



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM A VÝVOJ POLYMER-CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ S DŮRAZEM NA VYSOKÝ OBSAH DRUHOTNÝCH SUROVIN A KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

STUDY AND DEVELOPMENT OF POLYMER-CEMENT COMPOSITES WITH EMPHASIS
ON HIGH CONTENT OF SECONDARY RAW MATERIALS AND COMPENSATION OF
VOLUME CHANGES

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Radek Hermann

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA, dr. h. c.

BRNO 2023

ABSTRAKT

Snížování uhlíkové stopy lidstva je jedním z hlavních směrů, kterými se v současnosti světový vývoj ubírá. Dalším z významných problémů je likvidace, recyklace a sekundární využití produkovaných odpadů z celé řady výrobních odvětví a komunálního odpadu.

Tato práce se zabývá problematikou polymer-cementových kompozitů, které se využívají nejčastěji pro sanační, reprofilační a strukturální opravy především betonových konstrukcí. Jsou v ní zkoumány a ověřovány možnosti utilizace velkého množství druhotných surovin a odpadů jako náhrady cementu, jakožto primárního pojiva. Zároveň je v práci řešena plná náhrada primárního plniva odpadními surovinami, pro které v tuto chvíli neexistuje jiné využití. Také je dále řešen a ověřován vliv celé řady běžně dostupných komerčních polymerních přísad. V rámci práce je rovněž řešeno využití redispergovatelných práškových polymerních přísad různých bází. Zabývá se i otázkou objemových změn při hydrataci polymer-cementových kompozitů a jejich vlivem na fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitů. Vliv objemových změn, ke kterým v průběhu hydratace polymer-cementových kompozitů dochází, je nezanedbatelným kritériem při výběru a využití těchto kompozitů. Objemové změny materiálu významně ovlivňují především maximální tloušťku vrstvy a maximální plochu, kterou lze hmotou sanovat bez rizika vzniku trhlin a bez nutnosti vytvoření pracovní spáry. S výsledky této práce se pojí snížení ekonomické a ekologické zátěže výroby a použití polymer-cementových stavebních hmot a dále také zvýšení použitelnosti těchto hmot především díky možnosti provádět sanace větších ploch, než bylo dosud možno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymer-cementová, polymerní, objemové změny, kompenzace objemových změn, druhotná surovina, substituce, cement, obalové sklo, škvára, odpadní perlit, tavený čedič, styren-akrylát

ABSTRACT

Reducing of humanity's carbon footprint is currently one of the main directions of global research. Another significant problem is the disposal, recycling and secondary use of waste materials produced from a wide range of industries and municipal waste.

This thesis deals with the problematics of polymer-cement composites, which are most often used for rehabilitation, reprofiling and structural repairs, especially of concrete structures. The thesis examines and verifies the possibilities of utilization of a large amount of secondary raw materials and waste as a substitute for cement as a primary binder. At the same time, the work deals with the full replacement of the primary filler with waste raw materials, for which there is currently no other use. The work also addresses and verifies the influence of several commonly available commercial polymer dispersions. The work deals with the use of liquid, but also powdered polymeric additives of various bases. The work also deals with the problematics of volume changes of the hydration process of polymer-cement composites and the effect of volume changes on the physical-mechanical properties of composites. The influence of volume changes that occur during the hydration of polymer-cement composites is a significant criterion in the selection and use of these composites. The volume changes of the material have a great influence especially on the maximum layer thickness and the maximum area that can be repaired with the material without the risk of cracks and the need to create a working joint. The results of this work are associated with a reduction in the economic and environmental impacts of production and use of polymer-cement building materials and increase the usability of these materials mainly due to the possibility of remediation of larger areas than previously possible.

KEYWORDS

Polymer-cement, polymer, volume changes, volume change compensation, secondary raw material, substitution, cement, container glass, slag, waste perlite, molten basalt, styrene-acrylate

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

HERMANN, Radek. Studium a vývoj polymer-cementových kompozitů s důrazem na vysoký obsah druhotných surovin a kompenzaci objemových změn. Brno, 2023. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Studium a vývoj polymer-cementových kompozitů s důrazem na vysoký obsah druhotných surovin a kompenzaci objemových změn zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 2. 8. 2023

Ing. Radek Hermann

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především své úžasné ženě Zdeňce, že se mnou vydržela celé hektické období při zpracování této práce a měla trpělivost s mým časovým vytížením.

Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Rostislavovi Drochytzkovi CSc., MBA, dr.h.c., jakožto vedoucímu mé disertační práce, za jeho odborné rady a udávání směru této práci. Také bych chtěl poděkovat Ing. Petrovi Figalovi, Ing. Vítovi Černému, Ph.D., Ing. Jindřichovi Melicharovi, Ph.D. za jejich spolupráci, věcné připomínky, rady a čas, který se mnou při konzultacích k této disertační práci strávili. Rád bych také vzdal obrovský dík paní Blance Bártové a panu Petrovi Boháčovi, za jejich vstřícný přístup a pomoc při výrobě a zkoušení vyrobených vzorků a také všem dalším, se kteří mi byli během zpracování této práce nápomocni. Díky!!!

Disertační práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS a díky finanční podpoře ze státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v projektu č. FW03010074 "Progresivní systém sanace vad a poruch čedičových kanalizačních sítí".

OBSAH

ÚVOD	11
TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1 SHRNUTÍ DOSAVADNÍCH POZNATKŮ	14
1.1 Pojiva.....	14
1.1.1 Hydraulická pojiva.....	14
1.1.1.1 Portlandský cement (OPC)	15
1.1.1.2 Hydratace slínekových minerálů	16
1.1.2 Substituce portlandského slínku – příměsi	17
1.1.2.1 Latentně hydraulické materiály.....	17
1.1.2.2 Pucolány.....	18
1.1.3 Druhotné suroviny	18
1.1.4 Další vybrané druhy cementů	19
1.1.4.1 CSA cement.....	19
1.1.4.2 Hlinitanový cement (CAC).....	20
1.2 Přísady do cementových kompozitů	21
1.2.1 Tekuté přísady	21
1.2.2 Redispergovatelné prášky	22
1.2.2.1 Plastifikační přísady	22
1.2.2.2 Napěňovací přísady	23
1.2.2.3 Odpěňovací přísady.....	24
1.2.2.4 Polymerní přísady	24
1.2.2.5 Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí.....	26
1.3 Betony a malty	26
1.4 Plniva.....	27
1.4.1 Přírodní plniva	29
1.4.2 Umělá plniva	29
1.4.3 Mikroplniva/fillery	30
1.5 Cementové a polymer-cementové kompozity	31
1.5.1 Složení cementových a polymer-cementových kompozitů.....	34
1.5.2 Cementová lepidla	36
1.5.3 Sanační malty	37
1.5.4 Návrh cementových a polymer-cementových kompozitů	39
1.6 Hydratační objemové změny cementových a polymer-cementových kompozitů.....	41
1.6.1 Teplotní hydratační objemové změny	42
1.6.2 Autogenní a chemické hydratační objemové změny	43
1.6.3 Plastické hydratační objemové změny	44
1.7 Moderace hydratačních objemových změn	44

