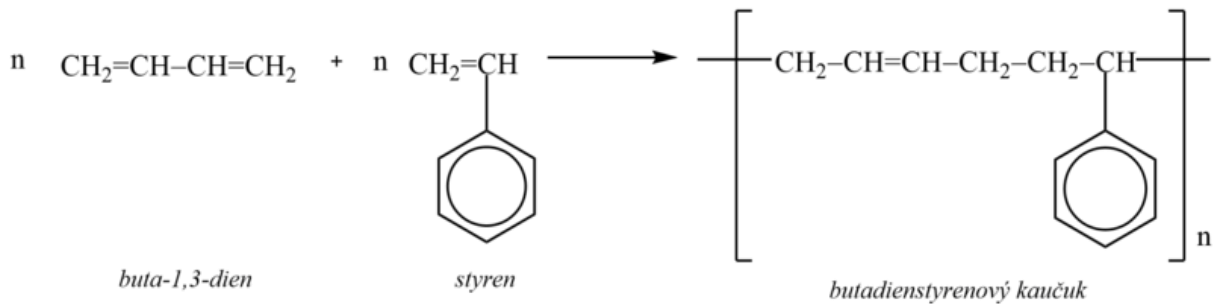
Plastifikátory můžeme rozdělit podle různých vlastností do skupin.

- Podle snížení množství potřebné vody [20]:
 1. Obyčejné plastifikátory – Využitím tohoto typu je možné docílit snížení potřebné vody o 5–15 %.
 2. Superplastifikátory – Použitím superplastifikátorů do směsi betonu je množství vody sníženo o 15–30 %
 3. Hyperplastifikátory – Jedná se o látky, kdy při jejich použití do směsi, se množství potřebné vody sníží o více než 30 %.
- Podle složení makromolekulárního řetězce [1, 41]:
 1. Lignosulfáty
Jedná se o typ plastifikátoru, který se využívá jen zřídka pro přípravu vysokohodnotných betonů. Nejčastěji se do směsi přidává již na začátku míchání směsi.
 2. Polykondenzát naftalensulfátu a formaldehydů
Naftalenové plastifikátory se používají často pro přípravu vysokohodnotných betonů. Mezi jejich vlastností patří zpoždění tuhnutí, což umožňuje delší dobu pro zpracování betonové směsi. Oproti ostatním plastifikátorům jsou levnější a jejich výsledky jsou velice dobré.
 3. Polykondenzát sulfonovaného melaminu a formaldehydu
Stejně jako naftalenové plastifikátory i melaminové se používají pro přípravu vysokohodnotných betonů. Rozdíl mezi těmito dvěma typy je v množství sušiny melaminu, která je asi o 20 % nižší. Dále melaminové plastifikátory oproti naftalenovým zachycují méně vzduchu. Mezi jednu z mnoha dalších výhod patří stálost kvality účinnosti těchto aktivátorů
 4. Polyakryláty a polykarboxyláty
Tento typ má aktivní skupinu COOH, která se váže na různá místa řetězců. Schéma uspořádání těchto molekul připomíná hřeben. Tvar těchto hřebenů má vliv na výsledné vlastnosti. Výhodou těchto plastifikátorů oproti jiným typům je použití v chladném počasí.

2.2 Latexem modifikovaný beton

2.2.1 Úvod

Latex je koloidní roztok částic polymeru ve vodě. Podle původu se latex dělí na přírodní a syntetický. Přírodní latex se získává z kaučukovníku. Tvoří ochranou tekutinu, kterou tato rostlina obsahuje v kůře. Odříznutím tenké vrstvy kůry začne bílá tekutina vytékat ze stromu do sběrné nádoby. Největšími producenty přírodního latexu jsou oblasti Dálného východu, Malajsie a Indonésie. Přírodní latex se využívá například pro výrobu forem na odlévání sádry, vosku, cementu, protože se díky jeho vlastnostem smršťuje kolem odlévaného předmětu a zvýrazní jeho detaily. Syntetický latex je termín, který zahrnuje různé druhy latexů. Tyto latexy se připravují syntetickou cestou např. reakce styrenu a butadienu (viz obr. 15) [42].

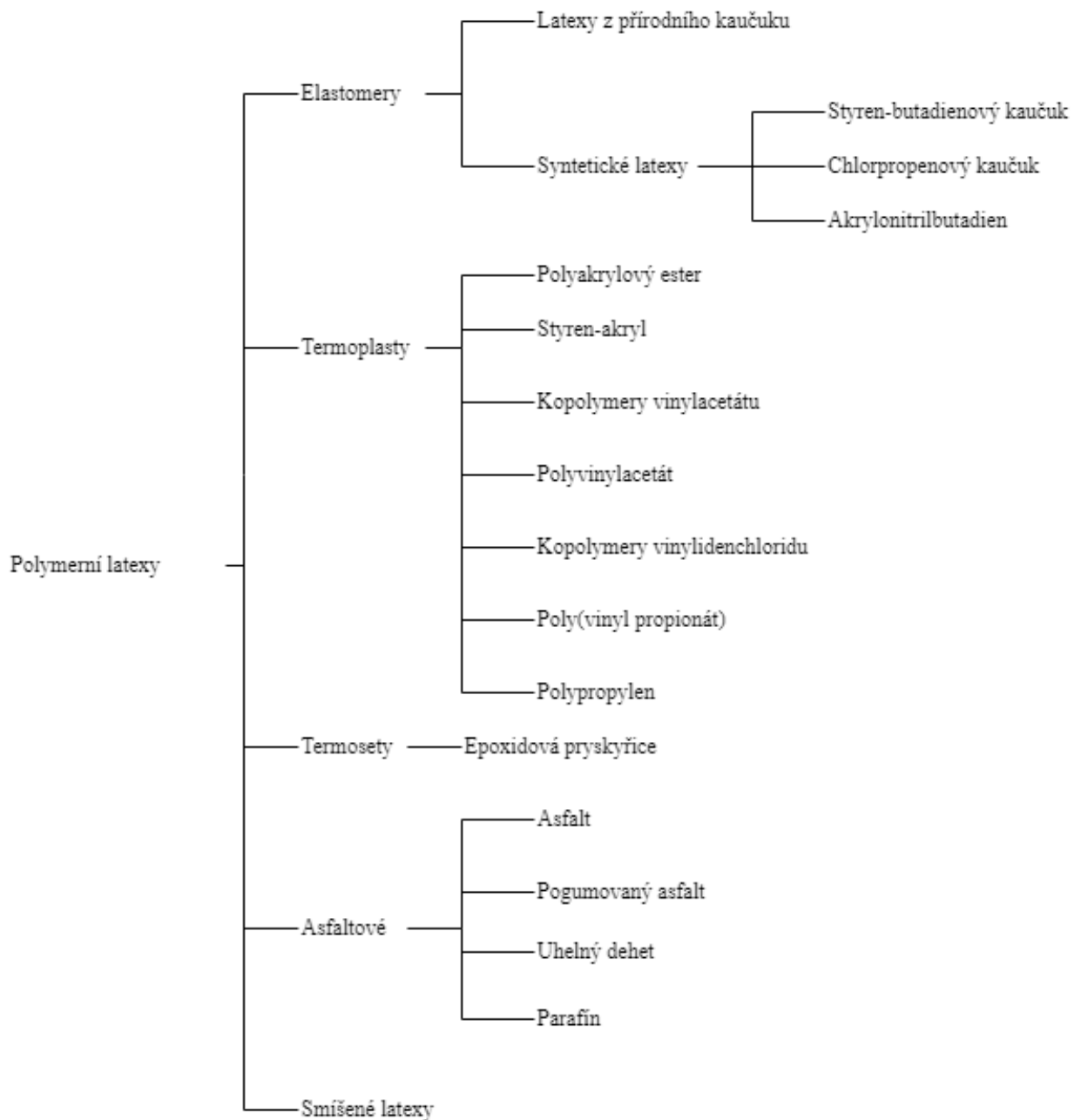


Obr. 15: Schéma reakce butadienu a styrenu [43]

Historie latexem modifikovaných betonů sahá již do počátku 20. století. V roce 1923 byl patentován latentně-hydraulický systém, do kterého byl použit přírodní latex. Tento druh betonu se využíval pro dlažební materiály. V průběhu let se vyvíjeli modifikované systémy, do kterých se přidával přírodní latex. Až o téměř deset let později, a to v roce 1932 bylo navrženo použití syntetického latexu. V následujících letech došlo k rozšíření, využití a zkoumání vlastností tohoto systému [44].

2.2.2 Typy polymerních latexů

Na Obr. 16 je uvedeno rozdělení latexů, které se přidávaly nebo přidávají do betonových systémů. Nejvíce využívané v dnešní době jsou styren-butadienový kaučuk, chlorpropenový kaučuk, polyakryláty, styren-akrylátové kopolymery, kopolymery vinylacetátu a polyvinylacetát. Výsledné vlastnosti se odlišují v závislosti na použitém polymeru [44, 45].

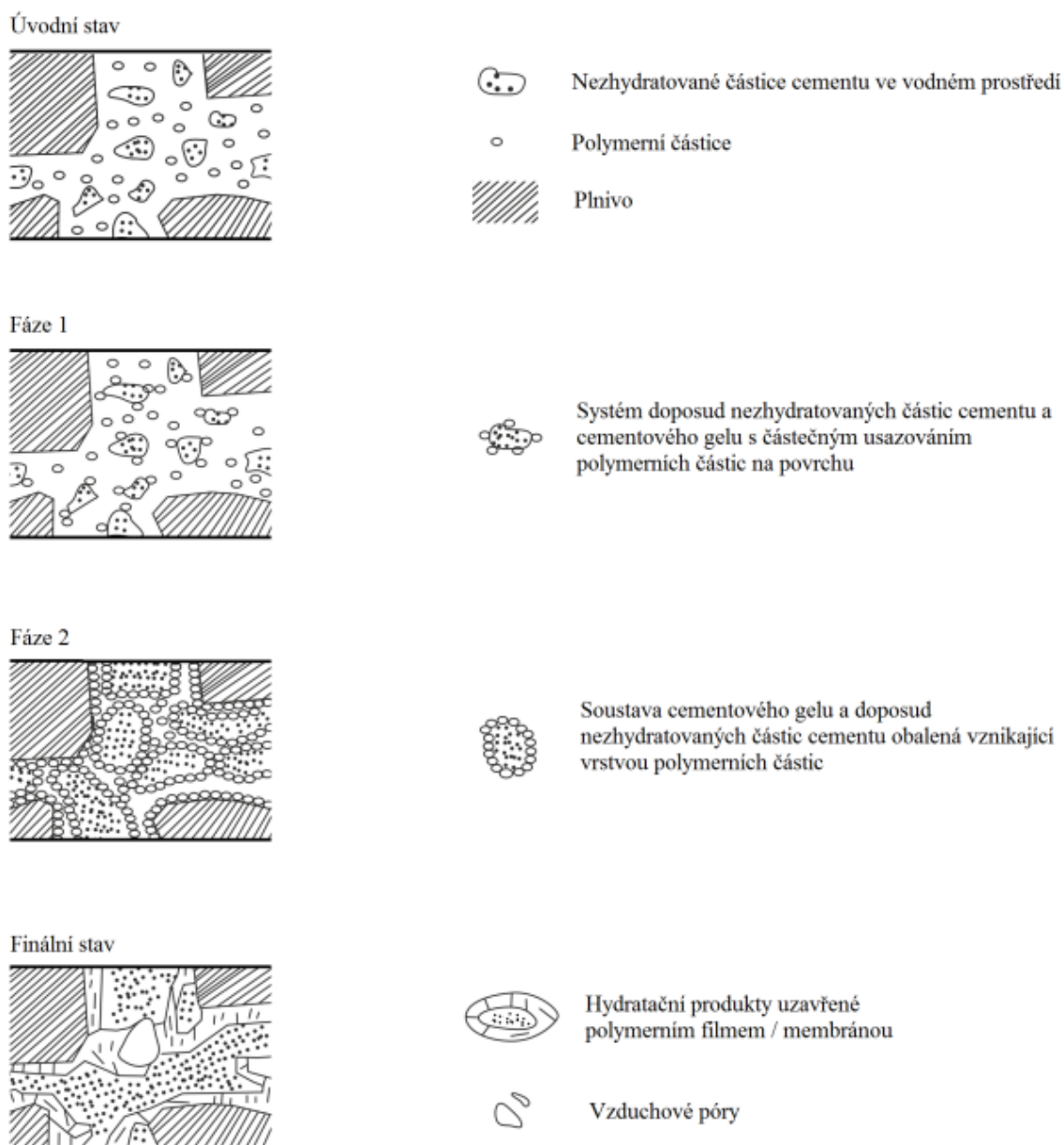


Obr. 16: Seznam typů latexů používaných pro betonové systémy [44, 45]

2.2.3 Princip vzniku latexem modifikovaného cementu

Přidáním polymeru ve formě latexu do cementové směsi vzniká nový materiál, který spojuje vlastnosti obou látek. Polymer se přidává ve formě polymerní disperze. Vznik modifikovaného cementu je řízen dvěma procesy, a to hydratací cementu a vytváření polymerního filmu [46, 47, 48].

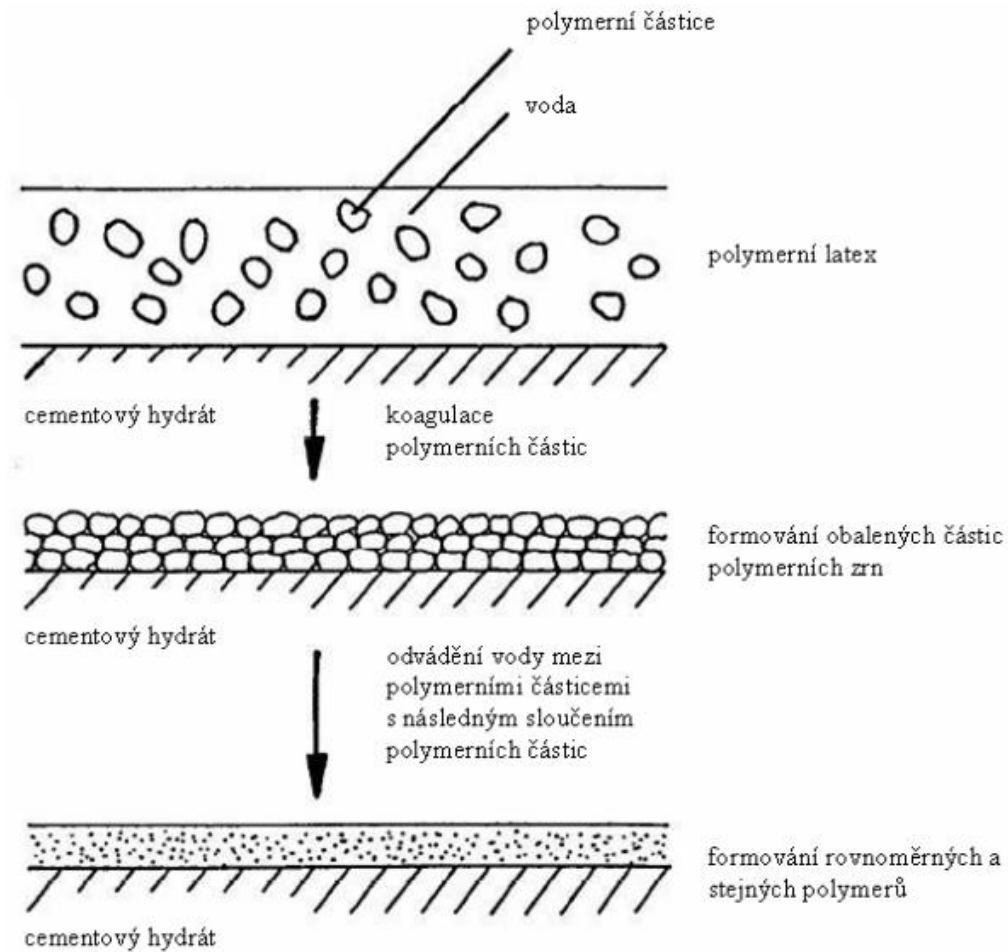
Tvorbu polymerního filmu lze rozdělit do tří fází, při kterých dochází ke vzniku polymerního filmu. Na obr. 17 jsou znázorněny jednotlivé fáze tvorby polymerního filmu od smísení polymeru s cementovou směsí po vznik modifikované struktury. Obr. 18 ukazuje detailní pohled na vznik polymerního filmu. Jedná se o ideální proces vzniku filmu. V reálném prostředí je celý proces ovlivněn množstvím a typem použitého latexu [45, 46, 47].



Obr. 17: Znázornění tvorby polymer modifikovaného cementu [46]

První fáze

Po smísení polymeru s cementem se částice rovnoměrně difundují do celého objemu. Dochází ke vzniku cementového gelu a současně se při hydrataci cementu uvolňuje hydroxid vápenatý. Na povrchu nezhydratovaných cementových zrn a cementového gelu se začínají vylučovat částice uvolněné z polymeru. Vzniká pevná vazba mezi hydráty a kamenivem (viz obr. 19).



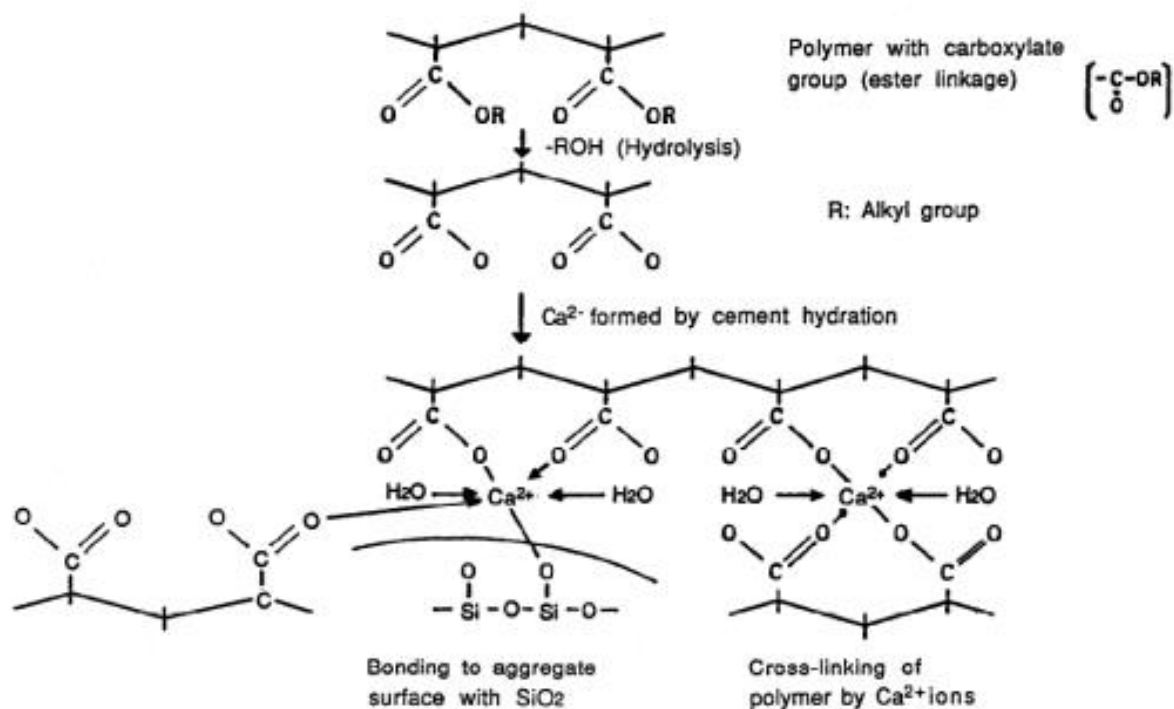
Obr. 18: Detail znázornění tvorby polymerního filmu [47]

Druhá fáze

Ve druhé fázi dochází k zaplňování prostoru kapalně fáze vznikající cement-gelovou strukturou. Snižováním obsahu vody se částice polymeru se shromažďují a vytváří obal kolem povrchu nezhydratovaných částic cementu.

Třetí fáze

Ve třetí fázi se veškerá voda spotřebuje a dojde ke spojení částic polymerů, které vytvoří film na celém povrchu cementových zrn. Provázáním filmů dohromady vzniká spojitá struktura mezi jednotlivými složkami. Vzájemným propojením se vytváří pevná kompozitní struktura.



Obr. 19: Vznik vazby mezi latexem, portlandský cementem a kamenivem [47]

2.2.4 Vlastnosti latexem upraveného cementu

Pro zlepšení vlastností betonu se přidává latex. Použitím tohoto polymeru dochází ke zlepšení některých vlastností naopak některé vlastnosti se zhorší. Na výsledné vlastnosti má vliv použitý druh latexu, ale i množství této látky přidané do cementové směsi. Jak již bylo zmíněno latex přidaný do betonu způsobí vznik filmu, který zabrání snížení šíření mikrotrhlin způsobené namáháním. Použitím latexu se zlepšuje zpracovatelnost betonu, a to díky plastifikačnímu účinku polymeru [49].