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	47
2 CÍL PRÁCE.....	48
3 METODIKA PRÁCE	48
3.1 ETAPA I. - Charakterizace expozičního prostředí, návrh metod laboratorního testování a výběr vstupních surovin.....	51
3.2 ETAPA II. - Sestavení a testování základních surovinových variant, substituce primárních složek druhotnými surovinami	55
3.3 ETAPA III. - Návrh a testování vybraných surovinových variant – vliv polymerních redispergovatelných prášků	57
3.4 ETAPA IV. - Návrh a testování vybraných surovinových variant – vliv přísad pro kompenzaci objemových změn.....	59
3.5 ETAPA V. - Optimalizace výstupů, pokročilé testování vybraných surovinových variant, zhodnocení výsledků, selekce optimalizovaného řešení 61	
3.6 ETAPA VI. - Závislost přídržnosti vyvíjených kompozitů k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům na hydratačních objemových změnách...	62
VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE	63
4 ETAPA I. - CHARAKTERIZACE EXPOZIČNÍHO PROSTŘEDÍ, NÁVRH METOD LABORATORNÍHO TESTOVÁNÍ A VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN	63
4.1 Charakterizace prostředí	63
4.2 Metody laboratorního testování.....	64
4.3 Výběr vstupních surovin	72
4.4 Primární suroviny	73
4.4.1 Cement (OPC)	73
4.4.2 Stavební tříděný písek	73
4.4.3 Křemenná moučka.....	74
4.4.4 Vápenec (LL).....	75
4.4.5 Metakaolin	75
4.4.6 Mikrosilika.....	75
4.5 Druhotné suroviny	77
4.5.1 Odpadní slévárenský písek pojený vodním sklem	77
4.5.2 Odpadní elektrárenská škvára	77
4.5.3 Odpad z výroby obkladových prvků z taveného čediče	78
4.5.4 Vysokoteplotní popílek (HFA).....	78
4.5.5 Odpadní expandovaný perlit (EPP)	79
4.5.6 Odpadní obalové sklo.....	80
4.6 Přísady	81
4.6.1 Plastifikační přísady	81
4.6.2 Odpěňovací přísady	81
4.6.3 Polymerní přísady	82
4.6.3.1 Styren-akrylát (SA).....	82

4.6.3.2	Kopolymer ethylen vinylacetátu (VAE).....	82
4.6.3.3	Terpolymer vinylacetátu, vinylchloridu a ethylenu (vae, vc, e)	83
4.6.3.4	Kopolymer Vinylacetátu, Vinyl esteru a ethylenu (VAE, VE, E).....	83
4.6.3.5	Hydroxypropyl methyl celulóza (HPMC).....	83
4.6.4	Příspěvky pro kompenzaci objemových změn	84
4.6.4.1	Neopentyl glycol (2,2-dimethylpropane-1,3-diol).....	84
4.6.4.2	Polyether	84
4.6.4.3	Sádra	84
4.6.4.4	CAC cement	85
4.6.4.5	CSA cement.....	85
4.6.4.6	ACA cement	86
5	ETAPA II. - SEŠTAVENÍ A TESTOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH VARIANT, SUBSTITUCE PRIMÁRNÍCH SLOŽEK DRUHOTNÝMI SUROVINAMI.....	87
5.1	Návrh základních receptur	87
5.1.1	Testování základních receptur.....	89
5.1.1.1	Fyzikálně-mechanické parametry	89
5.1.1.2	Hydratační objemové změny a přídržnost k obkladovým prvkům 92	
5.1.1.3	Mikrostruktura vzorků.....	94
5.1.2	Optimalizace základních receptur	96
5.1.3	Shrnutí a vyhodnocení první části etapy II. – základní receptury....	99
5.2	Návrh receptur s obsahem druhotných a odpadních surovin.....	100
5.2.1	Testování receptur s obsahem druhotných a odpadních surovin	102
5.2.1.1	Fyzikálně-mechanické parametry	102
5.2.1.2	Hydratační objemové změny.....	105
5.2.1.3	Mikrostruktura vzorků a XRD	106
5.2.2	Optimalizace receptur s obsahem druhotných a odpadních surovin 110	
5.2.3	Shrnutí a vyhodnocení druhé části II. etapy – receptury s obsahem druhotných a odpadních surovin.....	116
6	ETAPA III. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ	118
6.1	Návrh receptur – vliv polymerních redispergovatelných prášků	118
6.2	Testování – vliv polymerních redispergovatelných prášků.....	119
6.2.1	Fyzikálně-mechanické parametry	119
6.2.2	Hydratační objemové změny a přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům.....	123
6.2.3	Mikrostruktura a XRD	126
6.3	Optimalizace – vliv polymerních redispergovatelných prášků	128
6.4	Shrnutí a vyhodnocení – vliv polymerních redispergovatelných prášků 133	

7	ETAPA IV. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV PŘÍŠAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN	134
7.1	Návrh receptur – vliv přísad pro kompenzaci objemových změn	134
7.2	Testování – vliv přísad pro kompenzaci objemových změn	135
7.2.1	Fyzikálně-mechanické parametry	135
7.2.2	Hydratační objemové změny a přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.....	138
7.2.3	Mikrostruktura a XRD	142
7.3	Optimalizace – vliv přísad pro kompenzaci objemových změn	146
7.4	Shrnutí a vyhodnocení – vliv přísad pro kompenzaci objemových změn 151	
8	ETAPA V. - OPTIMALIZACE VÝSTUPŮ, POKROČILÉ TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT, ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, SELEKCE OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ	154
8.1	Návrh receptur – výběr optimalizovaného řešení	154
8.2	Testování – výběr optimalizovaného řešení.....	156
8.2.1	Fyzikálně-mechanické parametry	156
8.2.2	Hydratační objemové změny a přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.....	159
8.2.3	Mikrostruktura	161
8.3	Optimalizace – výběr optimalizovaného řešení.....	163
8.4	Shrnutí a vyhodnocení – výběr optimalizovaného řešení.....	167
9	ETAPA VI. - ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI KOMPOZITŮ K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM NA JEJICH HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH	169
9.1	Testování – závislost přídržnosti kompozitů k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům na jejich hydratačních objemových změnách.....	169
9.2	Informativní ověření kvality modelů	173
9.2.1	Část 1. Závislost přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených trámečkovou metodou	174
9.2.2	Část 2. Závislost přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu	175
9.3	Shrnutí a vyhodnocení – závislost přídržnosti kompozitů k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům na jejich hydratačních objemových změnách	176
10	SHRUTÍ.....	178
11	ZÁVĚR.....	182
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	184
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	191
14	SEZNAM TABULEK	195

ÚVOD

V dnešní době se lidstvo čím dál více zabývá problematikou ekologie a dopady lidské činnosti na životní prostředí. Toto se týká především uhlíkové stopy, tedy kolik CO₂ vyprodukuje daný materiál, či výrobek při své výrobě, ale také během své celé navrhované doby použitelnosti a zda lze tuto stopu redukovat, či zcela odstranit. To se zároveň týká otázky recyklace daného materiálu/výrobku. Tedy zda je nutno ho skládkovat, případně likvidovat jinými metodami, nebo zda lze tento materiál opětovně využít. Současné studie a výzkumy se zabývají velkou měrou recyklací odpadů a hledáním způsobů, jak z odpadů vytvořit druhotnou surovinu, která by byla dále využitelná ve stejném, či jiném odvětví. Stavebnictví, resp. výroba cementu představuje nezanedbatelnou část zátěže životního prostředí. Při výrobě cementu dochází k potřebě velkého množství energie pro ohřev pecí, což je spojeno s produkcí velkého množství CO₂ při spalování paliv, ale zároveň také dochází k uvolnění velkého množství CO₂ při dekarbonataci vápence, jedné z hlavních složek cementu.

Jednou z cest, jak snížit ekologické dopady výroby cementu, je snížit spotřebu tohoto materiálu při výrobě stavebních hmot. V tomto směru bylo provedeno velké množství výzkumů a studií s řadou slibných výsledků, které umožňují snížení dávky cementu o desítky procent při zachování fyzikálně-mechanických vlastností. Stále však zůstává neprozkoumána značná část materiálů a především odpadů, které by bylo možno pro výrobu stavebních hmot využít. Jelikož produkce aktuálně využívaných *odpadů*, které jsou již dnes považovány za druhotné suroviny nedosahuje takové míry, aby byla schopna nasycit celý trh. To celé v souhrnu zvyšuje poptávku a tržní cenu surovin a snižuje ekonomické přínosy, kterých tyto materiály dosahovaly v počátku jejich využívání.