2.2.4.1 Mechanické vlastnosti

Latexem modifikované betony se vyznačují vyšší pevností v tahu a ohybu v porovnání s obyčejným betonem. Naopak žádné zlepšení pevnosti v tlaku není zaznamenáno. Změna vlastností je způsobena přítomností polymeru a vazby cementu a kameniva v polymerních systémech. Změnu vlastností polymerem modifikovaných betonech ovlivní povaha latexu, kameniva a cementu, poměr směsi či způsob vytvrzování [45, 48].

Vlastnosti polymerů v latexu ovlivní pevnost v závislosti na poměru monomerů v kopolymerech. Při použití modifikátoru EVA (kopolymer ethylenvinylacetát) a poly(styrenakrylátu) lze dosáhnout maximální pevnosti, pokud bude dosaženo 13 % vázaného ethylenu a 55 % styrenu [45, 48, 50].

Stejný vliv jako má poměr monomerů v kopolymeru má i poměr polymeru a cementu. Tento poměr zvyšuje více pevnost v tahu a ohybu než pevnost v tlaku a smyku. Pro získání výborných pevností je nutný poměr polymeru a cementu větší 5 až 20 %. Při vyšších poměrech vzniká nespojitá struktura a tím dochází ke snížení pevnosti. Ke snížení pevnosti dochází i při nízkém obsahu latexu, neboť nízký poměr snižuje pevnost jen málo [45, 48, 51].

Cement kromě poměru s polymerem může ovlivnit pevnost i jeho typem. Při použití hlinitanového cementu se pevnost zvýší 1,5 až 2krát oproti pevnosti betonu s použitím jiných cementů. Tento rozdíl je způsobený počáteční fází tuhnutí [45, 48, 50].

Latexy se vyznačují mechanickou a chemickou stabilitou v závislosti na obsahu povrchově aktivních látek, tzv. stabilizátorů. Se zvyšujícím se množstvím těchto látek roste stabilita latexů, díky čemuž se mohou latexy dispergovat v modifikovaném betonu bez vzniku shluků. Důležitý je obsah stabilizátorů. Jak již bylo zmíněno z jejich vyšším obsah jsou latexy více stabilní, ale při vysokém obsahu to může mít negativní vliv na pevnost výsledného materiálu. Zhoršené vlastnosti betonu jsou ovlivněny sníženou pevností latexového filmu, zpožděnou hydrataci cementu, anebo také zvýšením obsahu zanášeného vzduchu. Důležitý je tedy optimální obsah povrchově aktivních látek, který činí 5 až 30 % hmotnosti sušiny. Proti zabránění zanášení vzduchu se využívají protipěnidla. U těchto látek stejně jako u stabilizátorů se musí hlídat vliv na hydrataci cementu. Při špatném výběru druhu nebo poměru těchto látek může dojít ke zpomalení hydratace cementu, což může prodlužovat dobu tuhnutí [45, 50, 51].

Pevnost dále může ovlivnit i velikost polymerních částic. Betony modifikované PVAC dosahovaly nejvyšších pevností v rozmezí velikosti dispergovaných polymerních částic 1 až 5 μm . Při použití PVDC pevnost rostla se snižující se velikostí částic. Kromě velikosti polymerních částic závisí pevnost i na velikosti zrn písku, tedy na jeho jemnosti. Pevnost v ohybu a tlaku se zvyšuje s modulem jemnosti [45, 48, 50].

Modifikované betony se vyznačují tažností a pružností v porovnání s běžnými betony. Prodloužení se zvyšuje 2 až 3krát oproti nemodifikovaným betonům. Tento nárůst je způsoben vznikem filmů a díky vysoké pevnosti v tahu může dojít k zastavení šíření mikrotrhlin.

Zvýšení pevnosti ohybu je možné dosílit použitím ocelových vláken, neboť potřebují větší množství energie na vytažení z matrice. Kromě pevnosti v ohybu vyšší obsah ocelových vláken zlepšuje i houževnatost [45, 48, 51].

2.2.4.2 Rázová houževnatost

Odolnost proti nárazu u modifikovaných betonu je vyšší než u běžných betonů. Toto je způsobeno vysokou odolností proti nárazu samotného polymeru. Hodnoty se zvyšují se rostoucím poměrem polymeru a cementu. Lepších hodnot dosahují betony s přídavkem elastomerů než ty, do kterých byly přidány termoplasty. Rázovou houževnatost může zlepšit i přídavek ocelových vláken [45].

2.2.4.3 Odolnost proti korozi

V železobetonových konstrukcích dochází vlivem agresivního prostředí k zhoršení trvanlivosti betonu. Hlavní příčinou je koroze ocelové výztuže. Ke korozi dochází vlivem chloridových iontů, které právě tento negativní vliv vyvolávají. Využitím právě latexu do betonové směsi se zvýší schopnost betonu chránit výztuž před korozi, a to snížením propustností chloridových iontů a jejich difúzi materiálem [52].

2.2.4.4 Vlastnosti mikrostruktury

Latex ve struktuře je rovnoměrně rozptýlen a hustou cementovou sítí. Vytváří se hustší síť, což je způsobeno vznikem krystalků menší velikosti. Ve struktuře se také nachází menší velikost pórů, neboť větší póry se vyplňují polymerem. Vlivem menších pórů se snižuje propustnost tekutin, ale také se naopak zvyšuje odolnost a trvanlivost betonu [53].

2.2.4.5 Vodotěsnost

Latexem modifikované betony vykazují lepší vodotěsnost než nemodifikované betony. Nasákavost a pronikání vody betonem je spojena s vysokým obsahem velkých pórů. Jak bylo zmíněno výše u tohoto typu betonů je snížena obsah pórů a z toho to důvodu dochází i k větší vodotěsnosti [53].

2.2.5 Využití modifikovaných betonů

Latexem modifikovaný beton se díky svým mechanickým vlastnostem využívá ve stavebním průmyslu. Nachází uplatnění jako stavební materiál pro různé aplikace. Především se používá jako překryvná vrstva mostů, v podlahách, vodotěsných a opravných materiálech. Díky své korozní odolnosti beton obsahující přídatek latexu se může využívat pro konstrukční účely, např. jako překlady nosních desek, neboť déle odolává náročným chemickým vlivům [49, 52].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály

Poměr jednotlivých složek byl využitý z výsledků projektu TAČR TREND „Prostředky pro zvýšení balistické ochrany vozidel a kritické infrastruktury“. Pro měření byly použité následující suroviny:

- Křemičitý písek
- Dorsilit 9
- Mikrodorsilit 110
- Mikropísek ST2
- Bílý cement Aalborg
- Mikrosilika Füller-Q
- Demineralizovaná voda
- Mikrovlákna
- Superplastifikátory SP CHRYSO Fluid Optima 185 a 590
- Latexy: Plextol, Revacryl a Duvilax.

3.1.1 Křemičitý písek

Betonová směs byla připravena z jemného křemičitého písku dle normy ČSN EN 196-1. Maximální velikost zrna činila 0,5 mm. Tyto písky byly dodány od společnosti Filtrační písky, spol. s.r.o. Chlum.

3.1.2 Dorsilit 9 a mikrodorsilit 110

Dorsilit 9 a mikrodorsilit 110 byly použity od společnosti Gebrüder Dorfner GmbH & Co.KG. Křemičité moučky jsou získávány suchým mletím křemičitého písku a následně se třídí na větrných třídičích. Dorsilit může obsahovat až 98 % SiO₂ a jeho jemnost je 0–50 μm. Mezi jeho základní vlastnosti patří lehká dispergovatelnost a chemická odolnost, díky kterému je možné ho používat do všech pojiv, a proto právě snižuje spotřebu pojiv. Tato moučka je odolná proti povětrnostním vlivům a je světlostálá. Fyzikální vlastnosti dorsilitu jsou uvedeny v tab. 2 [54].

Tab. 2: Fyzikální vlastnosti dorsilitu

Měrná hmotnost [g /ml]	2,63
pH	6 až 8
Vlhkost [%]	<0,1
Tvrдость	7

3.1.3 Mikropísek ST2

Do směsi byl použitý mikropísek ST2 od společnosti Sklopísek Střeleč, a.s. Jedná se o upravené písky s více než 99 % SiO₂. Další oxidy, jako jsou Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O a K₂O, se zde nachází ve stopovém množství. Velikost středního zrna je 27 μm. Hrubší a jemnější zrna se nachází jen ve stopových množstvích. Vlastnosti částic a fyzikální charakteristiky mikropísku jsou uvedeny v tab. 3 [55]:

Tab. 3: Vlastnosti mikropísku

Hustota [g/cm ³]	2,65
Tvrдост	7
Vlhkost [%]	0,2
pH	6,4
Měrný povrch [cm ² /g]	3170

3.1.4 Bílý cement Aalborg

Jednou ze základních surovin pro výrobu betonu je cement. Pro přípravu byl použitý bílý cement Aalborg typu CEM I 52,5 R–SR 5 white. Cement obsahuje 0,6 % MgO, 1,8–2,3 % SO₃, méně než 0,04 % chlorných iontů a méně než 0,0002 % šestimocného chromu. Mezi jeho charakteristické vlastnosti patří vysoká bělost, nízký obsah alkálií, vysoká odolnost proti síranům a velmi vysoký nárůst pevnosti. Důležité vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4 [56].

Tab. 4: Vlastnosti cementu

Bělost [%]	85–89,5
Měrný povrch [m ² /kg]	400
Měrná hmotnost [kg/m ³]	3090–3190
Sypná hmotnost [kg/m ³]	1080

3.1.5 Mikrosilika Füller-Q

Byla použita mikrosilika Füller-Q od německého výrobce RW silicon GmbH. Obsahuje méně než 97 % SiO₂ a ostatních sloučenin je méně než 1 %. Mezi tyto látky patří SiC, MgO, Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O a Fe₂O₃. Mezi základní vlastnosti mikrosiliky patří hustota, která činí 330–360 kg/m³, a specifický povrch, jehož hodnota je 16–20 m²/kg. Hodnota pH je 7,7.

Při práci s mikrosilikou je důležité ji chránit před vlhkostí a kontaminací, a proto při správném skladování je její skladovatelnost neomezená [57].

3.1.6 Voda

Pro přípravu vzorků byla použita demineralizovaná voda připravená v laboratořích fakulty chemické VUT Brno.

3.1.7 Superplastifikátor

Pro přípravu vzorků byly použity dva druhy superplastifikátorů, a to SP CHRYSO Fluid Optima 185 a 590 ze společnosti CHRYSO Chemie, s.r.o.

SP CHRYSO Optima umožňuje vytvářet soudržné a nízkoviskózní betony, díky své specifické molekulární struktuře. Tyto betony se vyznačují dlouhou dobou zpracovatelnosti. Při práci s tímto superplastifikátorem by se mělo vyhýbat dlouhodobému vystavení silnému teplu, měl by se chránit před mrazem. Pokud dojde k zamrazení, produkt si zachovává své vlastnosti a po rozmrazení se homogenizuje mícháním. Hustota superplastifikátoru je 1,05 g/cm³ a pH se pohybuje kolem 5 [58].

3.1.8 Latex

Vzorky polymer modifikovaných betonů byly vytvořeny použitím třech druhů latexu: Plextol, Revacryl a Duvilax.

3.1.8.1 Plextol

Plextol X 4002 je vodná, samosíťující akrylátová emulze s vysokým obsahem pevných látek. Disperze obsahuje aniontový emulgátor a neobsahuje koalescenty, rozpouštědla ani změkčovadla. Vytváří čistý lepivý film při teplotách vyšších, než je minimální teplota tvorby filmu. Jedná se o látku, která podle směrnice nevyžaduje označení o nebezpečném zboží. Jelikož Plextol X 4002 obsahuje jako disperzní médium pouze vodu a žádné rozpouštědlo, je zařazen do třídy nebezpečnosti pro vodu 1, což znamená mírně nebezpečný. Obsah latexu v odpadní vodě lze odstranit flokulanty. Před použitím musí být disperze homogenizována. Základní vlastnosti Plextolu X 4002 jsou uvedeny v tab. 5 [59]:

Tab. 5: Základní vlastnosti Plextol X 4002

Suchý zbytek [%]	59,5
pH	2,5
Viskozita [MPa ·s]	1000
Teplota skelného přechodu [°C]	-41
Hustota [g/cm ³]	1,00
Velikost částic [μm]	0,55
Minimální teplota tváření filmu [°C]	0
Povrchové napětí [mN/m]	40

3.1.8.2 Revacryl

Revacryl AE 2091 je vodná disperze styren-akrylátového kopolymeru s vysokým obsahem pevných látek. Disperze obsahuje aniontový emulgační systém a neobsahuje pomocné látky pro tvorbu filmu a rozpouštědla, změkčovadla ani čpavku. Vytváří čirý lepkavý film. Pro dobrou kompatibilitu s cementem se používá jako pružící látka v maltách. Při skladování je důležité, aby nádoby byly těsně uzavřeny. Během přepravy, skladování a zpracování se musí zabránit kontaktu latexu s kovy nechráněnými proti korozi a s neželeznými kovy. Základní vlastnosti Revacryl AE 2091 jsou uvedeny v tab. 6 [60]:

Tab. 6: Základní vlastnosti Revacryl AE 2091

Suchý zbytek [%]	57
pH	8
Viskozita [MPa ·s]	350
Teplota skelného přechodu [°C]	-11
Hustota [g/cm ³]	1,04
Velikost částic [μm]	0,4
Minimální teplota tváření filmu [°C]	0
Povrchové napětí [mN/m]	40

3.1.8.3 Duvilax

Duvilax BD-20 je homopolymerní polyvinylacetátová disperze, která neobsahuje plnidla se změkčovadly. Emulze je složena z neionogenního emulgátoru a polyvinylalkoholu. Působí jako

pojivo, zlepšuje mechanické vlastnosti ve stavebních směsích, zpracovatelnost a soudržnost. Má schopnost zarovnávat a vyhlazovat povrch. Tento latex je biologicky odbouratelný a není zdraví škodlivý. Uchovává se v uzavíratelných nádobách a nesmí se vystavovat přímému záření. V nádobách se musí zamezit volnému přístupu vzduchu z okolního prostředí. Základní vlastnosti Duvilaxu BD-20 jsou uvedeny v tab. 7 [61, 62]:

Tab. 7: Základní vlastnosti Duvilax BD-20

Suchý zbytek [%]	53,5
pH	3–6
Viskozita [MPa ·s]	3000–8000
Teplota skelného přechodu [°C]	-11
Hustota [g/cm ³]	1,05–1,09
Velikost částic [μm]	0,3–3
Minimální teplota tváření filmu [°C]	2

3.1.9 Mikrovlákna

Do betonové směsi byla přidána ocelová mikrovlákna od společnosti Krampe Harex o rozměrech 6 mm × 0,175 mm. Měla kulatý průřez a povrch měla pokrytý mosazí. Tato mikrovlákna vynikají vysokou rázovou houževnatostí [63].

3.2 Příprava vysokopevnostního betonu s latexem

3.2.1 Příprava surovin

Pro měření byly připravené vzorky o poměru w/c 0,19. Byl připravený referenční vzorek a vzorky obsahující latexy. Pro přípravu vzorků byly použité tři druhy latexů: Plextol, Revacryl a Duvilax. Použitá množství latexů bylo 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 %. Hmotnost použitého latexu použitá pro přípravu vzorku byla přepočítána z procent na gramy. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 8. Z technických listů bylo zjištěné množství sušiny a z této hodnoty byl vypočítán obsah vody v latexu. O toto množství vody byla ponížena voda potřebné pro přípravu pasty, a to z důvodu zachování stejného poměru jako u referenčního vzorku. Voda se do směsi přidávala ve dvou dávkách. Vypočítaná hodnota vody v latexu ponížila množství kapaliny ve druhé dávce. Všechny potřebné hodnoty vody jsou uvedeny v tab. 8. Tabulka obsahuje množství vody první dávky a množství vody pro druhou dávku poníženou vypočítaný objem vody v latexu. Objem vody v první dávce byl stejný kromě jednoho vzorku. Do tohoto vzorku byl přidán latex Duvilax s množstvím 60 g. Objem vody v latexu převyšoval množství vody ve druhé dávce. Z tohoto důvodu druhý přídavek vody nebyl proveden a množství vody v první dávce bylo poníženo o potřebný objem.

Tab. 8: Objem potřebné vody a hmotnost použitého latexu

Latex	Vzorek		První dávka [ml]	Druhá dávka [ml]
	Množství latexu [%]	Množství latexu [g]		
Reference	0	0	175,5	20,3
Plextol	0,20	5	175,5	18,8
	0,40	10	175,5	17,4
	0,60	15	175,5	15,9
	1,20	30	175,5	11,6
	2,50	60	175,5	2,9
Revacryl	0,20	5	175,5	18,7
	0,40	10	175,5	17,1
	0,60	15	175,5	15,5
	1,20	30	175,5	10,7
	2,50	60	175,5	1,1
Duvilax	0,20	5	175,5	18,4
	0,40	10	175,5	16,6
	0,60	15	175,5	14,8
	1,20	30	175,5	9,5
	2,50	60	174,1	0

Nejdříve byly naváženy sypké suroviny, jejichž potřebné množství je uvedeno v tab. 9. Poměr jednotlivých složek je výsledkem projektu TAČR TREND „Prostředky pro zvýšení balistické ochrany vozidel a kritické infrastruktury“. Množství sypkých surovin se nezměnilo přidáním latexu, a proto je pro všechny vzorky stejné. Do mísy bylo odváženo 202,5 g ocelových vláken.

Tab. 9: Navážky sypkých surovin, superplastifikátorů a ocelových vláken

Název	Hmotnost [g]
Normovaný písek jemný dle ČSN EN 196-1	1069,2
Písek	267,3
Mikromletý písek ST 2	91,1
Mikro-dorsilit 110	273,4
Bílý cement Aalborg CEM I 52,5 N	583,2
Mikrosilika RW Füller-Q	145,8
	Objem [ml]
SF	14,9
SP	7,7
	Hmotnost [g]
Ocelová vlákna	202,5

Do odměrného válce 250 ml byla odměřena první dávka vody (viz tab. 8). Do té bylo odměřeno potřebné množství superplastifikátorů (viz tab. 9). Následně bylo přidáno potřebné

množství latexu (u referenčního vzorku byl tento krok přeskočen). Všechny tekuté složky v odměrném válci byly řádně ručně promíchány převrácením válce.

3.2.2 Postup přípravy vzorků

Pro míchání byl použitý kuchyňský mixér KitchenAid (viz obr. 20). V míse byly sypké suroviny 1 minutu promíchány při nejnižší rychlosti, aby se směs dostatečně zhomogenizovala. Tekuté složky z odměrného válce se nalily do mixéru. Zvýšila se rychlost míchání a byly zapnuty stopky. Stěny mísy byly setřeny stěrkou během míchání, aby došlo k setření práškových zbytků. Po pěti minutách byla přidána druhá dávka vody, která byla odměřena injekční stříkačkou. Po třech minutách (od počátku po osmi minutách) bylo přidáno 202,5 g ocelových vláken. Vlákna byla sypána do mísy bez vypnutí mixéru. Směs se nechala míchat další 2 minuty. Celkem se mísilo 10 minut.



Obr. 20: Připravená směs v mixéru KitchenAid

U směsi došlo ke změření rozlivu. Následně byla směs přelita do vakuovacího systému (viz obr. 21). Na okraj mísy na vakuování bylo nasazeno těsnění. K míse s těsněním byla připevněna ruční míchačka a hadice s ventilem. Hadice sloužící k odvodu plynů byla spojena s olejovou vývěvou. Při měření došlo k zapnutí vývěvy a následnému otevření ventilu. Směs bobtnala únikem plynů, a proto byla směs míchána. Míchání bylo prováděno až do varu vody. Ventil byl uzavřen a vývěva byla odpojena. Míchačka byla opatrně odstraněna tak, aby nedošlo k provzdušnění směsi. U odvzdušněné směsi byl znovu změřen rozliv.



Obr. 21: Vakuovací systém

Připravily se formy na vzorky. Do forem byla nalita směs, která nebyla použita na rozliv, neboť u této směsi by došlo k znovu provzdušnění. Z každé formy vznikla tři zkušební tělesa o velikosti $40 \times 40 \times 160$ mm. Naplněné formy byly přeneseny na vibrační stůl a směs byla vibrována dvakrát (viz obr. 22). Vzorky byly nechány na vzduchu hodinu a po uplynutí tohoto času byla forma vložena do vody na 24 hodin. Po uplynutí této doby došlo k odformování a zvažení těles. Ty následně byly vloženy zpět do vody na potřebnou dobu. Vzorky s obsahem latexu 1,2 a 2,5 % byly odformovány až po 48 hodinách, neboť po 24 hodinách nebyly vzorky dostatečně zatuhlé.



Obr. 22: Připravené vzorky na vibračním stole

3.2.3 Postup přípravy vzorků pro balistické zkoušky

Zkušební tělesa pro balistické zkoušky byla připravená ze stejných navážek jako směs pro výrobu vzorků na zkoušky pevnosti. Míchání směsi bylo provedeno v laboratorní míchačce, která se využívá pro výrobu betonových směsí. Nejdříve došlo k přípravě tekutých i sypkých složek. Postup míchání byl stejný jako u výroby vzorků. Betonová směs byla odplyněna pomocí vakuového systému. Odplyněná směs byla přelita do forem na balistickou zkoušku. Celkem bylo připraveny dva druhy vzorků. První byl s přídavkem 0,60 % Plextolu a 0,40 % Duvilaxu. Od každého vzorku bylo vyrobeno 5 balistických kroužků.

3.3 Použité metody – zkoušky betonu

3.3.1 Zpracovatelnost

Při zkoušce rozlití kužele se měří rozlití čerstvého betonu. Pro stanovení se využívá forma ve tvaru kužele, jehož průměr dolní základny je 200 ± 2 mm a horní základny 130 ± 2 mm. Výška kužele odpovídá 200 ± 2 mm. Pro měření se umístí forma na desku a následně se naplní čerstvým betonem. Po zvednutí kužele se beton nechá rozlít a po uplynutí 30 s se změří rozliv (viz obr. 23) [64, 65].



Obr. 23: Schéma měření rozlivu (vlevo); rozlití kužele (vpravo)

Rozlití se stanoví z průměru těchto dvou hodnot a zaokrouhlením na nejbližších 10 mm. Ze získané hodnoty lze klasifikovat vlastnosti betonu (viz tab. 10).

Tab. 10: Klasifikace zkoušky [64]

Stupeň	Druh směsi	Průměr rozlití [mm]
F1	Směs tuhá	≤340
F2	Směs plastická	350–410
F3	Směs měkká	420–480
F4	Směs velmi měkká	490–550
F5	Směs tekutá	560–620
F6	Směs velmi tekutá	≥620

3.3.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena podle normy ČSN EN 12350-6. Tato hodnota byla vypočítána podle vzorce [66]:

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

D – objemová hmotnost [kg/m³]

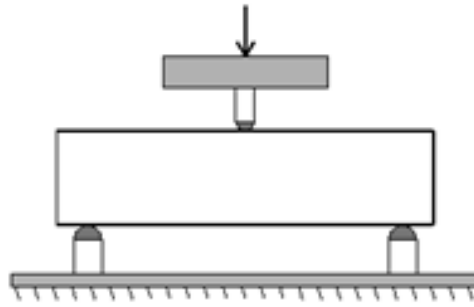
m – hmotnost [kg]

V – objem tělesa [m³]

Objem tělesa byl stanoven z velikosti formy, jejíž rozměry činí 40 mm × 40 mm × 160 mm. Hmotnost každého vzorku byla změřena dvakrát. Poprvé po odformování, což znamená po jednom dni, a podruhé při měření zkoušek pevnosti, to znamená po sedmi nebo 28 dnech.

3.3.3 Pevnost v tahu za ohybu

Při zjišťování pevnosti betonu v tahu za ohybu se využívá třibodová nebo čtyřbodová zkouška. Při čtyřbodové zkoušce se působí dvěma válci ze spodní i horní části. Naopak u třibodové se na horní straně nachází pouze jeden válec (viz obr. 24). Při čtyřbodové zkoušce dochází k porušení vzorku čistým ohybem. U třibodové zkoušky působením napětí dochází k porušení vzorku vlivem ohybu a smyku. Při měření musí válečky ležet rovně, aby došlo ke správnému rozložení sil [67, 68, 69].



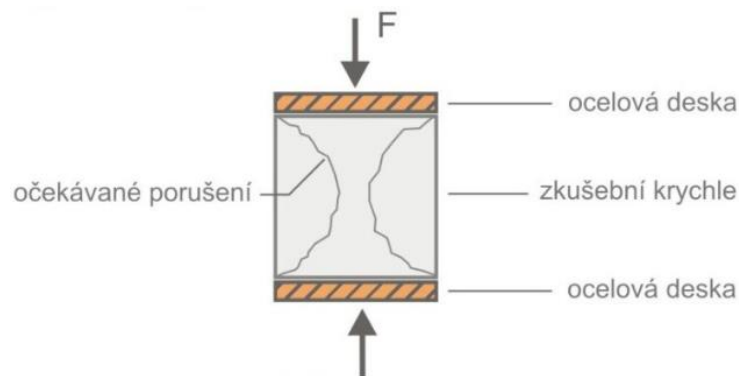
Obr. 24: Uspořádání zatěžování tělesa při tříbodové zkoušce [69]

Test pevnosti v tahu za ohybu byl proveden pro tříbodový ohyb na testovacím přístroji Instron 598. Pro měření byla použita siloměrná hlava 250 kN. Vzdálenost podpěr byla 100 mm. Rychlost zatěžování byla nastavena na 3 mm/min do zatížení 5 kN a poté se změnila na 0,08 kN/s. Pro zkoušku byly použité vzorky o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Zkušební tělesa byla uchována pod vodou a před měřením osušena a zvážena. Pro měření byly využité vzorky po 7 a 28 dnech s přídavkem latexu 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 %. Test pevnosti v tahu za ohybu byl proveden na třech tělesech od každého vzorku. U některých vzorků došlo ke špatnému stanovení, a proto některá měření nemohla být použita [67, 68, 69].

3.3.4 Pevnost v tlaku

Pevnost tlaku se rovná velikosti napětí, kterým se působí na vzorek až do porušení. Maximální napětí, jímž se působilo na vzorek, označuje třídu betonu. Podle normy ČSN EN 206-1 lze beton rozdělit do 14 pevnostních tříd lehkého betonu a do 16 pevnostních tříd obyčejného a těžkého betonu [70, 71].

Při zkoušce je napětí vkládáno na krychli nebo válec. Před měřením je nutné měřené vzorky důkladně osušit. Po vložení do měřicího přístroje se musí zkontrolovat správné umístění, aby došlo k rovnoměrnému zatěžování (viz obr. 25) [70, 71].



Obr. 25: Uspořádání pro zkoušku pevnosti v tlaku [70]

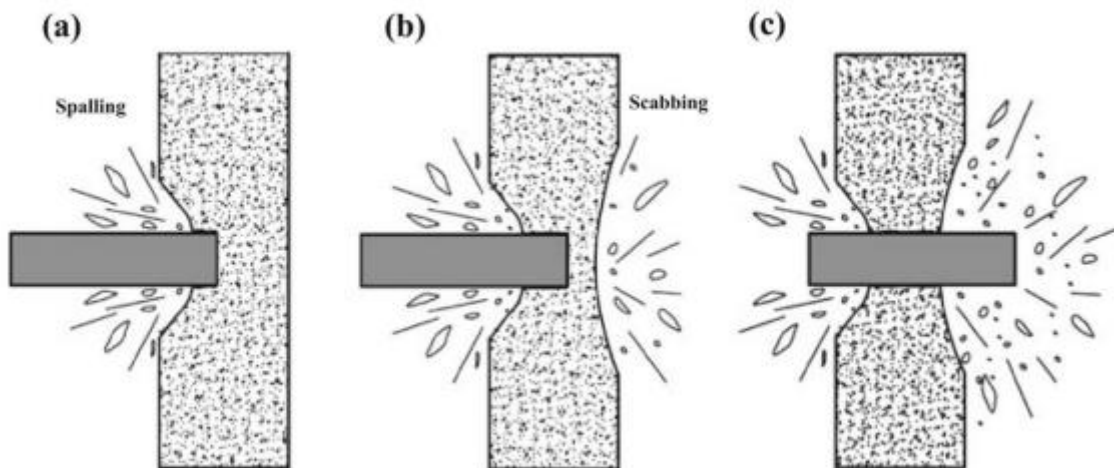
Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na testovacím přístroji BetonSystem. Pro měření byly využité vzorky z trojbodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Velikost vzorků byla $40 \times 40 \times 160$ mm. Měření probíhalo na každém vzorku dvakrát, a to pokaždé na půlce vzorku, která nebyla porušena. Lze tedy usuzovat, že test by proveden na vzorku tvaru krychle o délce hrany 40 mm. Zatěžovací rychlost byla nastavena na 2,4 kN/s na velikost plochy 1600 cm^2 .

Všechny vzorky byly uchovávány pod vodou. Před měřením byly osušeny a následně zváženy. Zkouška byla provedena na třech vzorcích. Pro všechny měření byly využité vzorky po sedmi a 28 dnech s přísávkem latexu 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 % [70, 71].

3.3.5 Balistická zkouška

Při balistické zkoušce dochází k nárazu vysokorychlostním bodovým zařízením. Náraz na stěnu způsobuje vznik vysokorychlostní tlakové vlny. Přední čelo přenáší napětí skrz desku a na zadním čele může docházet k odlupování materiálu. Pro zvýšení odolnosti betonové konstrukce se přidává ocelová výztuž [72, 73].

Při zkoušce je vedena střela do vzorku. Tato střela prochází třemi stádii: průnik, scabbing, perforace (viz obr. 26). V prvním kroku proniká střela do vzorku do určité vzdálenosti. V tomto kroku dochází k odprýskání betonu v okolí střely. Na druhé straně vzorku zůstává vzorek neporušený. Při druhém kroku (scabbingu) střela proniká do takové hloubky, že na druhé straně vzorku dochází k odlupování materiálu či jeho oděru. V posledním třetím kroku tzv. perforaci střela prochází vzorek [74].



Obr. 26: Stádia průniku střely při balistické zkoušce [74]

Pro zkoušku byly využity balistické kroužky, které byly odlity do kruhového ocelového rámečku o tloušťce 6,3 mm, výšce 40 mm a vnějším průměru 168 mm. Vzorek byl umístěn do zkušebního rámu před svědečný systém do jedné středové osy, viz obr. 27. Svědečný systém je tvořen duralovým válečkem o výšce 80 mm, průměr 90 mm, materiál EN AW-2030-T4 (AlCu4PbMg). Hustota použitého materiálu činí 2,8085 g/cm³.



Obr. 27: Umístění vzorku a svědečného materiálu ve zkušebním rámu

Pro zkoušku byla využita hlaveň s laserovým zaměřovačem o ráži 7,62 mm x 54R B32 API dle STANAG 4569 Level K3 – průbojně zápalný s ocelovým jádrem. Při zkoušce je do jednoho tělesa veden jeden nástřel pod dopadovým úhlem 0° NATO na geometrický střed vzorku.

Zkouška byla prováděna u těles, které zrály pod vodou 34 dní. Zkouška po 28 dnech nemohla být z časových důvodů provedena. Balistická ochrana byla změřena na třech vzorcích: referenční vzorek, vzorek s obsahem 0,60 % Plextolu a vzorek s obsahem 0,40 % Duvilaxu.

Pomocí získaných hodnot bylo možné určit diferenciální faktor na základě následující rovnice:

$$DEF = \frac{\rho_r(P_r - P_{res})}{\rho_s H_s} \quad (3)$$

kde jednotlivé parametry značí: [balistika]

ρ_r - objemovou hmotnost materiálu svědečného systému

ρ_s – objemová hmotnost zkoušeného materiálu

P_r - penetrace projektilu do svědečného systému bez přítomnosti zkušebního tělesa

P_{res} - residuální penetrace projektilu ve svědečném systému po průstřelu zkušebního tělesa

H_s – tloušťka zkušebního tělesa

3.3.6 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Rastrovací elektronová mikroskopie slouží k pozorování struktury materiálu. Pro měření se využívá rastrovací elektronový mikroskop. Mikroskop je složen z několika částí: zdroj elektronů, anoda, čočky, objektiv, detektor, vzorkovací komora a počítač. K pozorování se jako zdroj záření používají elektrony. Z tohoto důvodu je měření prováděno ve vakuu, aby nedošlo ke srážce elektronů se vzduchem. Elektrony, které jsou vyzářeny z katody, prochází přes čočky. Tyto tzv. primární elektrony dopadají na vzorek. Dopadem dochází k vyražení elektronu, které jsou následně detekovány [75].

Pro pozorování vybraných vzorků byl použitý rastrovací elektronový mikroskop JEOL JSM-7600F v módu sekundárních elektronů. Mikroskop byl nastaven na urychlovací napětí 15 kV a proud svazku na hodnotu 16. Byly pořízené snímky s různým zvětšením (50x a 500x). Prvkové mapy byly získány pomocí energodisperzního analyzátoru rtg. záření Ultim Max 100 (Oxford Instruments). Před měřením byly vzorky zvodivěny pozlacením (zařízení od firmy Polaron).

4 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

4.1 Zpracovatelnost

Rozlití kužele bylo změřeno pro každou betonovou směs dvakrát. Poprvé ihned po zamíchání a podruhé po odvzdušnění směsi. Prvním rozlivem bylo zjištěno, že přítomné latexy zvyšují tekutost betonové směsi, neboť jejich přítomností se zvyšuje množství vzduchu. Tento přítomný vzduch by mohl zhoršovat vlastnosti výsledného betonu, a proto muselo dojít k vakuování, aby došlo ke snížení obsahu vzduchu. V tab. 11 jsou uvedeny hodnoty rozlivu pro každou látku a referenci. První sloupce obsahují hodnoty rozlivu před vakuováním a druhý sloupec po vakuování. U vzorků s obsahem latexu 0,20; 0,40 a 0,60 % byl rozliv změřen dvakrát, neboť tato směs byla míchána dvakrát. Z těchto hodnot byla tedy vypočítaná průměrná hodnota. Při porovnání hodnot rozlivu před a po vakuování si lze všimnout, že došlo ke snížení hodnot rozlivu u všech vzorků. Toto snížení je způsobeno snížením obsahu vzduchu ve vzorku.

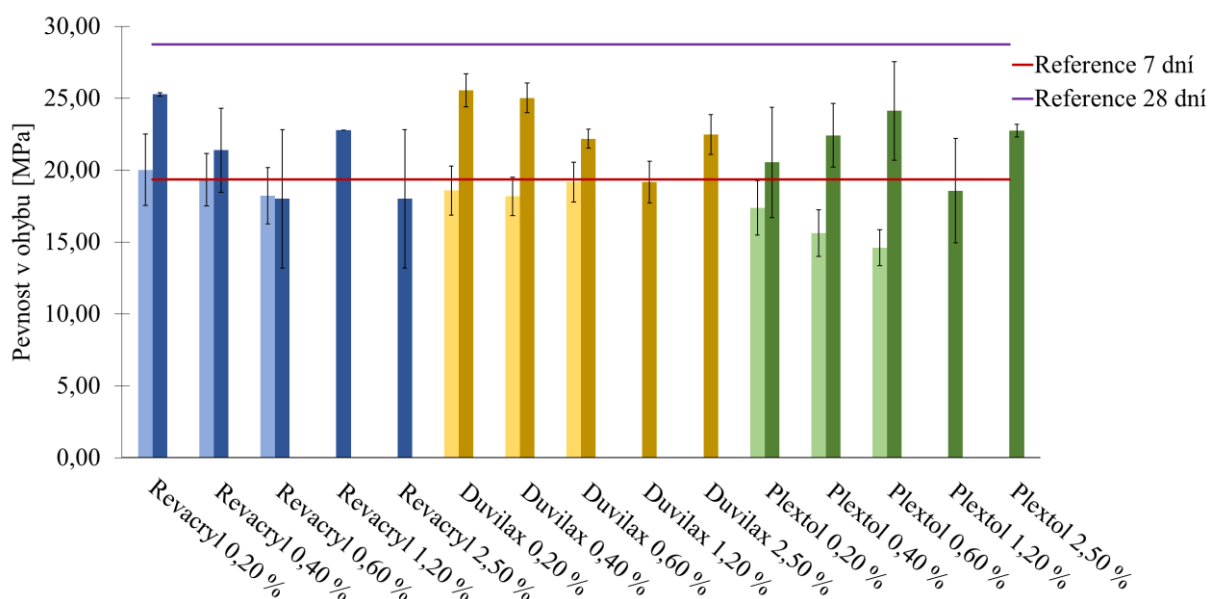
Hodnoty rozlivu vzorku s latexem před vakuováním jsou vyšší oproti referenčnímu vzorku. Nejvyššího rozlivu dosahovaly vzorky s Plextolem, jejichž hodnoty přesahovaly 200 mm. Vzorky s Revacrylem a Duvilaxem měly rozliv pod 200 mm, ale i tyto hodnoty byly vyšší než hodnoty referenčního vzorku. Jak již bylo zmíněno, vakuováním došlo ke snížení rozlivu u všech vzorků. Při porovnání hodnot nejnižšího rozlivu dosahovala reference a vzorky s obsahem 0,40 % a 1,20 % Duvilaxu. U ostatních vzorků byl rozliv naměřen vyšší. Nejvyšších hodnot po vakuování stejně jako před vakuováním dosahovaly vzorky s Plextolem. Latex obsažený ve vzorcích zvyšuje tekutost výsledné betonové směsi. Z naměřených hodnot vzorků lze usoudit, že nejvíce směs ztekuoval latex Plextol.

Tab. 11: Hodnoty rozlití kužele před vakuováním a po vakuování

množství	Revacryl d [mm]		Duvilax d [mm]		Plextol d [mm]		Reference d [mm]	
	před vak.	po vak.	před vak.	po vak.	před vak.	po vak.	před vak.	po vak.
0,20 %	190	150	200	170	210	160	170	140
	210	180	200	160	210	160		
Průměr	200	165	200	165	210	160		
0,40 %	190	170	180	130	180	150		
	210	170	180	150	220	180		
Průměr	200	170	180	140	200	165		
0,60 %	170	150	180	130	200	170		
	180	160	210	170	210	190		
Průměr	175	155	195	150	205	180		
1,20 %	190	180	180	140	220	190		
2,50 %	170	160	180	160	200	160		

4.2 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla změřena u vzorků po sedmi a 28 dnech. Pro měření po sedmi dnech byly použity vzorky s příměsí latexu 0,20; 0,40 a 0,60 % a referenční vzorek, který neobsahoval latex. Do vzorků po 28 dnech bylo přidáno množství latexu 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 %. Z naměřených hodnot byly zjištěny jejich průměry a směrodatné odchylky. Tyto vypočítané hodnoty byly zaznamenány do grafu, viz obr. 28. Referenční vzorky jsou vyznačeny křivkou pro lepší porovnání. Červenou křivkou je vyznačena pevnost v tahu za ohybu referenčního vzorku po sedmi dnech a fialovou po 28 dnech. Pevnosti v tahu za ohybu jsou rozděleny podle barev do tří skupin podle typu latexu. Světlejší barva značí pevnosti vzorků po sedmi dnech a tmavší po 28 dnech.



Obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu: Světlejší barva – pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech; tmavší barva – pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech

Nejdříve došlo k porovnání hodnot pevností v tahu za ohybu po sedmi dnech. Pevnost v tahu za ohybu pro referenční vzorek po sedmi dnech činila 19,35 MPa. Referenční vzorek je znázorněn červenou vodorovnou čarou.

Při porovnání pevností po sedmi dnech pro jednotlivé vzorky podle typu použitého latexu, lze pozorovat rozdílné chování pevností. U vzorků s Revacrylem vzhledem k velikým směrodatným odchylkám, lze předpokládat, že trend pevnosti v tahu za ohybu u těchto vzorků je s jistou mírou pravděpodobnosti klesající s rostoucí dávkou polymeru. Při množství Revacrylu 0,20 %, dosahovaly vzorky vyšších pevností. U vzorku s 0,40 % této látky průměrná pevnost odpovídala hodnotám u referenčního vzorku. Pokles průměrné pevnosti pod referenční byl naměřen u vzorku s přídavkem 0,60 %.

Vzorky s latexem Duvilax po sedmi dnech dosahovali nižších pevností, než byla hodnota referenčního vzorku. Nejvyšší pevnost byla naměřena u vzorku s přídavkem Duvilaxu 0,60 %. Tato hodnota odpovídala referenční. Při zahrnutí směrodatných odchylek lze pozorovat, že trend se výrazně neměnil a hodnoty se nelišily.

Poslední vzorky po sedmi dnech s latexem Plextol se svým průběhem podobaly vzorkům Revacrylu. Lišily se pouze v hodnotách pevností, které byly nejnižší ze všech naměřených vzorků. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek s obsahem Plextolu 0,20 % a to 17 MPa. Hodnoty dalších dvou byly nižší.

Hodnota referenčního vzorku po 28 dnech je vyšší než u ostatních vzorků, do kterých byl přidán latex i po zahrnutí směrodatných odchylek.

U vzorků po 28 dnech s Revacrylem nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek s obsahem 0,20 % latexu. Vzhledem k vysokým směrodatným odchylkám se zvyšujícím se množstvím polymeru lze říct, že trend pevností v tahu za ohybu je pravděpodobně klesající.