Dalšími směry, kterými se současné stavebnictví, výroba suchých maltových směsí, ale také například výroba vysoce-čerpateľných betonových směsí zabývá je hledání náhrad těžných písků, jichž ve světě ubývá. Částečně je toto řešeno optimalizací křivek zrnitosti kameniva ve směsích pro dosažení kýžených vlastností i s drcenými, ostrohrannými kamenivy. V současné době existuje celá řada materiálů, které na konci své životnosti nelze zcela recyklovat a které pak mohou být při vhodné předúpravě kandidáty pro využití/substituci primárních plniv ve směsích.

Poznatky nabyté v rámci výzkumů lze zkombinovat a aplikovat do vývoje reálných stavebních hmot, mezi něž patří například polymer-cementové kompozity.

V rámci návrhu, vývoje a testování polymer-cementových hmot hraje významnou roli důraz na užité vlastnosti těchto hmot. Sledované parametry a užité vlastnosti hmoty se odvíjí od typu/druhu použití, pro které bude předmětná hmota využívána. V případě sanačních hmot se jedná především o splnění požadavků dle technické normy ČSN EN 1504, v případě malt a lepidel pro keramické obkladové prvky se jedná o technickou normu ČSN EN 12004. V případě polymer-cementových malt se jedná o kombinaci cementových, či jiných pojiv s polymerními disperzemi nebo polymerními redispergovatelnými prášky. Ty zlepšují především kompatibilitu hmot s podkladem, což se projevuje zvýšením přídržnosti k podkladu, či lepenému prvku, dále snížením modulu pružnosti vyvíjené hmoty a zvýšením její houževnatosti, schopnosti překlenovat trhliny, mrazuvzdornosti, pružnosti atd., a to díky tvorbě nejen vazeb cementových, ale také polymerních.

Další nedílnou součástí při navrhování polymer-cementových kompozitů s vysokou trvanlivostí a vysokými užitnými vlastnostmi, je kompenzace objemových změn, ke kterým dochází v průběhu hydratace. Toto je docíleno v první řadě úpravou složení receptury vyvíjené hmoty, a to jak s přihlédnutím na možné redukce množství pojiv, tak také vhodným využitím příměsí a plniv. V druhé řadě pak také využitím vysoce ztekucujících přísad, což vede k možnosti snížení vodního součinitele, ale existuje také celá řada i komerčně dostupných produktů, které lze k těmto účelům využít.

Výsledkem zkombinování všech výše uvedených aspektů dojde k vytvoření polymer-cementového kompozitu s velmi vysokými užitnými vlastnostmi.

TEORETICKÁ ČÁST

1 SHRNUTÍ DOSAVADNÍCH POZNATKŮ

Pro pochopení příčin vzniku objemových změn a problematiky cementových a polymer-cementových kompozitů je důležité znát mechanismus jejich návrhu, vývoje hydratačního procesu a všech základních vstupních surovin a mechanismu způsobu ovlivnění vlastností výsledného kompozitu. Z tohoto důvodu jsou v následujících odstavcích přiblíženy základní používané suroviny, mechanismy jejich spolupůsobení, složení jednotlivých cementových a polymer-cementových kompozitů a popis objemových změn, ke kterým dochází během hydratačního procesu cementu.

1.1 POJIVA

Při výrobě stavebních hmot jsou využívána pojiva. Ty jsou užívány pro spojení plnivových složek kompozitů a pro vytvoření jedolité, heterogenní matrice. Pojiva jsou významnými nosiči většiny vlastností výsledného kompozitu a jsou tudíž jeho silnou, ale zároveň také slabou stránkou.

Pojivové složky kompozitů ovlivňují především výslednou chemickou odolnost, nasákavost, teplotní odolnost, částečně také teplotní roztažnost a další základní parametry. Fyzikálně-mechanické vlastnosti, mezi které patří například pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, odolnost proti obrusu, houževnatost, modul pružnosti, jsou ve velké míře závislé také na pojivu, ale lze je zásadním způsobem ovlivnit i plnivovými složkami (množstvím, zrnitostí atd.).

Mezi nejběžněji využívaná pojiva ve světě, z oblasti nepolymerních, za běžných teplot tuhoucích a tvrdnoucích pojiv, patří vzdušná a hydraulická anorganická pojiva.

1.1.1 HYDRAULICKÁ POJIVA

Tato pojiva, či hydraulické maltoviny, se od vzdušných pojiv liší tím, že po smíchání se záměsovou vodou tuhnou a tvrdnou nejen na vzduchu, ale také pod vodou. U těchto pojiv zároveň nedochází k problémům při následném kontaktu s vodou v průběhu jejich životnosti, naopak přítomnost vody bývá ve většině případů kýžená, neboť ta totiž dopomáhá tvorbě veškerých hydratačních produktů, které jsou nositeli většiny fyzikálně-mechanických vlastností vyrobených kompozitů. Hydraulická pojiva potřebují na rozdíl od vzdušných pojiv specifitější podmínky

během svého zrání, které může trvat i několik (desítek) let. Mezi hydraulická pojiva patří běžně vyráběné portlandské, hlinitanové cementy, či např. hydraulické vápno.

1.1.1.1 PORTLANDSKÝ CEMENT (OPC)

Cement je hlavním zástupcem hydraulických pojiv, který se vyrábí z několika základních složek a v několika variantách. V té nejběžnější a ve světě nejvíce zastoupené variantě se jedná o cement obsahující jemně mletý portlandský slínek a korekční složky.

Portlandský cement se vyrábí výpalem vstupních surovin, které cementu dodávají několik základních složek. Mezi ně patří např. oxid vápenatý (CaO - C), oxid křemičitý (SiO_2 - S), oxid hlinitý (Al_2O_3 - A), či oxid železitý (Fe_2O_3 - F). Tyto oxidy mají přesně definované zastoupení a rozmezí, ve kterém musí být ve vyráběném slínku zastoupeny. Zároveň je sledován obsah dalších sloučenin, mezi které patří například alkálie, či sloučeniny obsahující oxidy hořčíku. Ty nesmí překročit jisté limity, protože by mohlo docházet k degradaci či jiným změnám (objemovým) během životnosti konstrukce. Většina složek cementu je zcela přírodních. Jedná se o vápence, křídly, jíly, kyzy, které se těží většinou/zpravidla v nedalekém okolí cementáren.

Portlandský slínek se vyrábí v rotačních pecích za teplot vyšších než $1200\text{ }^\circ\text{C}$, aby byla překročena teplota tavení, jelikož dnešní portlandské cementy obsahují významné množství slínkových minerálů, které mohou vzniknout pouze v tavenině. Zchlazený portlandský slínek je následně rozemlet a míchán s korekčními složkami, mezi které patří moderátor tuhnutí (síran vápenatý v některé z forem – CaSO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ atd.) či intenzifikátor mletí.

Výsledným produktem je portlandský cement, který sestává z kombinace čtyř základních, výše uvedených oxidů. Tyto oxidy během výrobního procesu výpalu především díky správnému dávkování a přesnému nastavení výrobního procesu přechází do čtyř základních sloučenin, které se nazývají slínkové minerály:

- | | | |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| • Tri-kalcium silikát | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S |
| • Di-kalcium silikát | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S |
| • Tri-kalcium aluminát | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| • Tetra-kalcium alumino ferrit | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Pro výše uvedené slínkové minerály existují také vžitě názvy: C_3S – alit, C_2S – belit, C_4AF – Brownmillerit [1; 2].

Negativním dopadem produkce portlandského slínku v dnešní době je velmi vysoká produkce CO₂ do ovzduší při jeho výrobě. Na jednu tunu vyrobeného portlandského slínku připadne 0,6 – 1,0 tuny CO₂ vypuštěného do ovzduší [3; 4].

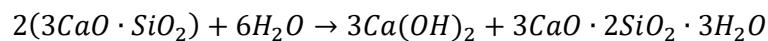
1.1.1.2 HYDRATACE SLÍNKOVÝCH MINERÁLŮ

Hydratace jednotlivých slínkových minerálů probíhá odlišně a výsledné produkty hydratačního procesu mají odlišné pevnostní charakteristiky, ale například také chemickou odolnost.

Tri-kalcium silikát 3 CaO · SiO₂ (C₃S)

Tento slínkový minerál hydratuje za přebytku vody, za vzniku hydroxidu vápenatého Ca(OH)₂ – portlanditu a některé z fází minerálu s chemickým vzorcem C₃S₂H_x. V případě, že reakce probíhá bez přebytku vody, reakce neproběhne zcela, ale vzniká nejčastěji sloučenina C₂SH₄. Výslednými produkty hydratace je tedy nejčastěji Ca(OH)₂ – portlandit, C₅S₆H₅ – tobermorit, či C₃S₂H₃ - afwillit. Hydratační produkty alitu jsou základními a hlavními nositeli pevnostních charakteristik portlandského cementu [1; 2].

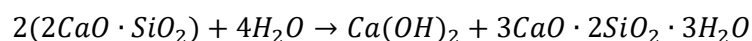
Základní hydratační rovnice tedy vypadá následovně:



Di-kalcium silikát 2 CaO · SiO₂ (C₂S)

Podobně jako alit rovněž belit hydratuje za přebytku vody na C₃S₂H_x. Za nedostatku vody vzniká opět nejčastěji sloučenina C₂SH₄. Celkový průběh chemických reakcí a tvorby finálních produktů je v porovnání s reakcí alitu pomalejší. Zároveň během hydratace belitu dochází k výrazně nižší produkci Ca(OH)₂. Díky pomalejší chemické reakci dochází také k nárůstu fyzikálně-mechanických parametrů pozvolnější tendencí, než v případě hydratace alitu. Hydratační produkty belitu jsou vedle hydratačních produktů alitu také hlavními nositeli, především dlouhodobých pevností portlandského cementu [1; 2].

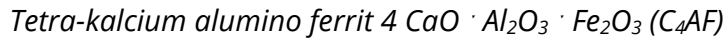
Základní hydratační rovnice tedy vypadá následovně:



Tri-kalcium aluminát 3 CaO · Al₂O₃ (C₃A)

Tento slínkový minerál reaguje nejrychleji ze zmíněných slínkových minerálů. Při teplotách do 21 °C reaguje za tvorby C₂AH_{5..9} a za teplot vyšších než 21 °C tvoří C₃AH₆, který se v nasycené vodní páře transformuje na C₃AH_{12...14}, jež vykazuje zvýšenou chemickou odolnost proti roztokům síranů. Fyzikálně-mechanické

parametry jsou přibližně desetinové oproti C_3S , či C_2S . V portlandském cementu reaguje s přítomným sádrovcem za tvorby primárního ettringitu, který vznikne ještě v plastické fázi hydratačního procesu cementu, a tudíž i objemové změny k nimž dochází při jeho tvorbě [1; 2].



Brownmillerit reaguje pomaleji než tri-kalcium aluminát a reakce je zásadně zpomalena přítomností sádry. Hydratací vzniká podobně jako v případě hydratace C_3A , minerál C_3AH_6 , ale také amorfni fáze CFH_x . Ta se v nasycené vodní páře rozpadá až na $Ca(OH)_2$. Objem jednotlivých sloučenin je velice podobný objemu cementu a vody, díky tomuto nedochází k přílišnému pnutí v matrici a drobné objemové změny jsou v rámci směsi kompenzovány bez vzniku zásadního poškození matrice. Brownmillerit dosahuje nižších fyzikálně-mechanických parametrů než tri-kalcium aluminát [1; 2].

1.1.2 SUBSTITUCE PORTLANDSKÉHO SLÍNKU – PŘÍMĚSI

Portlandský slínek, jakožto hlavní složka portlandského cementu je zároveň složkou, která je nejvíce ekologicky a ekonomicky zatěžující složkou cementových kompozitů, malt a betonů. Jedná se o materiál, který je primárně vyráběn za tímto účelem a nejedná se o odpad z výroby, či druhotnou surovinu. Výroba tohoto materiálu je velmi energeticky náročná a zároveň se díky dekarbonizaci vápence jedná o proces, při kterém vzniká velké množství oxidu uhličitého. Na 1000 kg vyrobeného portlandského slínku dochází k produkci cca 600 - 1000 kg oxidu uhličitého.

Z tohoto důvodu se využívají různé substituenty portlandského slínku. Na tomto principu jsou postaveny směsné cementy. Cement portlandský nese označení CEM I, cementy obsahující pouze jisté procentuální zastoupení portlandského slínku jsou značeny jako CEM II – CEM V.

1.1.2.1 LATENTNĚ HYDRAULICKÉ MATERIÁLY

Jedná se většinou o uměle vyrobené materiály, které po smíchání s vodou netuhnou ani netvrdnou a nenabývají podstatných fyzikálně-mechanických parametrů. Po smíchání s $Ca(OH)_2$ však tuhnou a tvrdnou i pod vodou, podobně jako portlandský slínek a nabývají vlastnosti podobné cementu. Jedná se tedy

o materiály, které potřebují pro projevení vlastností, aktivátor. Tyto materiály se využívají běžně ve směsných cementech, ve kterých slouží pro snížení ekonomické náročnosti, zároveň pro snížení ekologické stopy, dále pro snížení rychlosti vývinu hydratačního tepla při betonáži velkých konstrukcí a v neposlední řadě také pro zvýšení chemické odolnosti výsledného betonu díky vyvázání přebytečného Ca(OH)_2 , které vzniká při hydrataci C_3S a C_2S a v betonu jinak zůstává v relativně reaktivní, nezměněné formě.

Nejznámějším zástupcem latentně hydraulických materiálů je vysokopecní struska.

1.1.2 PUCOLÁNY

Jedná se o materiály přírodního nebo umělého původu. Tyto materiály nevykazují hydraulické ani latentně hydraulické vlastnosti. Mezi zástupce přírodní patří vulkanické tufy, trasy, či například perlit. Mezi nejznámější zástupce uměle vytvořených pucolánů patří vysokopecní popílek, či fluidní popílek. Podmínkou vysoké reaktivity a využitelnosti pucolánů je vysoký podíl amorfni, reaktivní fáze SiO_2 . Krystalické fáze SiO_2 reagují pouze velmi sporadicky. Betony a malty připravené s obsahem pucolánů vykazují velmi pozvolný růst fyzikálně-mechanických parametrů v čase. Zároveň však tento růst, na rozdíl od portlandského slínku neustává, ale pokračuje v delším časovém horizontu a výrazně převyšuje hodnoty čistého portlandského slínku. Pucolánů, podobně jako latentně hydraulických materiálů, se využívá do betonů a malt s požadavkem na nižší vývin hydratačního tepla, dále pro zvýšení chemické odolnosti, odolnosti vůči působení chloridů, či pro zvýšení vodo-nepropustnosti.

1.1.3 DRUHOTNÉ SUROVINY

Jedná se o suroviny, jež nejsou primárně vyráběny s konkrétním účelem použití. Velmi často se jedná o materiály, které byly dříve považovány za odpad a bylo s nimi také takto nakládáno, případně byly využívány primárně jako výplňové či zásypové materiály. V moderním světě je kladen stále větší důraz na recyklaci, omezení skládkování, hledání znovu-využitelnosti odpadů a snižování uhlíkové stopy společnosti.

Druhotnou surovinou se tak stává jakýkoliv odpad, pro který bylo nalezeno jeho znovu-využití v některém z průmyslového odvětví, či v některé z výrob produktů nebo materiálů. Pokud se některý z odpadů, resp. druhotných surovin osvědčí natolik, že je jeho produkce kýžená, může docházet k bližší selekci, nebo přímo k primární výrobě těchto materiálů za účelem využití například ve stavebních materiálech.

Mezi druhotné suroviny, které jsou v dnešní době využívány při výrobě cementových kompozitů, patří například elektrárenský popílek z vysokoteplotního a fluidního spalování, slévárenská struska, dále například srážená mikrosilika, odpadní obalové sklo, vápenec, odpadní čedič z výroby prvků z litého čediče, odpadní jemnozrnný perlitový prach a celá řada dalších materiálů, pro které bylo nalezeno druhotné využití. Celá řada těchto materiálů dosahuje určitých pucolánových vlastností, jelikož obsahují v jisté míře amorfni SiO_2 , což je předurčuje k možnosti jejich užití v silikátových kompozitech [5; 6; 7; 8; 9; 10; 11].