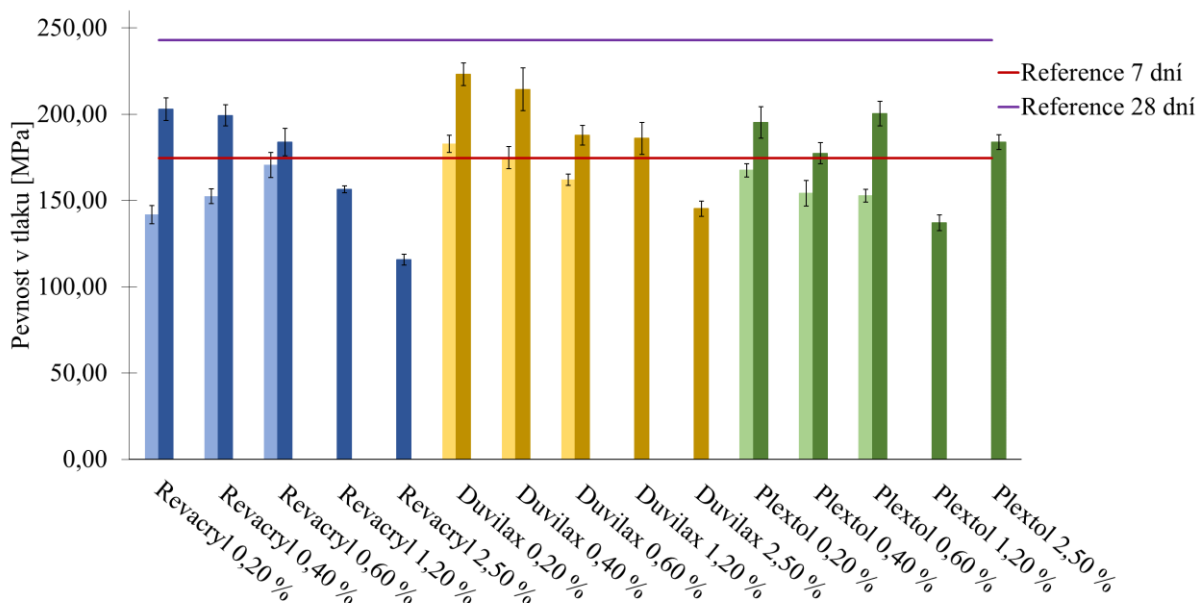
Trend pevnosti v tahu za ohybu pro vzorky po 28 dnech obsahující Duvilax byl klesající od 0,20 % po 1,20 %. Pro vzorek s obsahem 2,50 % latexu došlo ke zvýšení pevnosti. Do betonové směsi byl přidávaný latex, aby se zlepšily jeho vlastnosti. Nárůst pevnosti při obsahu 2,50 % mohl být způsobený již dostatečným množstvím latexu pro vytvoření filmu ve výsledném betonu, jak je popsáno v kapitole 2.2.3.

Vzorky po 28 dnech obsahující Plextol mají opačný trend než předešlé dva pro obsah latexu 0,20; 0,40 a 0,60 %. Při použití Plextolu se pevnost zvyšovala a nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek s množstvím latexu 0,60 %. Dalším přidáním latexu se pevnost snížila. Stejně jako u vzorku s obsahem 2,50 % Duvilaxu i zde při stejném množství latexu Plextol došlo k nárůstu pevnosti. Tento vzrůst mohl být způsobený dostatečným množstvím latexu, které mohlo způsobit vznik filmu, jak již bylo popsáno výše.

Porovnat v čase změnu ohybu lze pouze s obsahem latexu 0,20; 0,40 a 0,60 %, neboť s vyšším obsahem latexu nebyly vzorky po sedmi dnech měřeny. U vzorků s Revacrylem vzhledem k vysokým směrodatným odchylkám nelze pozorovat výraznou změnu pevnosti v čase. Naopak u vzorků s Duvilaxem pevnost rostla se zvyšujícím se obsahem latexu po sedmi dnech, ale klesala u vzorků po 28 dnech. Při porovnání pevnosti v tahu za ohybu v čase lze pozorovat růst pevnosti v čase pro všechny vzorky. Největší změny pevnosti v tahu za ohybu dosáhl vzorek s obsahem Plextolu 0,60 %. To mohlo být způsobeno změnou trendu, neboť pevnost u vzorků po sedmi dnech klesaly se zvyšujícím se množstvím latexu. Naopak u vzorků po 28 dnech byl trend rostoucí. Toto mohlo být způsobeno zpožděnou hydratací cementu, neboť vyšší obsah latexu zpomaluje hydrataci a tím snižuje počáteční pevnost, jak je popsáno v kapitole 2.2.4.1.

4.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla provedená pro stejné vzorky jako vzorky pro pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku byla měřená pro vzorky po sedmi a 28 dnech. Naměřené hodnoty byly zaneseny do grafu (viz obr. 29), v němž jsou uvedené průměrné hodnoty pro daný vzorek a jeho směrodatné odchylky. Hodnoty referenčních vzorků jsou značeny křivkou pro lepší porovnání vzorků s referenčním vzorkem. Hodnota referenčního vzorku po sedmi dnech je zde uvedena červenou křivkou a po 28 dnech fialovou. Naměřené pevnosti jsou rozděleny barevně do tří skupin podle použitého latexu. Každá skupina je vyznačena danou světlou a tmavou barvou, které od sebe rozdělují vzorky podle délky tuhnutí. Světlá barva značí vzorky po sedmi dnech a tmavá po 28 dnech.



Obr. 29: Pevnost v tlaku: Světlejší barva – pevnost v tlaku po 7 dnech; tmavší barva – pevnost v tlaku po 28 dnech

Nejdříve došlo k porovnání pevností v tlaku po sedmi dnech. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek s přidáním 0,20 % Duvilaxu.

Hodnoty pevnosti v tlaku po sedmi dnech pro Revacryl rostly s rostoucím množstvím tohoto latexu ve vzorku. Nejvyšší pevnosti v tlaku po sedmi dnech dosáhl vzorek s obsahem Revacrylu 0,60 %.

Pevnost v tlaku pro vzorky s latexem Duvilax po sedmi dnech měly klesající trend. Jak již bylo výše zmíněno nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek s obsahem latexu 0,20 %. Pevnost v tlaku poklesla pod hodnotu referenčního hodnotu až u vzorku s obsahem 0,60% polymeru.

Pevnost v tlaku pro vzorky po sedmi dnech s Plextolem byla nejvyšší u vzorku s obsahem 0,20 % latexu. Vzorky s vyšším obsahem latexu měly pevnost v tlaku při zohlednění směrodatných odchylek s jistou mírou pravděpodobnosti klesající trend.

Pevnosti v tlaku po 28 dnech u všech vzorků byly nižší než hodnota pevnosti v tlaku referenčního vzorku. Nejvyšší pevnosti dosáhl stejně jako u vzorků po sedmi dnech vzorek s obsahem 0,20 % latexu Duvilax.

Při porovnání pevností v tlaku pro vzorky s Revacrylem po 28 dnech je možné pozorovat, že pevnost v tlaku při zohlednění směrodatných odchylek by pravděpodobně měla klesající trend. K nejvyššímu poklesu došlo u vzorku s nejvyšším obsahem Revacrylu, tj, 2,50 %. Tato hodnota prudce klesla.

U vzorků po 28 dnech s latexem Duvilax měl nejvyšším pevnost vzorek s nejnižším obsahem latexu. Trend prvních tří vzorků měl klesající průběh. Hodnota pevnosti v tlaku pro vzorek s nejvyšším obsahem Duvilaxu stejně jako u Revacrylu prudce klesla.

U vzorků s Plextolem nelze pozorovat žádnou závislost pevnosti v tlaku při zvyšujícím se obsahu polymeru. K výraznému poklesu pevnosti v tlaku došlo u vzorku s obsahem 1,20 % Plextolu. Naopak při nejvyšším obsahu latexu se pevnost v tlaku opětovně zvýšila. Hodnota pevnosti v tahu za ohybu s obsahem 2,50 % Plextolu vzrostla stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu. I v tomto případě může být nárůst způsobený vznikem filmu, který by právě

zlepšoval mechanické vlastnosti betonu. Pro zjištění vzniklého filmu byly pořízeny snímky na mikroskopu.

Při porovnání pevnosti v tlaku po sedmi a 28 dnech lze pozorovat jiný průběh v závislosti na použitém latexu. Pevnosti v tlaku bylo možné porovnat obsahující množství latexu 0,20 %, 0,40 % a 0,60 %. Všechny pevnosti po 28 dnech dosahovaly vyšších hodnot než po sedmi dnech. U vzorku s Revacrylem pevnost se zvyšujícím se množstvím latexu rostla po sedmi dnech, a naopak klesala po 28 dnech. Při porovnání vzorku s Duvilaxem pevnosti v obou případech klesaly.

4.4 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla zjištěna z hmotnosti vzorků a jejich objemu. Rozměry vzorku byly $40 \times 40 \times 160$ mm. Z nich se stanovil objem na hodnotu $0,000256 \text{ m}^3$. Hmotnosti vzorků byly měřeny po jednom a 28 dnech u vzorků s obsahem latexu 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 %. Po sedmi dnech byla zjišťována hmotnost pouze u vzorků s množstvím latexu 0,20; 0,40 a 0,60 %. Stanovené objemové hmotnosti a jejich směrodatné odchylky byly zaneseny do grafu, viz obr. 30. Jednotlivé vzorky podle druhu použitého latexu jsou zaneseny do grafu podle barev. Každá barva je znázorněna třemi odstíny od nejsvětějšího po nejtmavší. Nejsvětější barva znázorňuje objemovou hmotnost po jednom dnu, tmavší po sedmi dnech a nejtmavší po 28 dnech. Referenční vzorky jsou znázorněny oranžovou barvou, a to jak ve sloupcovém diagramu, tak i křivkou. Tato křivka znázorňuje objemovou hmotnost vzorku po 28 dnech.

Při přípravě vzorků došlo k jejich vakuování, neboť přidaný latex způsoboval provzdušnění směsi, a tedy pokles objemové hmotnosti. Vysoký pokles objemové hmotnosti by mohl způsobit zhoršení mechanických vlastností vzorků a zejména balistické odolnosti.

Jednotlivé vzorky měnily svoji objemovou hmotnost jak v čase, tak i s obsahem použitého latexu. K největším rozdílům v čase došlo u vzorků s obsahem latexu 1,20 a 2,50 %.

Objemová hmotnost referenčního vzorku při zahrnutí směrodatných odchylek po jednom a 28 dnech je s jistou mírou pravděpodobnosti nižší než u vzorku po sedmi dnech.

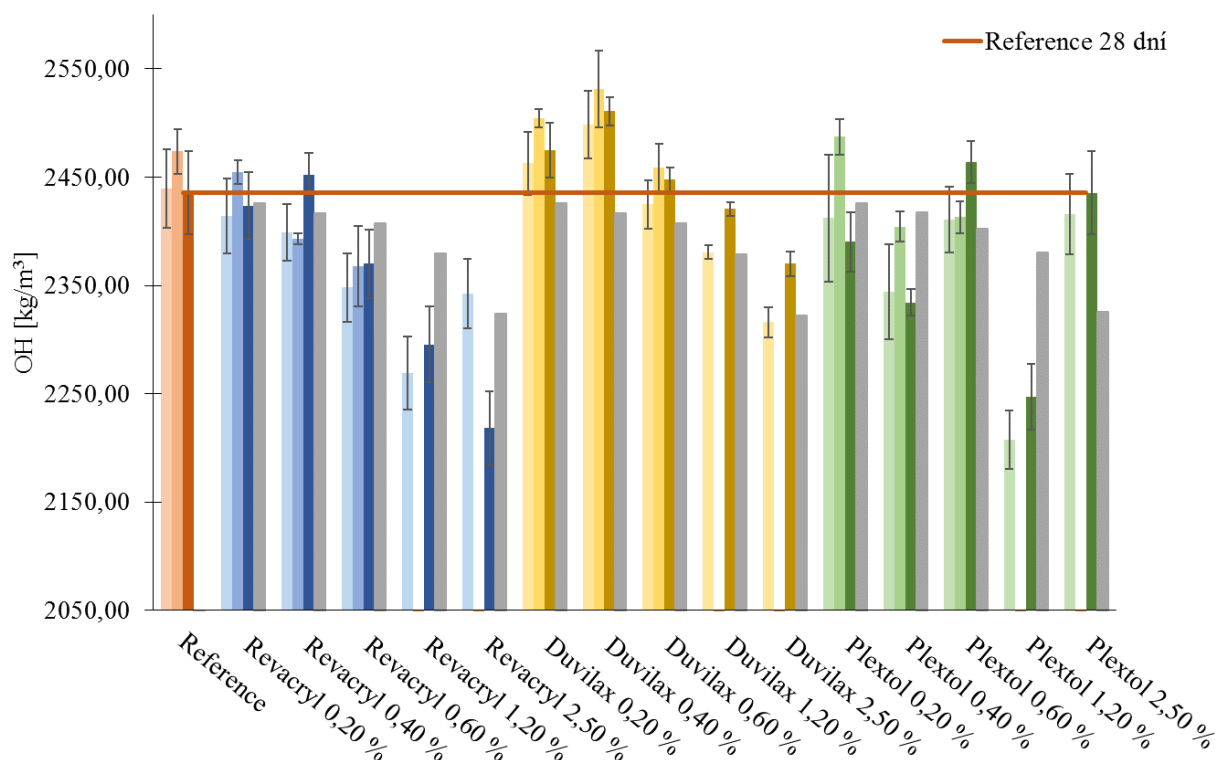
Porovnáním objemové hmotnosti u vzorků s Revacrylem s referenční hodnotou lze pozorovat, že hodnoty objemové hmotnosti u vzorků s nejnižším obsahem polymeru dosahovaly hodnot referenčního vzorku. Z toho lze usoudit, že přídavek malého množství latexu nemá na tuto hodnotu vliv. Se zvyšujícím se přídavkem Revacrylu došlo k poklesu této hodnoty. Při porovnání změny objemové hmotnosti u vzorků po jednom dni lze pozorovat klesající trend se zvyšujícím se množstvím tohoto latexu, pouze u vzorku s obsahem 2,50 % došlo k prudkému vzrůstu objemové hmotnosti. U vzorků po 28 dnech došlo nejdříve ke vzrůstu objemové hmotnosti pro vzorek s obsahem 0,40 % Revacrylu a následně hodnoty klesaly se vzrůstajícím množstvím polymeru ve vzorku. Pokles je způsobený přítomným latexem, který do vzorku zanáší porozitu, viz kapitola 2.2.4.1. Při porovnání vzorků v čase lze pozorovat vyšší objemovou hmotnost po 28 dnech. Pouze objemová hmotnost vzorku po jednom dni s nejvyšším množstvím latexu byla výrazně vyšší.

Při porovnání hodnot vzorků s Duvilaxem lze pozorovat, že objemová hmotnost dosahuje hodnot referenčního vzorku u vzorků s obsahem latexu 0,20; 0,40 a 0,60 %. K poklesu došlo u vzorků s obsahem latexu 1,20 a 2,50 %. Trend objemové hmotnosti vzrůstá a následně dochází k poklesu objemové hmotnosti u všech vzorků v závislosti na čase. Nejvyšších hodnot dosáhl vzorek s obsahem latexu 0,40 %. Při porovnání hodnot v čase nejvyšších hodnot

dosahovaly po sedmi dnech u těch vzorků, kde byla objemová hmotnost v tomto čase změřena. Nejnižších hodnot v čase dosahovaly všechny vzorky měřeny po jednom dni.

U vzorků s Plextolem nelze pozorovat žádnou závislost v čase ani se zvyšujícím se obsahem latexu. U vzorku s obsahem 1,20 % latexu objemová hmotnost výrazně poklesla ve srovnání s ostatními hodnotami vzorků s latexem.

Při porovnání objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku lze pozorovat, že trendy jednotlivých druhů vzorků podle přidaného latexu jsou si s jistou mírou pravděpodobnosti podobné. Toto může být ovlivněno právě přidaným latexem, který může ovlivňovat mechanické vlastnosti, viz kapitola 2.2.4.1.



Obr. 30: Srovnání objemové hmotnosti reálných vzorků po jednom, sedmi a 28 dnech s teoretickou hodnotou: šedý sloupec – teoretická objemová hmotnost; nejsvětější barva sloupce – skutečná objemová hmotnost po 1 dnu; světlejší barva sloupce – skutečná objemová hmotnost po 7 dnech; nejtmaší barva sloupce – skutečná objemová hmotnost po 28 dnech

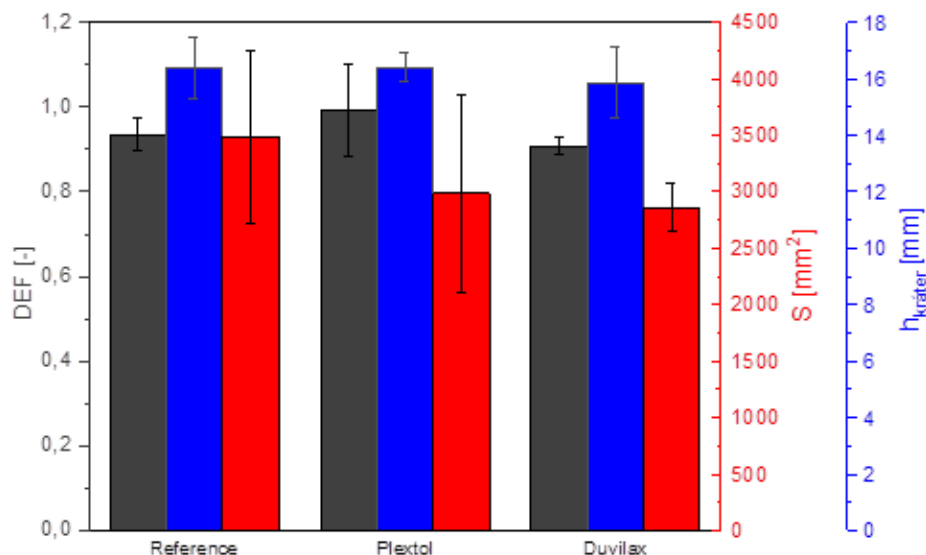
Pro porovnání zanesení porozity do vzorku při použití latexu byla vypočítaná teoretická objemová hmotnost jednotlivých vzorků. Teoretické hodnoty byly zaneseny do grafu a porovnány s objemovými hmotnostmi (viz obr. 30). Skutečné objemové hmotnosti jednotlivých vzorků jsou vyznačeny barevně podle použitého latexu a k nim jsou přiřazeny teoreticky vypočítané hodnoty, které jsou zakresleny šedou barvou.

Teoreticky vypočítané hodnoty mají klesající trend se zvyšujícím se obsahem polymeru u všech vzorků. Z grafu je patrné, že teoretické hodnoty pro vzorky s vyšším obsahem Revacrylu jsou vyšší než skutečně naměřené hodnoty po 28 dnech. Se zvyšujícím se obsahem latexu tedy byla do vzorku zanášena vyšší porozita, a proto objemová hmotnost klesala. Vzorky s Duvilaxem mají skutečnou objemovou hmotnost po 28 dnech větší než teoretickou, jelikož jeho hlavní složkou je polyvinylacetát, který je rozpustný ve vodě. Vzhledem k naměřeným

objemovým hmotnostem vzorků s Plextolem nelze pozorovat žádnou závislost s teoreticky vypočítanými hodnotami.

4.5 Balistická zkouška

Balistická zkouška byla provedena pro referenční vzorek a dva vzorky s latexem. První vzorek obsahoval 0,60 % Plextolu a druhý 0,40 % Duvilaxu. Od každého z vzorků bylo připravených pět balistických kroužků.



Obr. 31: Zobrazení hodnot DEF, hloubky a plochy kráteru pro vzorky Duvilax 0,40 %, Plextol 1,20 %

Diferenciální faktor balistické účinnosti byl stanovený pomocí DOP testu. Z naměřených hodnot pro každý kroužek byla vypočtena hodnota DEF. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota a její směrodatná odchylka. Dále byla změřena hloubka a plocha kráteru pro každý kroužek. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. V příloze 7.1 jsou snímky zobrazující plochy kráterů. Pro porovnání naměřených a vypočítaných hodnot byl vytvořený graf (viz obr. 31). V tomto grafu jsou vyznačeny hodnoty DEF, hloubka a plocha kráteru pro jednotlivé vzorky.

Hodnota diferenciálního faktoru reference činila 0,935. U vzorku s obsahem 0,60 % Plextolu byla průměrná hodnota DEF vyšší, ale při zohlednění směrodatné odchylky nelze s jistotou konstatovat zvýšení hodnoty DEF. U vzorku s Duvilaxem 0,40 % byla hodnota nepatrně nižší než u referenčního vzorku. Z těchto hodnot DEF lze usoudit, že obsažený latex ve vzorku neměl na diferenciální faktor balistické účinnosti prokazatelný vliv.