1.1.4 DALŠÍ VYBRANÉ DRUHY CEMENTŮ

Kromě běžně využívaného portlandského cementu, který lze dále modifikovat příměsemi (z nichž jsou některé uvedeny výše) a využívají se především pro snížení ekologické zátěže produkce portlandského slínku, pro snížení rychlosti vývinu hydratačního tepla, resp. pro zvýšení některých užitných vlastností portlandského slínku, se dále využívají cementy, které mají odlišné mineralogické složení a také zcela odlišné výviny pevnostních charakteristik, případně zcela odlišné odolnosti a charakteristiku trvanlivosti, než cementy obsahující portlandský slínek [9].

1.1.4.1 CSA CEMENT

Tento typ cementu vzniká výpalem vápenců (Ca), bauxitu (Al_2O_3) a sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) za vzniku CSA fází. Tento cement obsahuje především minerál Ye'elimit ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$), dále nízké procento C_3S , C_2S , C_3A a dalších slínkových minerálů vyskytujících se také v portlandském cementu. Mezi hlavní produkty hydratačního procesu patří ettringit ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strätlingit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) a monosulfát, vedle kterých vzniká také jisté množství CSH gelů díky obsahu bellitu. Při jeho hydratačním procesu dochází k velkému a rapidnímu vývinu hydratačního tepla během několika málo hodin po smíchání s vodou. Jedná se o relativně nový

materiál objevených v 50. letech minulého století. Při jeho výrobě dochází k výrazně nižší produkci CO₂ do ovzduší než v případě produkce portlandského slínku, od jeho většího používání však v dnešní době stále odrazuje vyšší výrobní a tržní cena, ale také velmi malé poznání hydratačního procesu tohoto druhu cementu, a též vyšší potřeba záměsové vody oproti portlandskému slínku (portlandský slínek w/c <0,34, CSA cement w/c = 0,64) [12; 13].

Vzhledem k produktům hydratačního procesu CSA cementu lze jeho složení využít pro regulaci objemových změn běžného portlandského cementu. Míchání těchto složek však nebylo zatím zcela zdokumentováno a zabývá se jím řada výzkumů. Při náhradě okolo 30 % OPC cementu CSA cementem dochází k expanzi až o 70 mm/m, což vede k destrukci kompozitu [14; 15].

1.1.4.2 HLINITANOVÝ CEMENT (CAC)

Tento cement se vyznačuje oproti portlandskému cementu, který se skládá především z kalcium-silikátových minerálů, mezi které patří C₃S, či C₂S, vysokým obsahem kalcium-aluminátových složek s vysokým zastoupením CaO-Al₂O₃ fází. Při výrobě těchto cementů se využívají, podobně jako při výrobě portlandského slínku, vápence. Zde se však využívá jejich kombinace například s bauxitem, resp. jinými horninami bohatými na hlinitany s nízkým obsahem SiO₂. Oproti portlandskému cementu dosahují velmi vysokých nárůstů pevností, velmi vysoké chemické odolnosti, především vůči síranům. Při vhodné volbě plniva pak také velice dobré teplotní odolnosti, což předpokládá jejich využití při výrobě žáruvzdorných kompozitů a konstrukcí [16].

Hlinitanové cementy mají dobu tuhnutí a tvrdnutí srovnatelnou s běžným portlandským cementem. Jakmile však začne hydratační proces probíhat, je několikanásobně rychlejší než v případě portlandského slínku, což vede k velkému nárůstu krátkodobých pevností. V případě, že dojde k hydrataci hlinitanových cementů za přítomnosti portlandského cementu, hydroxidu vápenatého, či sádry, dochází k jejich velmi rapidnímu tuhnutí a tvrdnutí. Využívají se proto například pro přípravu rychle-tuhnoucích malt a zálivek. Tyto materiály se vyznačují extrémním vývinem hydratačního tepla v raných fázích hydratace. To je provázáno také velkým zatížením konstrukce, díky teplotní délkové roztažnosti a rapidnímu vzrůstu teplot kompozitu [16; 17; 18].

Dalším využitím těchto cementů je v kombinaci s portlandským slínkem jejich přídavek do expanzních hmot jako příměs/přísada pro regulaci objemových změn. Při hydrataci běžného portlandského cementu dochází ke smrštění kompozitu během hydratace o cca 0,2-0,6 mm/m. V případě využití kombinace hlinitanového cementu a běžného portlandského cementu dochází k expanzním účinkům, které mohou přesáhnout i jednotky mm/m [17].

1.2 PŘÍSADY DO CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

Jedná se o chemické sloučeniny ovlivňující vlastnosti cementových kompozitů v čerstvém, či ztvrdlém stavu. Jedná se o deriváty kyselin, povrchově aktivní látky, směsi uhlovodíků, resp. jiné chemické sloučeniny, které jsou schopny ovlivňovat vlastnosti zrn cementu.

Přísady se využívají pro úpravu klíčových vlastností cementových kompozitů, mezi tyto patří například snížení množství záměsové vody při zachování zpracovatelnosti, úpravu rychlosti tuhnutí a tvrdnutí, zvýšení pevností, zvýšení trvanlivosti, provzdušnění, úpravu barevnosti, či např. úpravu objemových změn.

Přísady se vyskytují v pevném, či tekutém skupenství a reagují buď s povrchem zrn pojiva nebo reagují chemicky se zrny cementu a vstupují do hydratačního procesu slínkových minerálů.

Cílem použití přísad je produkce malt a betonů s lépe kontrolovatelnými vlastnostmi, vyššími užitnými vlastnostmi a snížení ekologických a ekonomických dopadů produkce stavebních hmot a možnost využití druhotných a odpadních materiálů do cementových kompozitů při zachování fyzikálně-mechanických vlastností. Před použitím každé přísady je nutno ověřit její vliv na fungování ostatních použitých přísad. Vlastnosti jednotlivých přísad se mohou navzájem ovlivňovat a způsobovat nečekané a nechtěné efekty [19].

1.2.1 TEKUTÉ PŘÍSADY

Mezi nejčastěji využívané tekuté přísady patří roztoky plastifikačních a superplastifikačních přísad, odpěňovací přísady, napěňující přísady, či přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu.

Tekuté přísady se hojně využívají při výrobě betonů in-situ, či v prefabekčních betonárnách díky jednoduchému dávkování se záměsovou vodou a rozmíchání ve směsi bez použití speciálního nářadí.

Vyráběné tekuté přísady jsou velmi často kombinací vícero přísad. Většina plastifikačních přísad způsobuje mírné, či zcela zásadní zvýšení objemu vzduchu v čerstvé směsi, a proto jsou tyto vyráběny již v kombinaci s určitým množstvím povrchově aktivních látek pro úpravu povrchového napětí a snížení pěnovosti [20].

1.2.2 REDISPERGOVATELNÉ PRÁŠKY

Ve velké míře se jako přísady využívají redispergovatelné prášky. Velké množství tekutých přísad v podstatě spočívá v rozpuštěném redispergovatelném prášku ve vhodném nosiči (nejčastěji voda). Oproti tekutým přísadám jsou redispergovatelné prášky hojně využívány výrobci suchých prefabrikovaných suchých omítkových a maltových směsí (SOMS).

Redispergovatelné přísady jsou koncentrované prášky obsahující většinou téměř 100 % sušiny funkční přísady. Díky tomuto je jejich dávkování výrazně nižší a také citlivější než v případě použití tekutých přísad. Oproti tekutým přísadám se však většinou nejedná o směsi přísad, je tedy nutno s tímto počítat a při použití například plastifikačních přísad je potřebné přidat do kompozice materiálu také odpěňovací přísady, jinak dojde ke zvýšení množství vzduchu v čerstvé směsi.