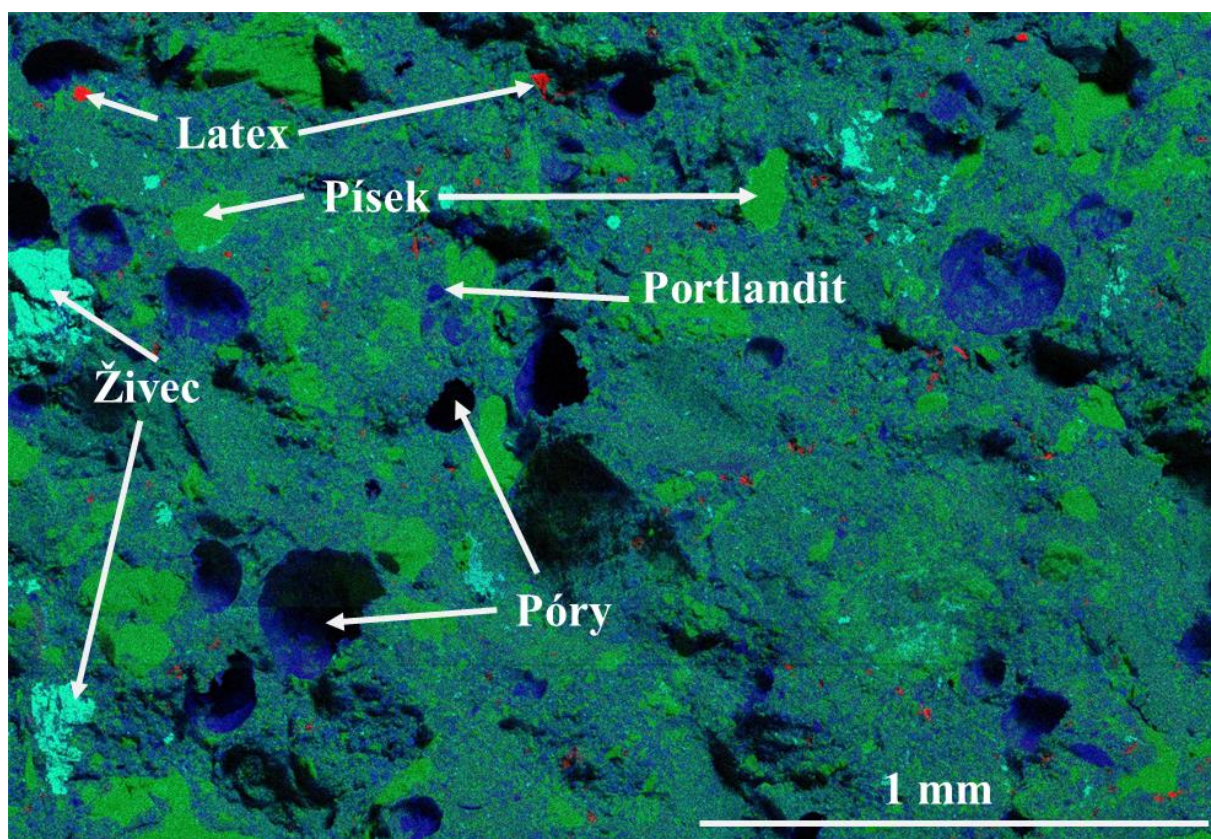
Hloubka kráteru referenčního vzorku činila 16,38 mm. Pro vzorek s obsahem 0,60 % Plextolu při zohlednění směrodatné odchylky nelze s jistotou určit změnu v hloubce kráteru při porovnání s referenční hodnotou. To stejné platí pro vzorek s Duvilaxem o obsahu 0,40 %.

Velikost poškozené zóny způsobené při dopadu materiálu byla pro referenční vzorek 3487 mm². U obou vzorků, do kterých byl přidán latex, došlo k poklesu průměrné hodnoty plochy poškozené zóny. Při zahrnutí směrodatných odchylek by s jistotou mírnou pravděpodobností mohlo dojít k poklesu hloubky kráteru, ale snížení této hodnoty není výrazné.

4.6 Rastrovací elektronová mikroskopie

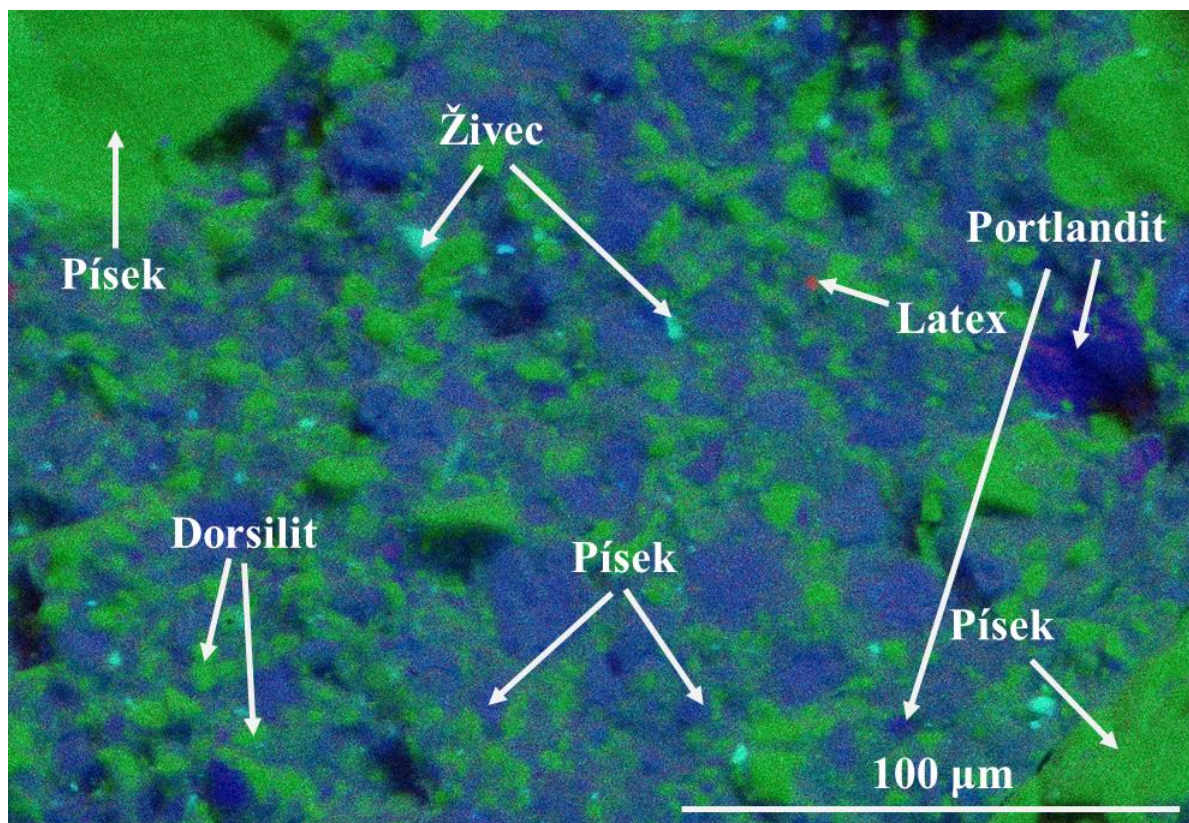
Pro pozorování pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu byly vybrány tři druhy vzorku s obsahem 0,40 % Duvilaxu, 0,60 % a 2,50 % Plextolu. Pozorování bylo provedeno na lomových plochách jednotlivých vzorků. Pro výše zmíněné vzorky byly pořízeny snímky při zvětšení 50 x a 500 x. Ke každému snímku byly pořízeny mapy uhlíku. Zvětšené snímky jsou uvedeny v příloze 7.2.

Na obr. 32 a na obr. 33 jsou popsány jednotlivé částice betonu. Při zvětšení 50 x lze pozorovat zrna písku, které tvoří křemen – zelené plochy a živec – tyrkysové plochy. Živec je v písku nežádoucí a zhoršuje vlastnosti betonu. Modré barva značí cement a sytě modré plochy představují portlandit. Portlandit by se v RPC neměl vyskytovat, kvůli nízkému vodnímu součiniteli. Černá zaoblená místa znázorňují póry. Důležitým prvkem je latex, který je zobrazený červenou barvou. Červená barva představuje přítomný uhlík, který se právě v latexu nachází.



Obr. 32: Popis částic na snímku při zvětšení 50 x

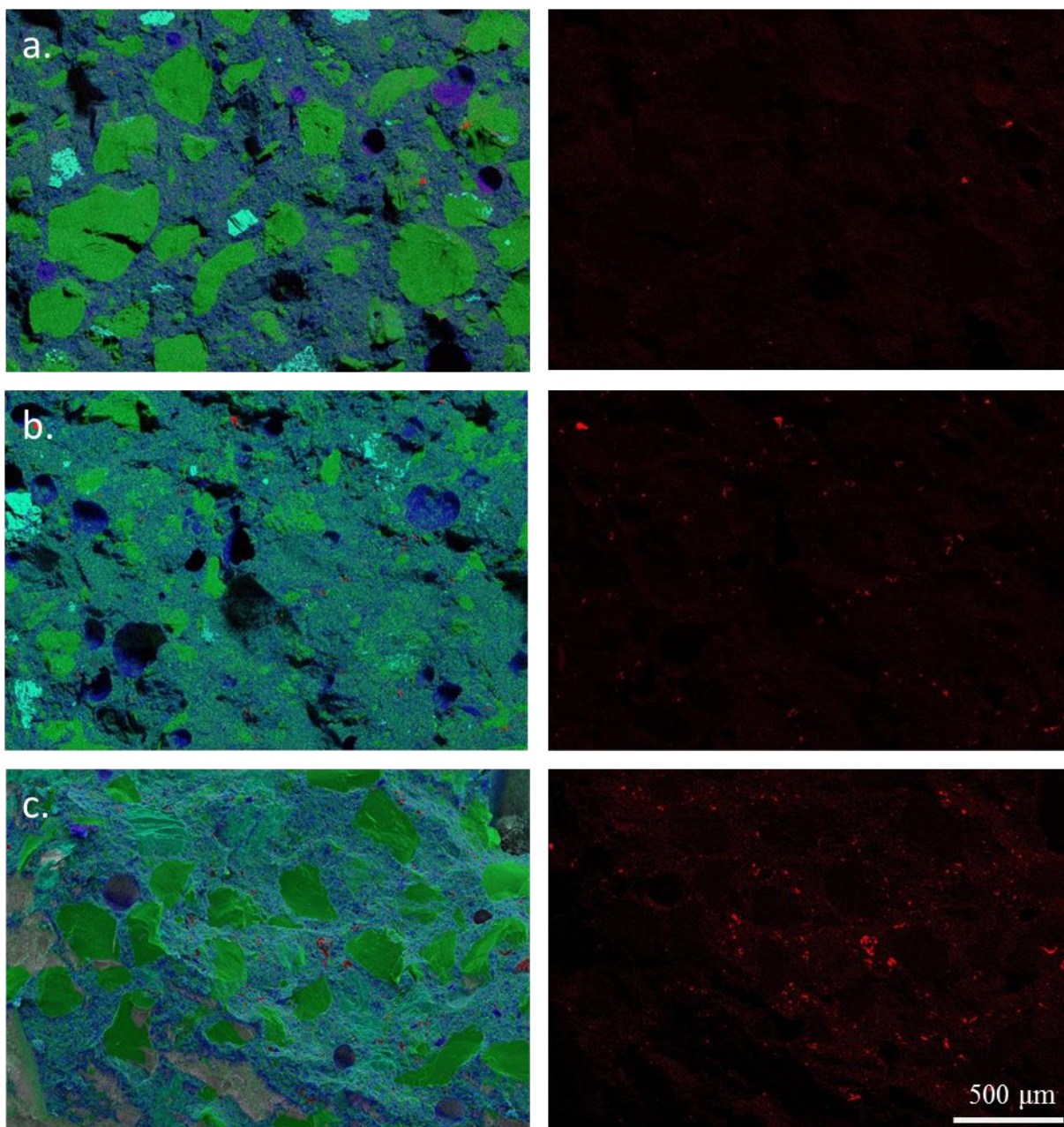
Na obr. 33 lze pozorovat částice při zvětšení 500 x. Latex, živec i cement jsou znázorněny stejně jako na obrázku výše. Velké zelené částice na tomto obrázku popisují dorsilit. Při větším zvětšení by bylo možné pozorovat mikrodorsilit.



Obr. 33: Popis částic na snímku při zvětšení 500 x

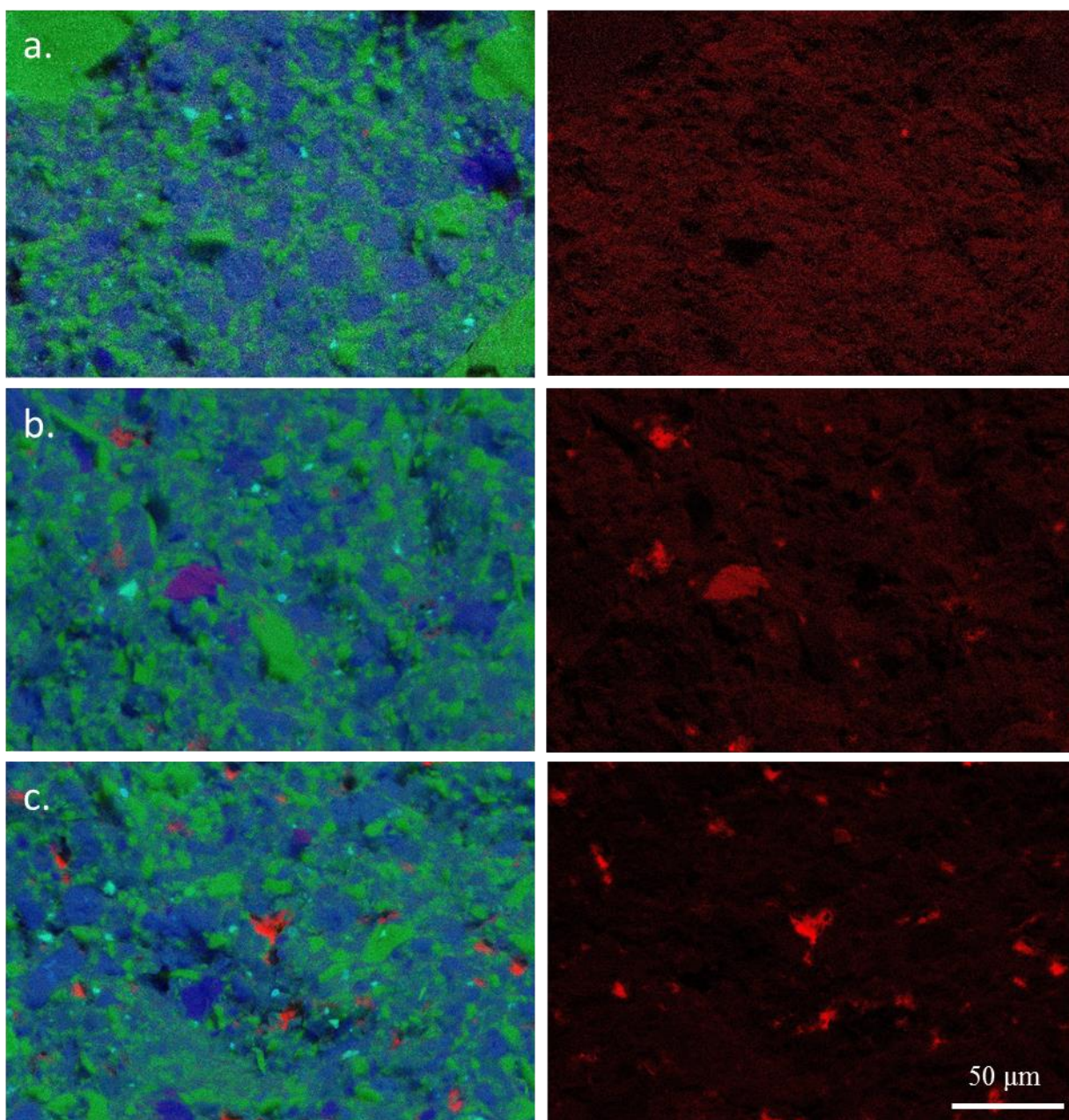
Na obr. 34 jsou zobrazeny snímky při zvětšení 50 x. Na levé straně jsou snímky při daném zvětšení a napravo od nich mapy uhlíku jim odpovídající. Na snímku a. je zobrazen povrch betonu, do kterého bylo přidáno 0,40 % Duvilaxu. Lze pozorovat malý počet pórů, což odpovídá objemové hmotnosti Duvilaxu při tomto množství latexu. Na obr. 30 lze vidět, že při obsahu 0,40 % Duvilaxu je objemová hmotnost nejvyšší, a proto nemohl zahrnovat větší počet pórů, který by tuto hodnotu snižoval. Na mapě uhlíku pro tento vzorek se objevují červená zrna latexu. Množství zrn je malé, což může být způsobené nízkým obsahem latexu v tomto vzorku, anebo rozpustností polyvinylacetátu, který je hlavní složkou Duvilaxu.

Na snímku b. a c. je zobrazen povrch betonu s přísadkou Plextolu. Obsah pórů je snímku b. vyšší, a naopak u snímku c, tedy u vzorku s vyšším obsahem latexu, je výskyt pórů nízký. Při porovnání map uhlíků těchto dvou snímků, lze pozorovat zvýšený obsah aglomerátů uhlíku. Snímek c. obsahoval množství 2,50 % latexu oproti vzorku na snímku b., jehož obsah byl 0,60 %. Při vyšším množství latexu bylo více částic, které se mohly shlukovat.



Obr. 34: Přehledové snímky vzorků při zvětšení 50 x: a. Duvilax 0,40 %, b. Plextol 0,60 %, c. Plextol 2,50 %

Na obr. 35 jsou zobrazeny snímky při zvětšení 500 x. Při tomto zvětšení lze pozorovat na snímcích latex, dorsilit a cement. Jak již bylo výše zmíněno, obsah latexu ve vzorku Duvilaxu s obsahem 0,40 % latexu je nízký. Snímek a. toto potvrzuje, neboť na obou snímcích zobrazující strukturu tohoto vzorku se nachází pouze jeden výraznější aglomerát latexu. Jelikož nebylo dostatečné množství latexu, nemohl vzniknout film, který by mohl zlepšovat mechanické vlastnosti tohoto betonu.



Obr. 35: Přehledové snímky vzorků při zvětšení 500 x: a. Duvilax 0,40 %, b. Plextol 0,60 %, c. Plextol 2,50 %

Snímek b. zobrazuje vzorek s přidavkem Plextolu 0,60 %. Lze pozorovat vznik aglomerátů latexu. Fialově zbarvený aglomerát představuje vápenec. Na snímku c. lze pozorovat zvýšený obsah shluků latexu, ale ani při tomto obsahu latexu nedošlo ke vzniku filmů. Při porovnání pevností v tlaku a tahu za ohybu, byly pozorovány zvyšující se hodnoty pevností u vzorku s obsahem 2,50 % Plextolu. Z tohoto důvodu byl vzorek pozorován na mikroskopu, jelikož mohlo dojít ke zlepšení vznikem filmů. Na snímku c. se žádný film neobjevil. Pro vznik filmů by tedy bylo potřeba větší koncentrace latexu.

5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala změnou vlastností betonů na bázi reaktivních prášků při přidání polymerních latexů. Pro práci byly vybrány tři druhy latexů: Revacryl, Duvilax a Plextol. Revacryl AE 2091 je vodná disperze styren-akrylátového kopolymery s vysokým obsahem pevných látek. U Duvilaxu BD-20 se jedná o homopolymerní polyvinylacetátovou disperzi, která neobsahuje plnidla se změkčovadly. Plextol X 4002 je vodná, samosíťující akrylátová emulze s vysokým obsahem pevných látek. Byly připraveny vzorky o obsahu 0,20; 0,40; 0,60; 1,20 a 2,50 % těchto polymerů. Pro stanovení základních vlastností polymer modifikovaných betonů na bázi reaktivních prášků byla změřena zpracovatelnost čerstvých směsí, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku, balistická odolnost a objemová hmotnost. K vyhodnocení mikrostruktury byl použitý rastrovací elektronový mikroskop. Z naměřených výsledků byl zjištěn vliv použitých latexů na výsledné vlastnosti materiálu.

Přidání latexů mělo vliv na rozliv u všech vzorků, neboť polymer zvyšuje množství vzduchu ve směsi. Kvůli snížení obsahu vzduchu došlo k vakuování. Vakuováním se snížil rozliv u všech vzorků, ale při porovnání s hodnotou referenční směsi hodnota byla vyšší. Nejvyšších hodnot rozlivu dosahovaly směsi s Plextolem. Z naměřených hodnot lze usoudit, že přidáním latexu do betonové směsi dochází ke zlepšení zpracovatelnosti.

Přidání latexu mělo vliv i na tuhnutí. U vzorků s obsahem 1,20 a 2,50 % latexu nemohlo dojít k odformování po jednom dnu jako u vzorků s nižším obsahem polymeru, neboť vzorky nebyly dostatečně zatuhlé. Zvýšený obsah polymeru v betonu snižuje rychlost hydratace, jak je popsáno v kapitole 2.2.4.1.

Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku byla stanovena po sedmi a 28 dnech. Naměřené pevnosti v tahu za ohybu po sedmi dnech u vzorků s Revacrylem a Duvilaxem se výrazně nelišily od referenční pevnosti. Výrazný pokles pevnosti po sedmi dnech byl zaznamenán u vzorků s Plextolem. Tento pokles mohl být způsoben zpomalením hydratace cementu. Po 28 dnech žádný z vzorků nedosahoval pevností v tahu za ohybu referenčního vzorku. Vzhledem k velkým směrodatným odchýlkám nelze s jistotou určit trend pevnosti ovlivněný přídatkem latexu. U vzorků s Duvilaxem a Plextolem po sedmi dnech lze pozorovat klesající trend pevnosti v tlaku s přídatkem latexu, který mohlo způsobit zpomalení hydratace cementu. Naopak u vzorků s Revacrylem po sedmi dnech byl zaznamenán rostoucí trend pevnosti v tlaku s přídatkem polymeru, z čehož je možné usoudit, že zvyšující se dávka polymeru měla na hydrataci cementu zřejmě pozitivní vliv. Po 28 dnech se pevnost v tlaku snižovala s rostoucí dávkou latexu Revacryl a Duvilax. Přídatkem polymeru nedocházelo tedy ke zlepšení pevnosti v tlaku ani v tahu za ohybu.