Oproti tekutým přísadám může také aktivace těchto práškových přísad při míchání trvat delší dobu, je proto potřeba důkladně provést homogenizaci suché směsi, ale také důkladné promíchání směsi při přípravě čerstvé malty či betonu. Velké procento redispergovatelných prášků je hygroskopických, je tedy nutno dbát zvláště striktních pravidel při skladování.

1.2.2.1 PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADY

Tyto přísady jsou využívány pro snížení množství záměsové vody v cementových kompozitech při zachování reologických vlastností (zpracovatelnosti v čerstvém stavu). Při mletí portlandského slínku dochází vlivem tření k tvorbě elektrostatických výbojů, které nabíjejí zrna cementu. Tyto náboje se alternují a následně během míchání se záměsovou vodou vedou ke shlukování cementových zrn, což výrazným způsobem zvyšuje spotřebu záměsové vody. Shluky cementu jsou

schopny efektivně zachytit mezi 10-30 hm.% záměsové vody, která by mohla být využita efektivněji pro smočení většího počtu zrn [21]. Základem fungování plastifikačních, či vodo-redukujících přísad je řízená reakce těchto přísad s náboji na povrchu zrn cementu a jejich řízená úprava tak, aby namísto shlukování docházelo ke vzájemnému odpuzování jednotlivých zrn.

Moderní a v současné době nejvíce využívané plastifikační přísady jsou chemické sloučeniny na bázi kyseliny polykarboxylové (PCE). Tyto plastifikační přísady vznikly v 70. letech minulého století v Japonsku a řadí se mezi tzv. superplastifikační přísady se schopností snížit vodní součinitel o 30-40 hm.%. Jejich působení funguje na principu sterického odpuzování. Díky vědeckému pokroku existuje celá řada přísad tohoto typu s různými tvary molekul, různými počty a délkami postranních řetězců a různou schopností ztekucení a délkou působení tohoto ztekucení. Obecně platí, že čím jsou delší postranní řetězce a kratší hlavní řetězec, tím dochází k účinnějšímu ztekucení po delší dobu [22; 23]. Dnešní verze polykarboxylátů jsou schopny snížit vodní součinitel až k poměru 1:4 (voda:cement) [21]. Díky tomu dochází k výraznému zvýšení pevností výsledných kompozitů bez nutnosti zvýšení dávky pojiva, dále k výraznému snížení množství kapilár a ke zmenšení objemu pórové struktury v matrici, což vede také ke zvýšení chemické odolnosti a zvýšení trvanlivosti kompozitu. Díky relativně velké citlivosti dávkování a náchylnosti na předávkování vedoucím k bleedingu a jiným problémům, dochází v dnešní době ke kombinování jednotlivých plastifikačních přísad. Existuje tak řada produktů, které využívají kombinaci např. PCE a lignosulfonátů. Díky relativně vysoké provzdušňovací schopnosti PCE je nutno při použití suchých přísad zároveň využít odpěňovacích přísad. Při dávkování tekutých PCE je již v kompozici většinou odpěňovač přítomen, aby nedošlo k ovlivnění množství vzduchu v čerstvé směsi.

1.2.2.2 NAPĚŇOVACÍ PŘÍSADY

Tyto přísady se používají od 30. let 20. století pro zvýšení mrazuvzdornosti. Použitím přísady dochází k vytvoření mikrostruktury pórů uvnitř matrice kompozitu na základě změny povrchového napětí tekutých složek. Tyto póry, které mají průměr v rozmezí 20-300 μm slouží k přerušení kapilárního systému v matrici. Díky této vlastnosti dochází k výraznému zvýšení mrazuvzdornosti betonu, který je v případě zamrznutí vody v kapilárách namáhán vnitřním tahovým stresem, který může vést

až k destrukci konstrukce. Při použití těchto přísad dochází díky nahrazení části pevné matrice vzduchem ke snížení tahových, ale také tlakových pevností. V případě zatížení zmrazovacími cykly dochází u neprovzdušněného betonu k výraznému poklesu pevností, či k destrukci. U provzdušněného betonu dochází k téměř zanedbatelným změnám pevností a kompozit tohoto typu zatížení bezpečně odolává [24; 25].

1.2.2.3 ODPĚŇOVACÍ PŘÍSADY

Tyto přísady se využívají, aby odstranily napěňující efekty pojiv, příměsí, přísad a jiných složek, které se při formulaci stavebních hmot používají. Odpěňovací přísady se využívají ve značném množství odvětví pro úpravu povrchového napětí a snížení pěnivosti směsi. Jde o přísady, které jsou z podstaty velmi hydrofobní a jejich rozpustnost ve vodě je omezená. Při použití běžně dostupných odpěňovacích přísad nedochází k negativnímu ovlivnění fyzikálně-mechanických parametrů cementových kompozitů. Bylo však zjištěno, že při použití odpěňovacích přísad v kombinaci s vhodnou plastifikační přísadou na bázi PCE, dochází k prodloužení doby ztekucení [26]. Obecně pak platí, že směsi s vyšším obsahem vzduchu vykazují výrazně nižší tekutost než směsi s velmi malým obsahem vzduchu. Nicméně, standardně se odpěňovací přísady na betonárnách při výrobě běžného betonu, ani při výrobě SCC betonu nevyužívají, i když je tento efekt znám [27]. Díky tomu tedy dochází ke zvýšené tvorbě kaveren či hnízd kameniva. Ty jsou mimo jiné způsobeny také z důvodu vysokého povrchového napětí čerstvé směsi. V dnešní době nejčastěji využívané odpěňovače jsou na bázi minerálních olejů, silikonových olejů, silikonů, hydrofobních povrchově aktivních látek, emulgátorů, alkoholů, či organických sloučenin, případně kombinace výše uvedeného [28].

1.2.2.4 POLYMERNÍ PŘÍSADY

Polymerní přísady se využívají pro přípravu polymerních kompozitů a polymerem modifikovaných malt, betonů a kompozitů. Kompozity se skládají z pojiva (portlandského, či jiného cementu), plniva (kameniva), vody a polymerní složky. Výsledkem je propojení vazeb cementových a polymerních čímž dochází ke zvýšení užitných i trvanlivostních charakteristik kompozitu. PCC (Polymerem modifikovaný beton/kompozit) je označení vžitě pro kompozity obsahující méně než

5 hm.% polymerní složky. PPCC (Polymer portland cement concrete/composite) je označení vžitě pro kompozity obsahující více než 5 hm.% polymerní složky [29; 30].

Nejčastější důvod využití polymerních přísad pro přípravu PCC a PPCC malt je za účelem zvýšení trvanlivosti, mrazuvzdornosti, přídržnosti, resp. pro snížení modulu pružnosti u správkových a sanačních malt. První sympozium, které se zabývalo využitím polymerních složek v betonech a maltách se konalo v roce 1967 ve Francii [31].

Většina vyráběných PCC či PPCC jsou připravovány přidavkem polymerů ve formě latexů. Latexy jsou definovány jako disperze organických polymerních částic ve vodě. Polymerní částice využívané pro účely použití při přípravě PCC a PPCC dosahují střední velikosti částic $3,9 \cdot 10^{-6}$ – $78 \cdot 10^{-6}$ m. Většina latexů se vyrábí emulzní polymerizací ve vodním prostředí [32].

Mezi nejčastěji využívané polymerní přísady patří:

- Akrylát (PAE),
- styren-akrylát (SA),
 - o PAE a SA nejčastěji využívané polymery zejména pro přípravu polymer-cementových lepidel pro obkladové prvky, podlahové sanace, ETICS, štuky, a především pro přípravu materiálů pro opravy a sanace betonových konstrukcí [33; 34; 35].
- ethylen-vinyl-acetát (EVA),
- vinyl-acetát (VA),
 - o Produkty EVA a VA reakce s PC jsou částečně vodou-ředitelné, využívají se v méně náročném prostředí [36].
- butadien-styren (SB),
 - o Využití tohoto polymeru se hojně rozšířilo na přelomu 80. a 90. let 20. století. Využívá se především pro přípravu krycích vrstev mostů, nebo parkovišť pro osobní a nákladní dopravu pro snížení možnosti penetrace ve vodě rozpustných solí (chlorid sodný apod.) do konstrukce a tím proti urychlování její degradace. Tento typ polymeru zvyšuje přídržnost a soudržnost malt a zároveň zvyšuje odolnost proti působení tlakové vody [37; 38].
- vinyl-acetát ethylen (VAE),
- poly-vinyl-acetát (PVA),

- VAE a PVA se využívá především v některých omítkových směsích. Produkty reakce s PC jsou vodou-ředitelné, a tedy pro účely přípravy PCC nevhodné.
- a další.