Objemová hmotnost byla zjišťována z důvodu vyhodnocení vlivu přídatku latexu na porozitu. Vzorky s Duvilaxem dosahovaly vysokých objemových hmotností. Směs s Duvilaxem mohla být lépe odvdušněna, díky rozpustnosti polyvinylacetátu hlavní složky Duvilaxu. Toto je možné potvrdit při porovnání s teoretickými hodnotami, neboť ty jsou nižší než naměřené. U vzorků s Revacrylem a Duvilaxem se objemová hmotnost snižovala se zvyšujícím se množstvím latexu. Při porovnání naměřených trendů u pevnosti v tlaku a objemových hmotností lze pozorovat podobný průběh. Zvyšující se množství latexu může ovlivňovat mechanické vlastnosti vlivem zvyšující se porozity.

Balistická zkouška byla stanovena pomocí DoP testu. Hodnota DEF u vzorku s Plextolem byla vyšší, ale vzhledem k vysoké směrodatné odchýlce nelze tento nárůst jednoznačně

potvrdit. Přidaný polymer neměl ani u jednoho vzorku při srovnání s referenčním vliv na hloubku kráteru. Při porovnání plochy kráteru referenčního vzorku se vzorky s latexem lze pozorovat při zahrnutí směrodatných odchylek s jistou mírou pravděpodobnosti pokles této hodnoty. Snížení plochy kráteru ale není výrazné. Porovnáním jednotlivých hodnot s referenčními nebyl prokázán vliv přídavku latexu na balistickou odolnost.

Pozorováním mikrostruktury vzorku s Duvilaxem byla zjištěna nízká porozita, což potvrzuje vysoké hodnoty objemové hmotnosti. Na snímcích lze pozorovat přítomnost malých agregátů latexů, které se díky dobrému rozdispergování neslučovaly do větších agregátů. U žádného z pozorovaných snímků nebyla zaznamenána přítomnost polymerního filmu (viz kapitola 2.2.3). K vytvoření polymerního filmu by byla potřeba větší koncentrace latexu ve vzorku. Vzhledem k mechanickým vlastnostem a balistické odolnosti materiálu by vyšší přídavek latexu tyto hodnoty nezlepšoval. Z tohoto důvodu polymer v betonech na bázi reaktivních prášků nemá zásadní pozitivní vliv.

6 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] AÏTCIN, Pierre-Claude, 1998. High-Performance Concrete [online]. Londýn: E & FN Spon [cit. 2023-04-25]. ISBN 9780429204074. Dostupné z: <https://doi.org/10.4324/9780203475034>
- [2] The durability characteristics of high performance concrete: a review, 2003. In: PIERRE-CLAUDE, Aïtcin. Cement and Concrete Composites [online]. s. 409-420 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00081-1)
- [3] High performance concrete—An overview, 1998. In: PIERRE-CLAUDE, Aïtcin a Adam NEVILLE. Materials and Structures [online]. s. 111-117 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [doi:10.1007/bf02486473](https://doi.org/10.1007/bf02486473)
- [4] BAJABER, Mohamad Abdullah a Ibrahim Yahya HAKEEM, 1998. UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. In: Journal of Materials Research and Technology [online]. s. 1058-1074 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>
- [5] BESHAR, Hamoud, Abdullah A. ALMUSALLAM a Mohammed MASLEHUDDIN, 2003. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. In: Construction and Building Materials [online]. s. 97-103 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00097-1)
- [6] SÁČEK, Josef, 2008. Vysokohodnotné betony na bázi druhotných surovin [online]. Brno [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4589. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [7] BIBORA, P., M. DRDLOVÁ, V. PRACHAŘ a O. SVITÁK, 2017. UHPC for Blast and Ballistic Protection, Explosion Testing and Composition Optimization. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [10.1088/1757-899X/251/1/012004](https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012004)
- [8] SANJUÁN, Miguel Ángel a Carmen ANDRADE. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. Sustainability and Performance of Advanced Construction Materials [online]. 30.5.2021, 12 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/app11125629](https://doi.org/10.3390/app11125629)
- [9] Reactive Powder Concrete. Constructionor [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: https://constructionor.com/reactive-powder-concrete/?utm_content=cmp-true
- [10] RICHARD, Pierre a Marcel CHEYREZY, 1995. Composition of reactive powder concretes. In: Cement and Concrete Research [online]. s. 1501-1511 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)

- [11] CHEYREZY, Marcel, El-Sayed A.R. NASR, Yehia A. ALI a Mohamed KOHAIL, 2020. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. In: Ain Shams Engineering Journal [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: doi:10.1016/j.asej.2020.07.016
- [12] FENNIS, Sonja A.A.M. a Joost C. WALRAVEN, 2012. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. In: Materials Science, Engineering [online]. Delft University of Technology, the Netherlands [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-particle-packing-technology-for-sustainable-Fennis-Walraven/c84470ad87b7914d5da4d36c00226d48ad207671>
- [13] Reactive Powder Concrete. In: The concrete portal [online]. Civil Engineering School, Technical University of Madrid [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: http://www.theconcreteportal.com/react_pow.html
- [14] NEWMAN, John a Ban Seng CHOO, 2003. Advanced Concrete Technology: Constituent Materials [online]. [cit. 2023-04-20]. ISBN 0-7506-5103-2. Dostupné z: <https://cloudflare-ipfs.com/ipfs/bafykbzaceau6es7izpnseeqt2uj5razuz2hpbrrljzv3z4zvf6tmkxzuzfxi?filename=John%20Newman%2C%20B%20S%20Choo%20-%20Advanced%20concrete%20technology-Elsevier%20Butterworth-Heinemann%20%282003%29.pdf>
- [15] DEANS, Matthew, 2022. Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources [online]. Woodhead [cit. 2023-04-20]. ISBN 978-0-12-824050-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01219-3>
- [16] ŠMATELKA, Filip, 2019. Příprava vysoce čistého CaCO_3 a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ srážecí reakcí z roztoku Ca^{2+} [online]. Pardubice [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/74001/SmatelkaF_Priprava_vysoce_cisteho_PD_2019.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Doleček, CSc.
- [17] POTGIETER, J. Herman a Hanno KASPAR. *Hydration of Cement* [online]. 1999, 52 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA03794350_1560
- [18] Odler, I. (1998). Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 241–297. doi:10.1016/b978-075066256-7/50018-7
- [19] Scrivener, K., Ouzia, A., Juilland, P., & Kunhi Mohamed, A. (2019). Advances in understanding cement hydration mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 124, 105823. doi:10.1016/j.cemconres.2019.1058

- [20] KAŠPÁRKOVÁ, Kateřina, 2014. Vliv oxidů těžkých kovů na vlastnosti cementových past [online]. Brno [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/30288660>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
- [21] NOVÁČEK, Jaroslav, 2013. Studium objemových změn pojivových silikátových směsí [online]. Brno [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/34544>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
- [22] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO, 2017. Ložiska nerostů: Kamenivo. In: Geologie.vsb.cz [online]. Ostrava: Anagram [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/uvodem.htm>
- [23] Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. doi:10.1016/0008-8846(95)00144-2
- [24] Složky betonové směsi-Pozemní stavitelství. In: Studijni-svet.cz [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/slozky-betonove-smesi-pozemni-stavitelstvi/>
- [25] Transition Zone in Concrete-Definition, Types and Effects, 2017. ReadCivil [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://readcivil.com/transition-zone-in-concrete/>
- [26] Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421. doi:10.1023/b:ints.0000042339.92
- [27] Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu [online], 2008. Brno [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4670. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Ing. Josef Krátky, Ph.D.
- [28] Mehta, A., & Ashish, D. K. (2019). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 100888. doi:10.1016/j.jobee.2019.100888
- [29] HOLCOVÁ, Katarína. Písek, jak ho neznáte. In: Prirodovedci.cz [online]. 4.4.2014 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.prirodovedci.cz/magazin/pisek-jak-ho-neznate>
- [30] HARMATA, Jan. Písek. In: Egeon.cz [online]. 15.3.2019 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://egeon.cz/slovník/340/pisek?c=9531>
- [31] MAČAS, M. Jaký písek do betonu použít?. In: Stavimbydlim.cz [online]. 19.1.2021 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://stavimbydlim.cz/jaky-pisek-do-betonu-prany-frakce-0-4-mm/>

- [32] Péra, J., Husson, S., & Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 21(2), 99–105. doi:10.1016/s0958-9465(98)00020-1
- [33] MAČAS, M. Přísady a směsi do betonu. In: Merit-slatinany.cz [online]. 3.3.2016 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.merit-slatinany.cz/prisady-smesi-do-betonu>
- [34] HLUŠEK, Jaroslav. Vápenatá hnojiva s uhličitanovou formou vápníku. In: Web2.mendelu.cz [online]. 23.1.2004 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/hnojiva/mineralni/cauhlicitativa.nova.htm
- [35] HELA, Rudolf, 2017. Technologie betonu II [online]. Vysoké učení technické v Brně fakulta stavební. Brno [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <http://www.unim.cz/materialy/vut/fast/skripta-m15517-p1.html>
- [36] Záměsová voda do betonu. In: MujBeton.cz [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.muj-beton.cz/zamesova-voda-do-betonu>
- [37] Příprava a charakterizace betonů na bázi směsného geopolymerního pojiva [online], 2011. Brno [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=36267. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [38] The role of water in concrete. In: Linkedin.com [online]. 16. 4. 2018 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/role-water-concrete-g-k/>
- [39] AÏTCIN, Pierre-Claude a Robert J FLATT, 2016. Science and Technology of Concrete Admixtures [online]. Woodhead Publishing [cit. 2023-04-23]. ISBN 978-0-08-100693-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00150-2>
- [40] Chemické přísady do betonu. In: MujBeton.cz [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.muj-beton.cz/chemicke-prisady-do-betonu>
- [41] ZAJÍČEK, Milan. Chemické přísady do betonu a malt. In: Asb-portal.cz [online]. 19.9.2008 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/chemicke-prisady-do-betonu-amalt>
- [42] Latex. In: Madehow.com [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-3/Latex.html>
- [43] BEZDĚK, Michal. Přehled nejdůležitějších dienů. In: Eluc.ikap.cz [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2400>

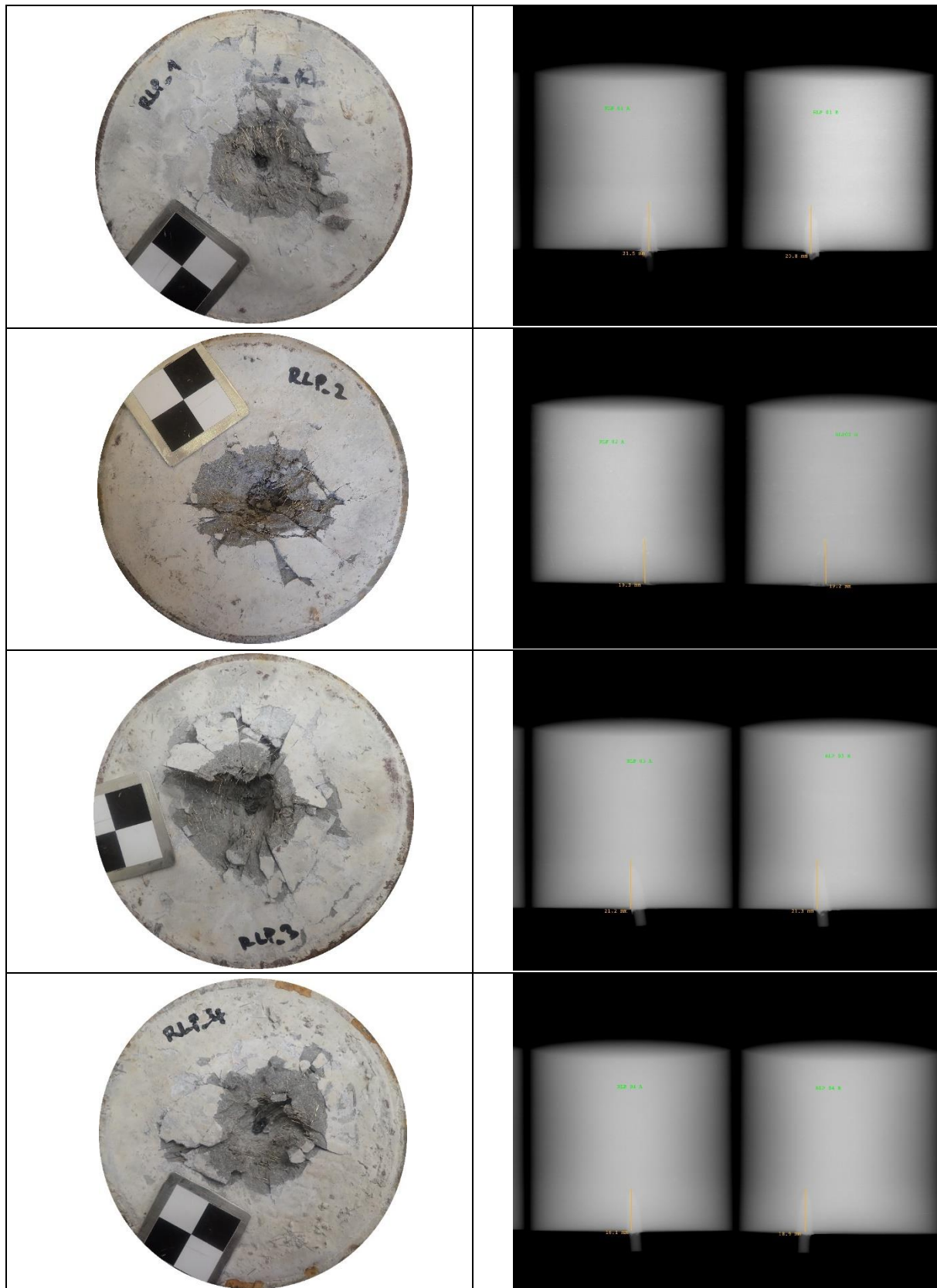
- [44] Oommen, Dony Cherian, "Carbon fiber reinforced latex modified concrete for bridge deck overlays" (2006). Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 4254.
<https://researchrepository.wvu.edu/etd/4254>
- [45] OHAMA, Yoshihiko a V.S. RAMACHANDRAN, 1996. 9 - Polymer-Modified Mortars and Concretes. In: Concrete Admixtures Handbook [online]. s. 558-656 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-081551373-5.50013-1>
- [46] Latexem modifikované cementové kompozity [online], 2013. Brno [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/25096/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [47] VINTER, Václav, 2008. Latexy modifikované cementové materiály [online]. Brno [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30295514.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [48] EASH, R Douglas a Harvey H SHAFER. Reactions of polymer latex with portland cement concrete [online]. 1975, s. 8 [cit. 2023-04-20]. ISBN 0309023955. ISSN 0361-1981. Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1975/542/542-001.pdf>
- [49] PALSON, P. a B. VIDIVELLI. MECHANICAL PROPERTIES OF LATEX MODIFIED CONCRETE WITH SILICA FUME. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) [online]. 2017, 0976-6316 [cit. 2023-04-26]. ISSN 0976-6316. Dostupné z: <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=9>
- [50] GENGYING, Li, Conteh Santigie MORLOR, Christopher LEUNG a Haiyang WANG, 2021. Mechanical properties and fractal analysis of cement mortar incorporating styrene-butadiene rubber latex and carboxylated MWCNTs. In: Construction and Building Materials [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125175>
- [51] DIAB, Ahmed M., Hafez E. ELYAMANY a Ali Hassan ALI, 2013. Experimental investigation of the effect of latex solid/water ratio on latex modified co-matrix mechanical properties. In: Alexandria Engineering Journal [online]. s. 83-98 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.002>
- [52] Okba, S. H., El-Dieb, A. S., & Reda, M. M. (1997). Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete (LMC). Cement and Concrete Research, 27(6), 861–868. doi:10.1016/s0008-8846(97)00062-8
- [53] Shaker, F. A., El-Dieb, A. S., & Reda, M. M. (1997). Durability of Styrene-Butadiene latex modified concrete. Cement and Concrete Research, 27(5), 711–720. doi:10.1016/s0008-8846(97)00055-0

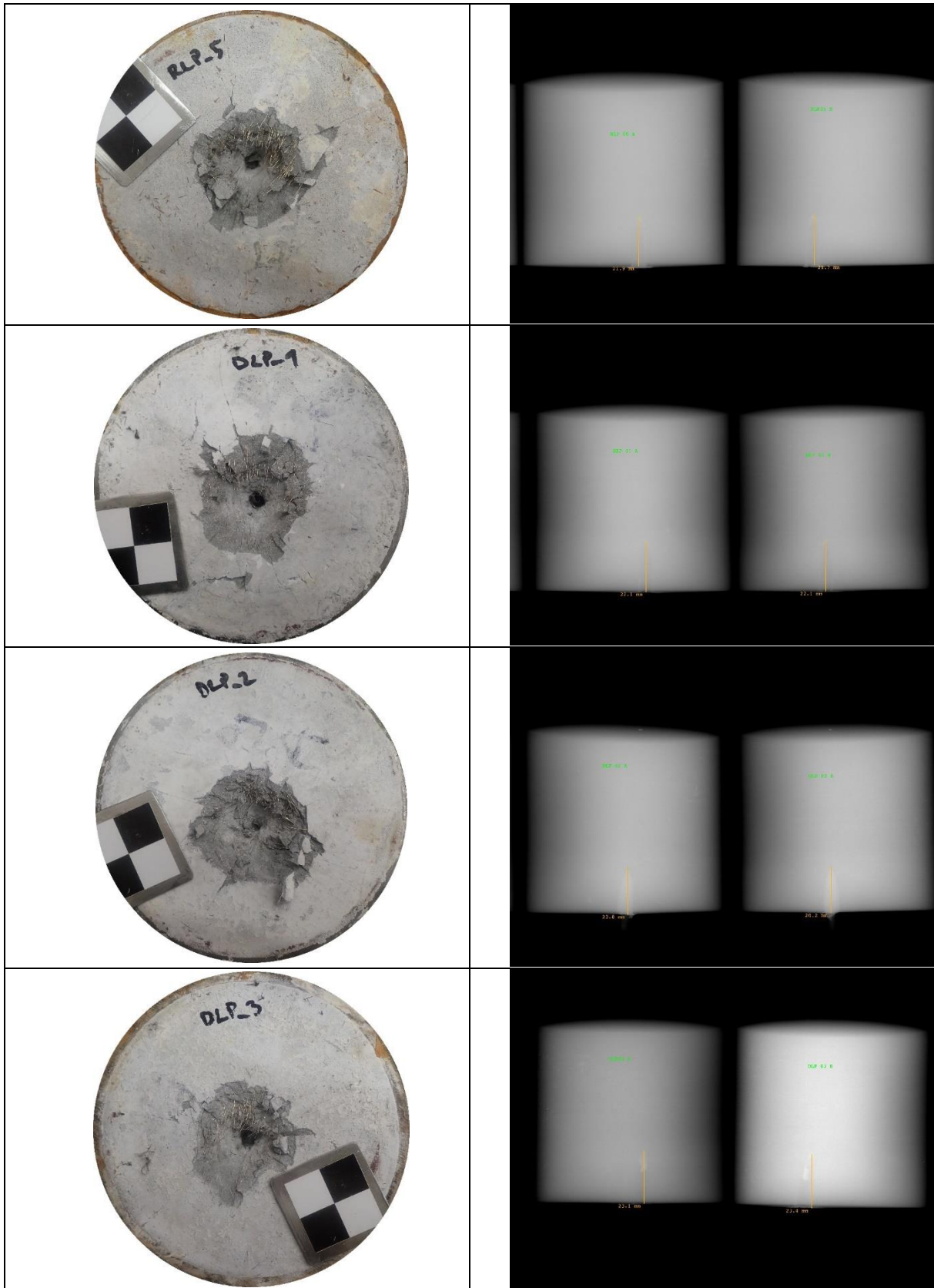
- [54] Technický list Křemičité moučky dorsilit. In: Chejn spol.s.r.o. [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://www.chejn.cz/pdf/4_moucky.pdf
- [55] Mikromleté písky. In: Sklopísek Střeleč, a.s. [online]. 1.1.2022 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://glassand.eu/getFile/case:show/id:437676??>
- [56] Bílý portlandský cement CEM I 52,5 R - SR 5 white. In: Heidelbergcement [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi525r-white>
- [57] SiO₂ „RW-Füller Q1“. In: AMG SILICON [online]. 15.9.2021 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://www.silicium.de/wp-content/uploads/2022/05/PS_RWF_Q1_QSt_161_Rev._08_15.09.21.pdf
- [58] Fiche Technique CHRYSOÂ®Fluid Optima 185. In: YUMPU [online]. 15.9.2021 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/24283558/fiche-technique-chrysoarfluid-optima-185>
- [59] PLEXTOL X 4002. In: Synthomer [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://utsrus.com/data/ETS_WWW/files/b7b03036-0433-11e9-8129-c58096cfb4ac/Plectol%20X%204002_TDS.pdf
- [60] REVACRYL™ AE 2091 JA. In: Synthomer [online]. 22.9.2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.synthomer.com/Media/tds/REVACRYL%20AE%202091%20JA.pdf>
- [61] Technický list DUVILAX® BD-20. In: Den Braven Czech and Slovak a.s. [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.metrum.cz/product/files/tl-rev2-duvilax-bd-20.pdf>
- [62] DUVILAX® BD-20. In: DUSLO energy of your growth [online]. 2017 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://dokumentace.denbraven.cz/?p=24+Ostatn%C3%AD%2FDuvilax+BD-20+p%C5%99%C3%ADm%C4%9Bs+do+stavebn%C3%ADch+sm%C4%9Bs%C3%AD%2FTechnick%C3%BD+list&dl=Duvilax_BD-20_2022_SK.pdf
- [63] O VLÁKNECH DO BETONU. In: KrampeHarex CZ s.r.o. [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.krampeharex.cz/vlakna-do-betonu>
- [64] Stanovení konzistence betonu Metoda sednutí kužele [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/34469689-Stanoveni-konzistence-betonu-metoda-sednuti-kuzele.html>
- [65] Zkoušení čerstvého betonu [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/rozliti.pdf>

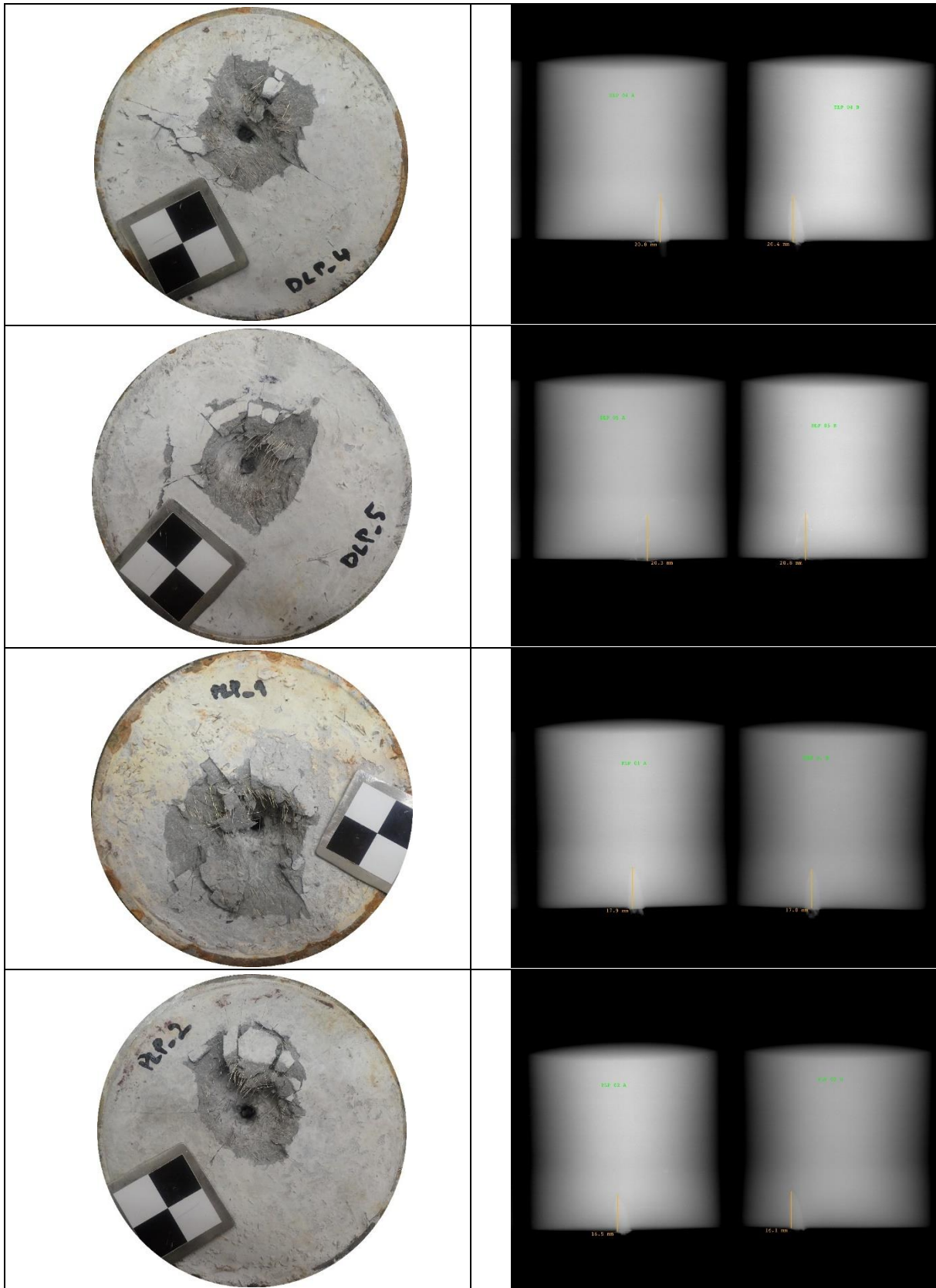
- [66] Objemová hmotnost a hustota [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://k123.fsv.cvut.cz/media/predmety/123SH01/SH_tahak.pdf
- [67] Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/pevnostvtahuohybem.pdf>
- [68] Pevnost betonu v tahu za ohybu – zkouška [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska/>
- [69] Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu. Tzbinfo [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>
- [70] Pevnost betonu v tlaku – zkouška. *Ebeton* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska/>
- [71] Pevnost betonu v tlaku. *MujBeton.cz* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.muj-beton.cz/pevnost-betonu-v-tlaku>
- [72] RICHARDSON, Alan, Kathryn COVENTRY, Thomas LAMB a David MACKENZIE, 2016. The addition of synthetic fibres to concrete to improve impact/ballistic toughness. In: *Construction and Building Materials* [online]. s. 612-621 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.024>
- [73] BOCIAN, Luboš. Vliv antikorozi povrchové úpravy ocelové výztuže na vlastnosti vysokohodnotného cementového kompozitu. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138116>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Radoslav Novotný.
- [74] HRBÁČOVÁ, Markéta. Vliv pyrogenního oxidu křemičitého na vlastnosti ultravysokohodnotného cementového kompozitu [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137518>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Radoslav Novotný.
- [75] Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html

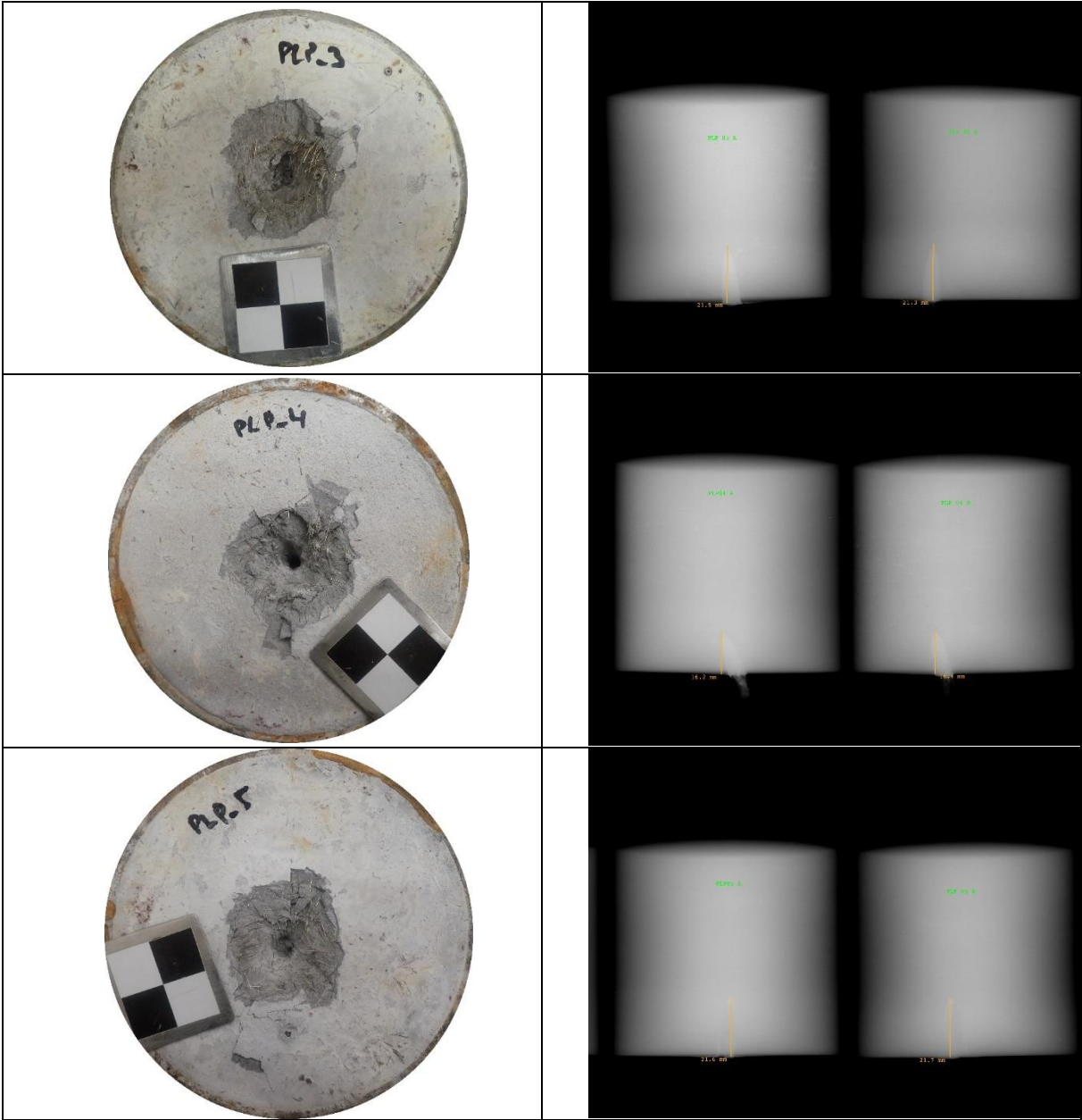
7 PŘÍLOHY

7.1 Příloha č. 1: Fotodokumentace vzorků z balistické zkoušky



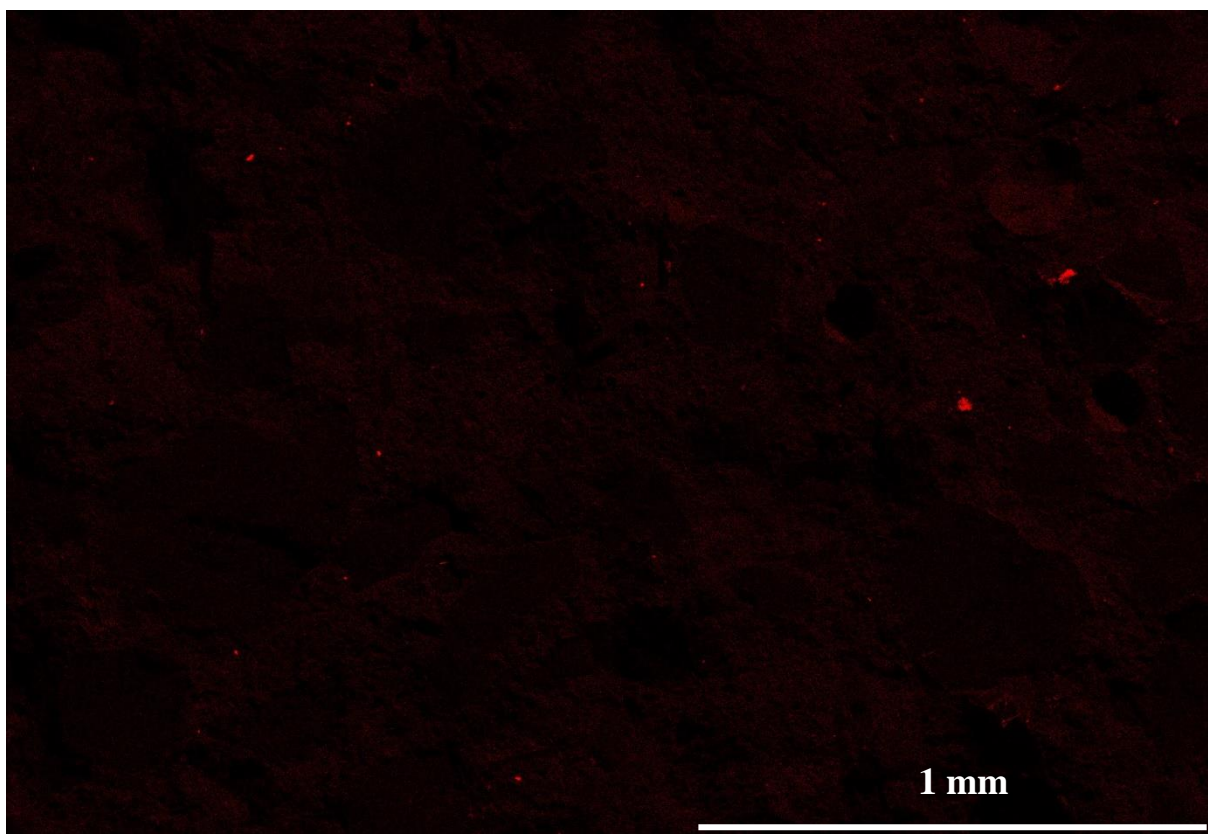
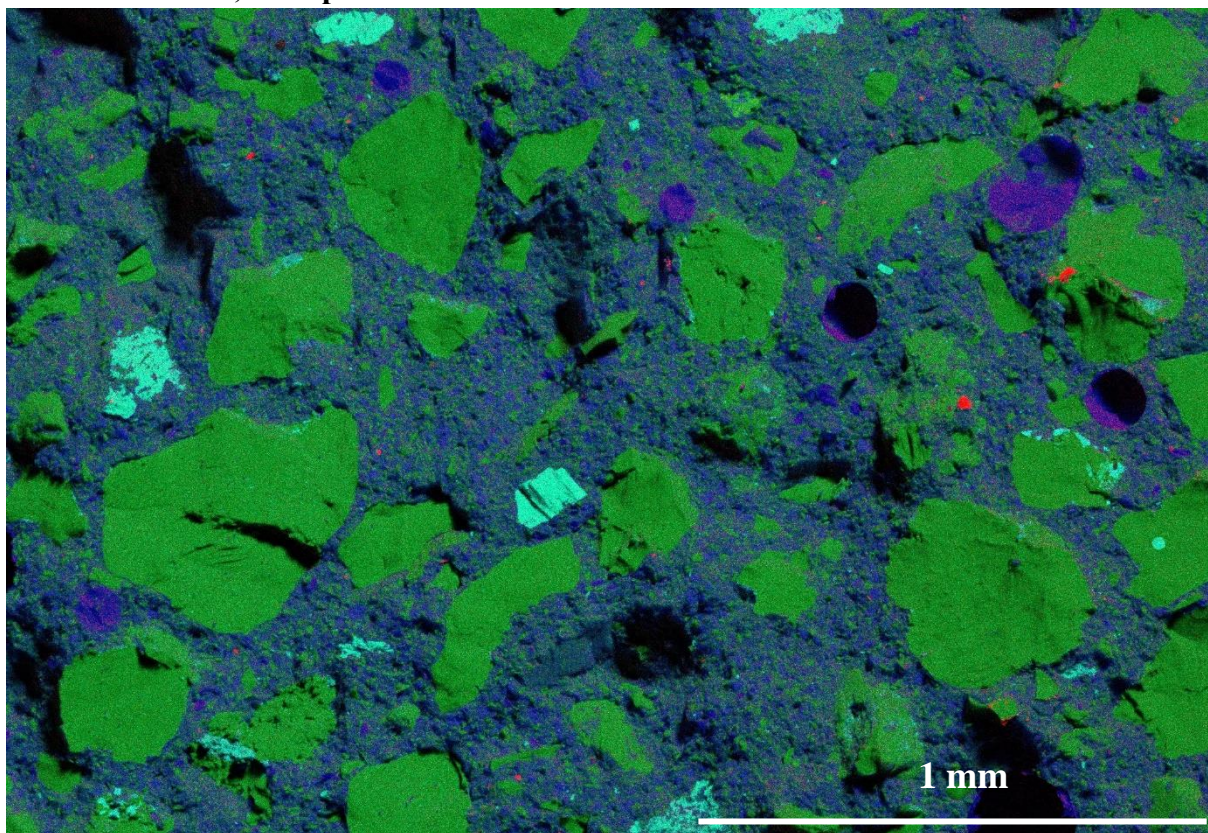




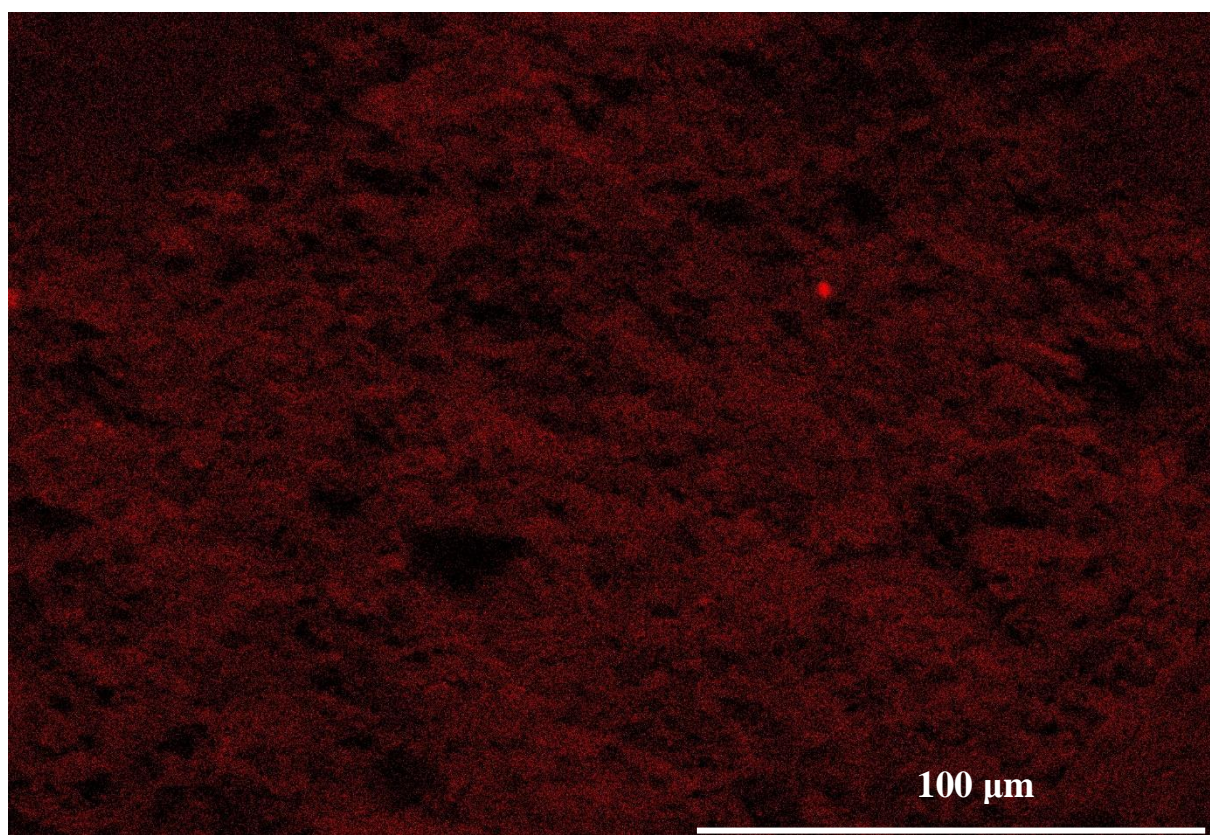
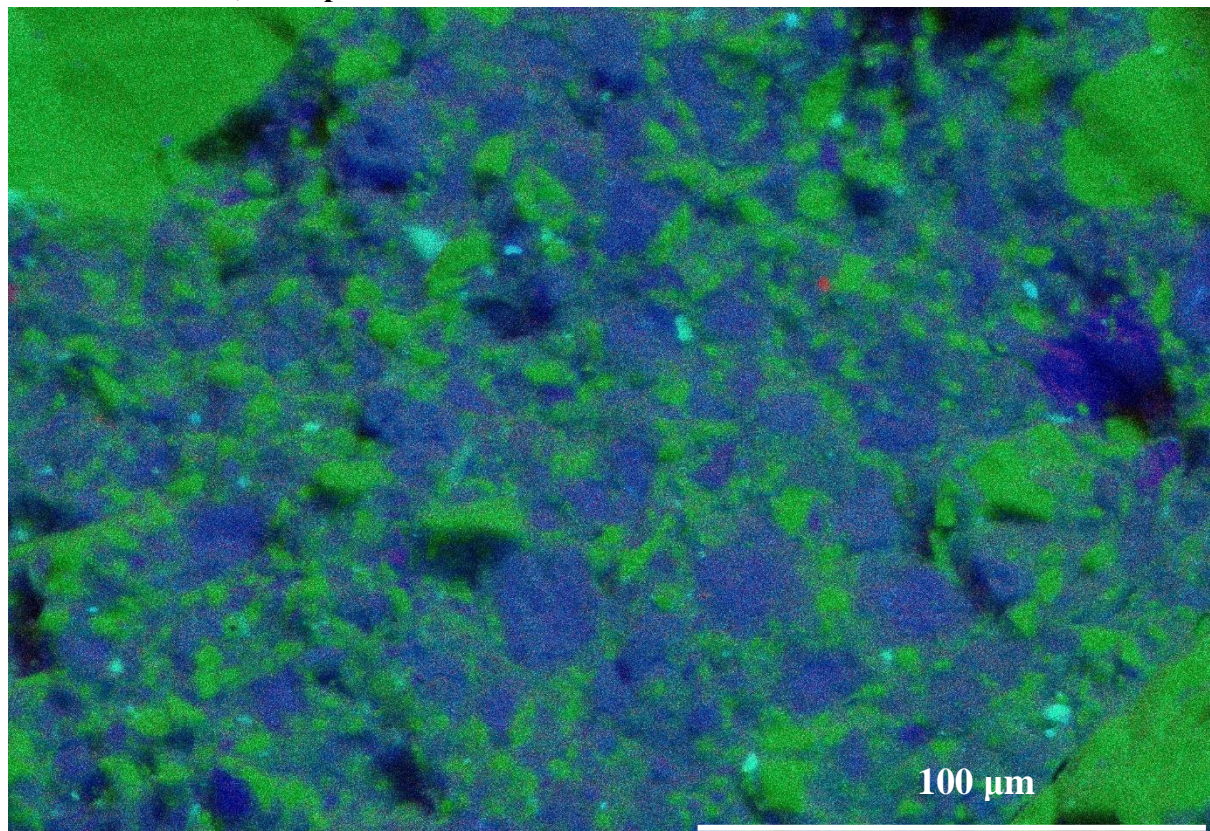