1.2.2.5 URYCHLOVAČE TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí se využívají pro urychlení výstavby betonových konstrukcí a pro zvýšení možnosti výstavby také v zimních měsících. Dříve docházelo k nuceným přerušením výstavby právě z důvodu nízkých teplot a několik měsíců v roce tak probíhala odstávka výstavby nejen rodinných domů, ale také velkoobjemových konstrukcí. Případně bylo nutno konstrukce proteplovat atd. V dnešní době se využívají přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu. Tyto přísady fungují na principu reakce chemických sloučenin a složek v portlandském cementu. Některé reagují přímo se složkami cementu za vzniku novotvarů, jiné fungují na principu nukleačních ložisek, které slouží jako krystalizační zárodky pro následný růst krystalů minerálů v cementové matici.

Nejčastěji historicky využívané urychlovače byly na bázi chloridů, především chlorid vápenatý, který má velmi silný urychlující účinek a používá se již od roku 1873 [39]. V některých státech je využití chloridu vápenatého k dnešnímu dni zakázáno především z důvodu možného urychlování koroze ocelové výztuže v železobetonových konstrukcích. Některé urychlovače tuhnutí vedou k výraznému urychlení tuhnutí a tvrdnutí s výrazným vzrůstem pevností během několika málo hodin. Tento efekt může přetrvat, často však dochází ke snížení pevností po 28 dnech zrání v porovnání s referenční směsí.

1.3 BETONY A MALTY

Mezi betony a malty se řadí materiály, kompozity, které jsou tvořeny nejčastěji maticí plnivových složek spojených složkou pojivovou. Tyto, po smíchání nejčastěji s vodou, vytváří tvárnou a plastickou hmotu, která je schopna zaplnit definovaný prostor a jeho tvar. Po zreagování, či zatvrdnutí, vytváří kompaktní a pevný materiál s nezanedbatelnými pevnostními charakteristikami.

Mezi použitá pojiva patří hydraulická pojiva, vzdušná pojiva, dále například alkalicky aktivovaná pojiva či pojiva polymerní (epoxydy apod.). Použitá pojiva, resp.

jejich kombinace udávají základní vlastnosti výsledné matrice, mezi které patří základní předpoklad pevnostních charakteristik a dále především chemická odolnost, teplotní odolnost či trvanlivost.

Pojiva zároveň udávají z velké části především ohybové pevnostní charakteristiky výsledného kompozitu. Pevnost v tlaku kompozitů lze do jisté míry zvýšit právě použitým plnivem, v případě pevností v tahu za ohybu lze toto provést použitým plnivem omezeně (např. tvarovým indexem). Obecně lze vlastnosti kompozitů ovlivnit úpravou křivky zrnitosti, tvarovým indexem použitého plniva, či například použitím ostrohranného, či hladkého povrchu zrn plniva.

Základním rozdílem mezi betony a maltami je v maximální velikosti použitého zrna plniva. Standardně jsou kompozity se zrnitostí <4 mm označovány jako malty a kompozity o maximální velikosti zrna >4 mm jsou označovány jako betony.

1.4 PLNIVA

Plnivo zajišťuje jeden ze základních nosných prvků v matrici betonů, malt a kompozitů. Pojivové složky zajišťují přenos síly na další složky matrice, mezi které patří právě plniva. Pojivové složky mají často dobré mechanické vlastnosti, ale například portlandský cement a následně vznikající cementový kámen, má vcelku dobré fyzikálně-mechanické vlastnosti, avšak zároveň relativně velké smrštění a např. nízkou chemickou odolnost. V případě pojiv čistě polymerních, jsou nejčastějším nositelem ohybových pevností právě pojiva, kdežto odolnost proti tlaku je u těchto pojiv nižší. Plnivové složky jsou také několikanásobně méně ekonomicky náročné než pojiva, z tohoto důvodu jsou esenciální při vývoji a návrhu jakýchkoliv stavebních hmot a v současné době se využívá jako plnivo také celá řada recyklovaných, druhotných a odpadních surovin pro snížení ekologického dopadu produkce stavebních hmot.

Z výše uvedených důvodů se proto využívá ideální poměr pojiva a plniva, při kterém dochází k propojení celé matrice a k přenosu především tlakových sil z pojiva na plnivovou složku.

Cementový kámen dosahuje pevností v tlaku po 28 dnech zrání v průměru $40-70 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, kdežto některé druhy kameniv mohou dosahovat pevností v tlaku mnohonásobně vyšších. Viz Tab. 1.

Tab. 1 Pevnost v tlaku vybraných kameniv [40; 41; 42]

Druh kamene	Pevnost v tlaku [N·mm⁻²]
Čedič	150-200
Diorit	90-150
Granit	90-120
Vápenec	40-90
Pískovec	55-110
Břidlice	70-200
Mramor	80-140
Korund	150-3000
Cementový kámen	40-70

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že každé kamenivo je vhodnější pro použití v jiném betonu, maltě, kompozitu. Pro bližší srovnání je nutné vždy zohlednit také např. modul pružnosti, odolnost proti obrusu, teplotní délkovou roztažnost nebo chemickou odolnost.

Plniva lze rozdělit na kamenivo a následně fillery, či mikroplniva. Kamenivem se rozumí, dle ČSN EN 1260, plnivo o velikosti zrn větší, než 0,063 mm [43].

Kamenivo zaujímá v betonových konstrukcích až 80 % objemu. Z toho vyplývá, že kamenivo, jeho obsah a typ má zásadní vliv na vlastnosti celého kompozitu. Kamenivo dodává konstrukcím především pevnost v tlaku, odolnost proti obrusu, či chemickou odolnost. V případě, že je zohledněn významným způsobem tvarový index, může kamenivo dodávat konstrukcím i jisté vyšší ohybové pevnosti, s těmito však standardně nelze při návrhu počítat.

Kamenivo plní kromě funkcí spojených s již vyztuženým kompozitem také funkci během hydratace cementového kamene, kdy zabraňuje nadměrnému smršťování cementového kamene během hydratačního procesu. Během hydratačního procesu dochází ke smrštění cementového kamene o řádově 0,4-1,0 %. To odpovídá objemové délkové změně 4-10 mm/m. Díky kamenivu lze toto smrštění snížit například až na cca 0,1-0,15 %, což odpovídá 1-1,5 mm/m a díky přidavku vodoredukujících superplastifikačních přísad (PCE) lze objemové změny snížit v kombinaci s kamenivem až na 0,05 %, což odpovídá délkové změně 0,5 mm/m [44].

Kamenivo využívané v betonech a maltách se rozděluje dle velikosti částic na frakce. Standardně je považováno kamenivo o velikosti větší než 4 mm za hrubé kamenivo, to tvoří hlavní kostru betonů. Kamenivo menší než 4 mm je považováno za kamenivo jemné, toto se využívá standardně v maltách a zálivkách.

Kamenivo lze také rozdělit do kategorií dle jejich vzniku. Mezi ty nejzákladnější patří kamenivo přírodní a umělé.