7.2 Snímky ze rastrovacího elektronového mikroskopu

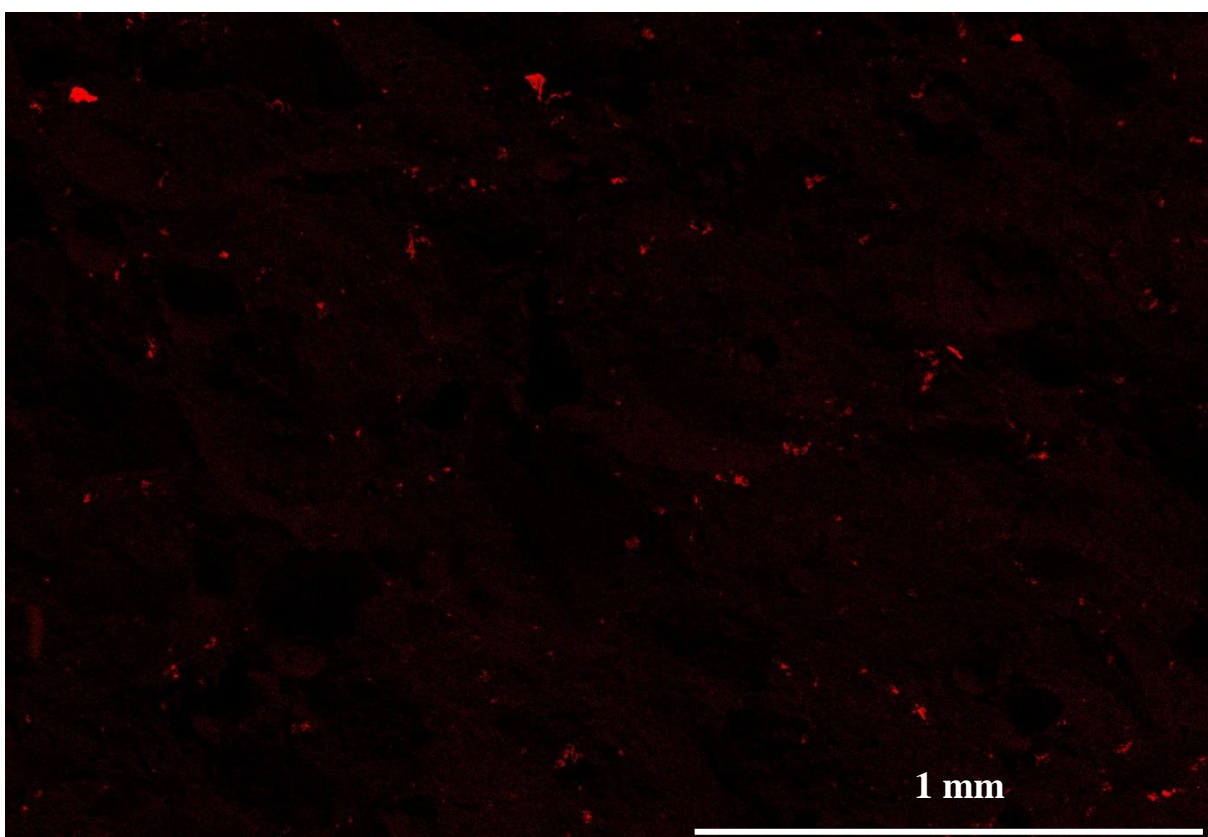
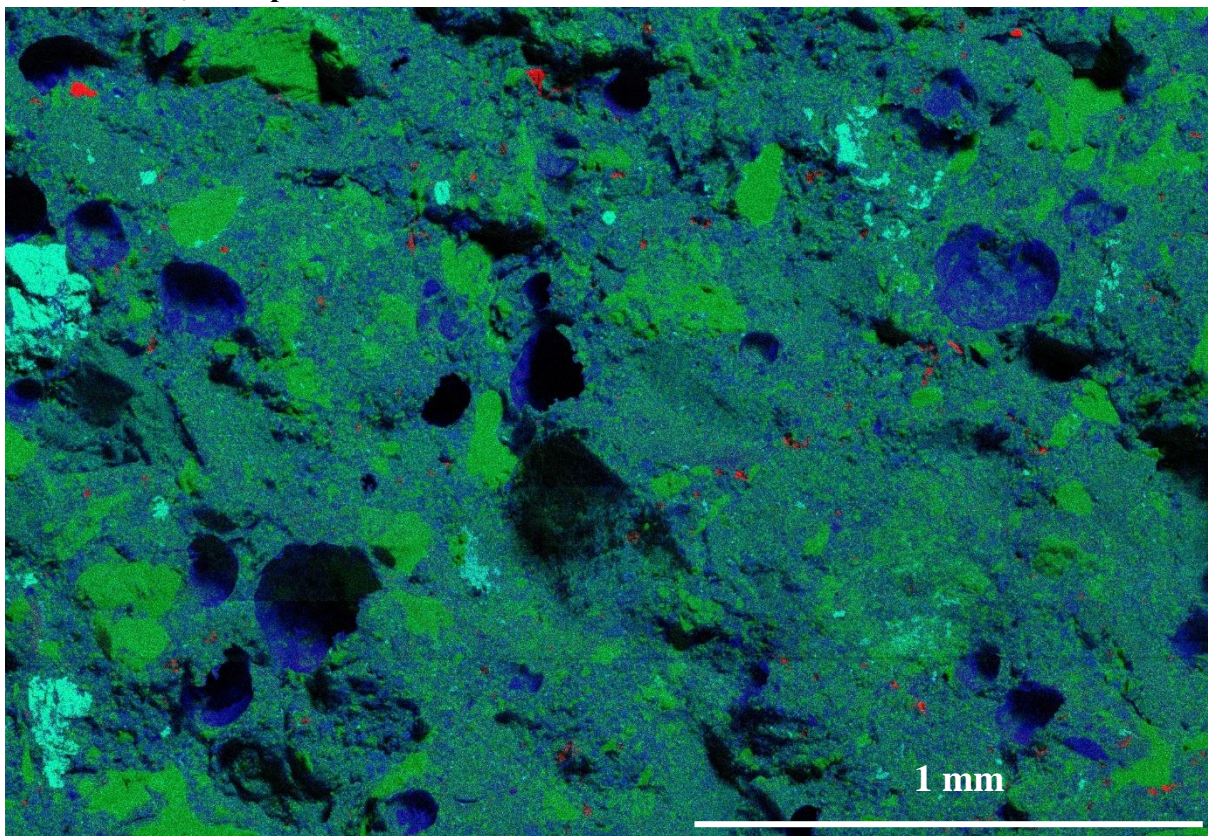
7.2.1 Duvilax 0,40 % při zvětšení 50 x



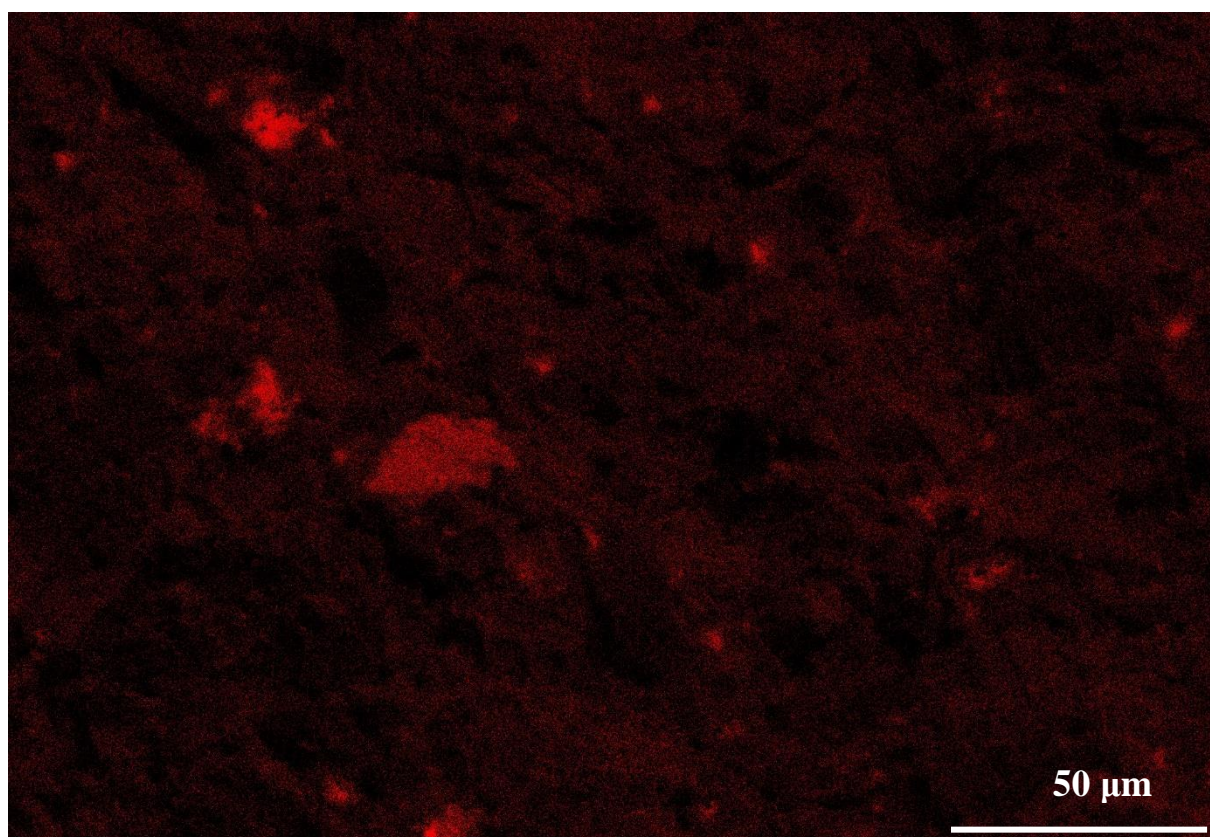
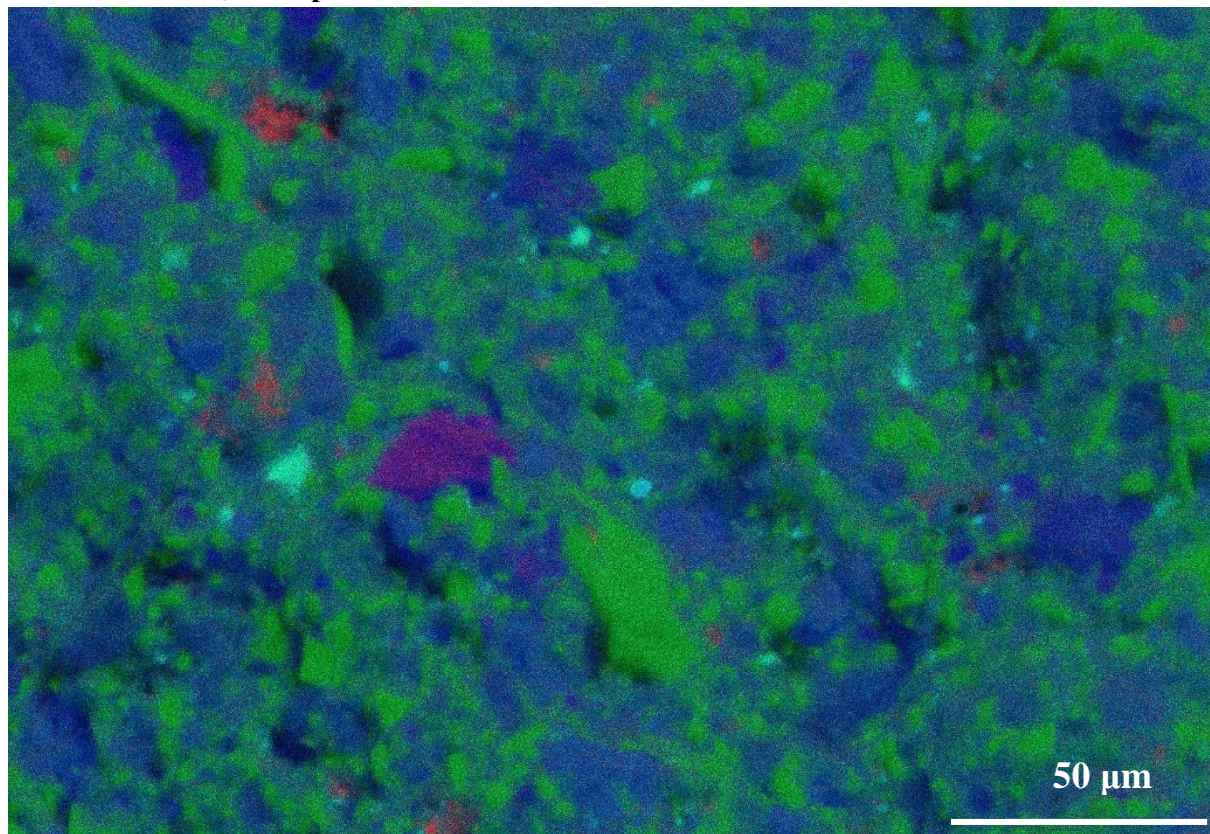
7.2.2 Duvilax 0,40 % při zvětšení 500 x



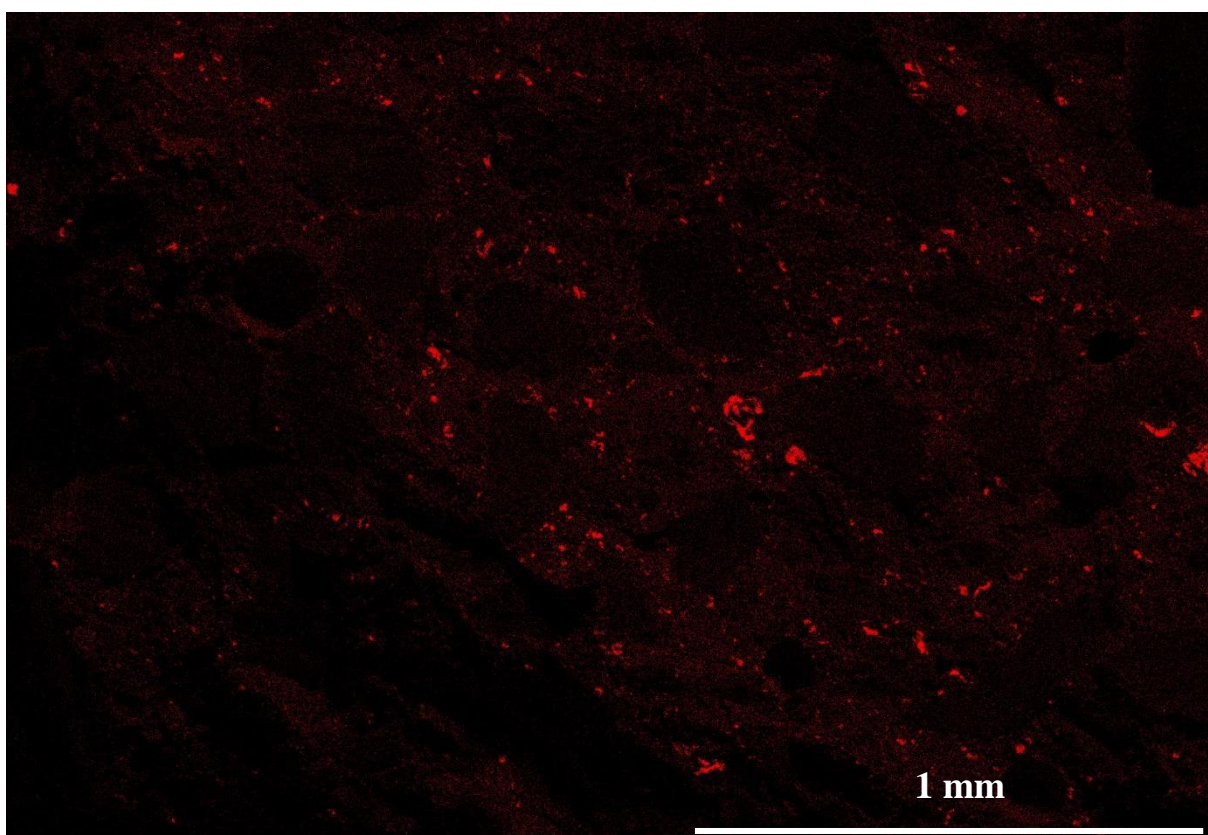
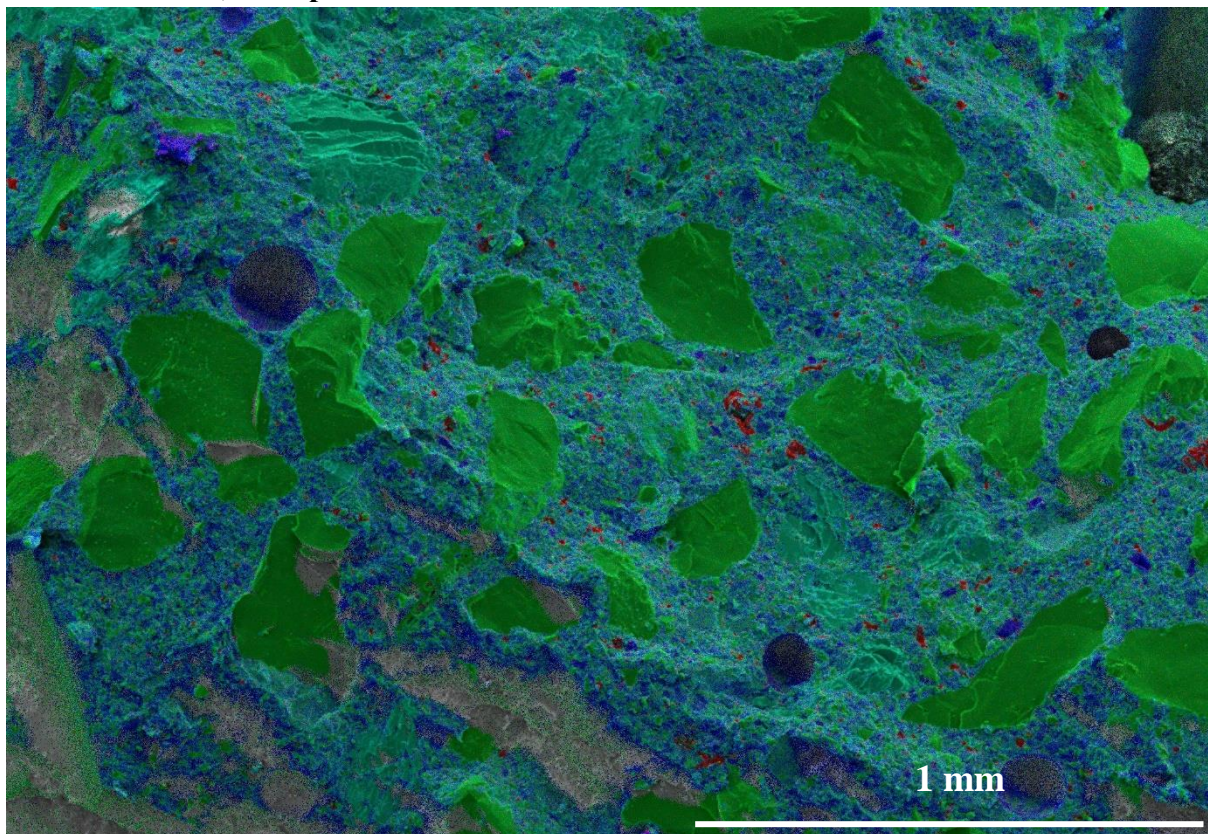
7.2.3 Plextol 0,60 % při zvětšení 50 x



7.2.4 Plextol 0,60 % při zvětšení 500 x



7.2.5 Plextol 2,50 % při zvětšení 50 x



7.2.6 Plextol 2,50 % při zvětšení 500 x