1.4.1 PŘÍRODNÍ PLNIVA

Kamenivo lze těžit z přírodních zdrojů, mezi které patří nejčastěji lomy kameniva, odkud se těží většina drcených kameniv. Jedná se o ostrohranná kameniva, která vznikla odstřelem lomové stěny, následně drcením. Toto kamenivo je vhodné pro podsypy komunikací, pro základní vyrovnání konstrukcí, či do standardních betonů například pro betonové, resp. železobetonové základové konstrukce. Druhou možností je získávání kameniva těženého, sedimentárního. To lze získat z vyschlých pískových nalezišť, písčinych dun, nebo například z řek a moří. Toto kamenivo má výrazně nižší tvarový index kameniva, jedná se tak o kamenivo hladší a vhodnější například do zálivek, pytlovaných směsí, sanačních malt a podobně.

Po celém světě neustále vzrůstá poptávka po kamenivu do betonových konstrukcí. Především se jedná o požadavky na kvalitní zdroje, kterých však v přírodě /jako neobnovitelných zdrojů/ ubývá. Neustále se sice hledají a otevírají nová naleziště, avšak rapidně jich ubývá. Z těchto důvodů dochází k devastaci říčních toků, plenění přímořských oblastí s nalezišti kvalitního písku a začínají se využívat také kameniva lehká, pórovitá a kameniva s nízkými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, jejichž použití by bylo v minulých letech nemyslitelné.

1.4.2 UMĚLÁ PLNIVA

Umělá kameniva se standardně vyrábějí tepelnou, či jinou úpravou přírodních surovin, příp. vznikají jako vedlejší produkt průmyslové výroby. Lze je rozdělit do několika základních skupin:

- přírodní materiály, jako je např. perlit, vermikulit, jííl, břidlice,
- průmyslové produkty, jako je např. sklo,
- vedlejší produkty z výroby, mezi které patří například vysokoteplotní popílek, fluidní popílek, struska apod.

Umělá kameniva se využívají díky svým vlastnostem nejčastěji k přípravě lehkých/lehčených betonů a malt. Historicky se využívaly také přírodní lehká kameniva ve formě například pemzy. Největší výhodou umělých lehčených kameniv je jejich nízká objemová hmotnost, vysoká porozita a dobré tepelně-izolační vlastnosti. Objemová hmotnost lehkých umělých kameniv se pohybuje mezi 50-1000 kg·m⁻³ [45].

Lehká kameniva lze využít v moderních materiálech například pro přípravu sanačních omítek, kdy je využita vlastnost umělého napěněného kameniva, jeho vysoké porozity a velmi vysokého měrného povrchu, k odstranění minerálů ze zdiva. Některá kameniva se využívají pro vnitřní ošetřování betonových konstrukcí díky vysoké nasákavosti, kdy je kamenivo nejprve nasyceno vodou a následně po přimíchání do betonové směsi dochází k postupnému uvolňování této vody do okolní cementové matrice a dochází k vyšší míře hydratace pojiva než za běžných podmínek.

1.4.3 MIKROPLNIVA/FILLERY

Mikroplniva či fillery jsou velmi jemná kameniva o velikosti zrn menší než 0,063 mm. Jedná se o za tímto účelem zpracovávané suroviny, příp. jde o různé odprašky. Ať už o odprašky např. z výroby cementu, různé výměty z prašníků, nebo odpad z broušení např. kamene či jiných materiálů.

Mezi mikroplniva se řadí kromě inertních materiálů, také pucolánové materiály, latentně hydraulické materiály a i jiné druhotné suroviny, které se využívají pro substituci např. portlandského cementu.

Tato část textu je věnována inertním mikroplnivům/fillerům. Mikroplniva slouží především pro úpravu reologických vlastností čerstvých betonů a malt a pro vyšší vyztužení křivky zrnitosti kameniva/plniva využívaného při jejich vývoji. V rámci návrhu složení plniva/kameniva v betonech a maltách je využíváno křivky zrnitosti. Mikroplniva jsou využívána pro vyztužení nejjemnějších frakcí matrice výsledného kompozitu, což vede k zajištění maximální hutnosti celé matrice a za ideálních podmínek také ke snížení požadovaného množství pojiva.

Mezi nejvíce využívaná mikroplniva patří například uhličitán vápenatý, resp. mikromletý vápenec. Ten se vyrábí přímo za tímto účelem nejčastěji mletím. Mikromletý vápenec obsahuje velké množství delších zrn, které dodávají stavebním materiálům jedinečné reologické vlastnosti.

Mezi nejpoužívanější mikroplniva patří:

- mikromletý vápenec,
- metakaolin,
- kaolín,
- sklářské odprašky,

- perlitový prach,
- mikrosilika,
- zeolit,
- kamenný prach a jiné [46].

1.5 CEMENTOVÉ A POLYMER-CEMENTOVÉ KOMPOZITY

Cementové a polymer-cementové kompozity jsou standardně jemnozrnné materiály, jejichž maximální velikost zrna kameniva je <4 mm. Jejich složení se odvíjí od typu použití.

Polymer-cementové kompozity obsahují částečnou náhradu, či adici k cementovému pojivu ve formě polymerního pojiva. Výsledné kompozity tedy kombinují vlastnosti cementových a polymerních vazeb. Polymerní vazby zvyšují hutnost struktury a zvyšují některé fyzikálně-mechanické parametry cementového kamene, především přídržnost/soudržnost s podkladem a také odolnost proti pronikání vody, včetně tlakové vody, do konstrukce. Zároveň zvyšují difuzní odpor konstrukce, dochází také ke snížení možnosti pronikání např. CO₂ do konstrukce. Nejčastěji se využívá polymerních přísad ve formě redispersovatelných prášků, díky čemuž je možno připravovat 1komponentní směsi, které se přímo na stavbě smíchají s vodou.

Předpokládá se, že po smíchání cementu a polymerního pojiva ve vodě dochází k vytvoření cementové kaše obsahující polymerní částice. Během hydratačního procesu následně dochází k hydrataci zrn cementu a tyto k sobě během vstřebávání záměsové vody připevňují velmi silnou vazbou polymerní film. Na konci hydratačního procesu se tak vedle sebe vyskytuje cementový kámen velmi silně propojen s polymerními částicemi, ty následně obklopují zrna kameniva a tvoří velmi hutnou strukturu polymer-cementového kompozitu viz Obr. 1 [47].

a) Smíchání se záměšovou vodou



Nezhydratované zrno cementu



Polymerní částice



Zrno plniva

b) Na počátku hydratačního procesu



Volný prostor (záměšová voda)



Částečně zhydratovaná zrna cementu a polymerní částice

c) V průběhu hydratačního procesu



Směs cementového mléka a částečně zhydratovaného cementu obaleného polymerními částicemi

d) Ztvrdlý polymer-cementový kompozit



Zhydratovaná zrna cementu (cementový kámen) propojen s polymerními řetězci



Volný prostor (vzduchový pór)

Obr. 1 Proces hydratačního procesu za přítomnosti polymerních částic [47; 48; 49; 50]

Mezi cementové a polymer-cementové kompozity patří například:

- lepidla,
- sanační malty,
- zálivky,
- stěrky,
- omítky,
- injektážní malty,
- samonivelační stěrky,
- potěry,
- hydroizolační 2komponentní nátěry/stěrky,
- antikoroziční nátěry,
- ochranné vrstvy konstrukcí.

Cementové kompozity jsou navrhovány nejčastěji jako směs portlandského, či portlandského směsného cementu, vhodného plniva (kameniva), případně mikroplniva, příměsí, přísad, případně vláken, pigmentů a dalších surovin.

Množství, typ, jemnost, kvalita a čistota surovin je volena vždy dle požadavků na výsledné vlastnosti kompozitu. Mezi jedny z nejzákladnějších sledovaných vlastností výše uvedených kompozitů patří:

- pevnost v tlaku (ČSN EN 12190),
- pevnost v tahu za ohybu (ČSN EN 1015-11),
- statický/dynamický modul pružnosti (ČSN EN 13412),
- přídržnost/soudržnost k podkladu (ČSN EN 1542),
- doba zpracovatelnosti,
- maximální aplikační tloušťka v jednom kroku,
- vodotěsnost (ČSN 73 1321),
- mrazuvzdornost (ČSN 73 1322),
- odolnost proti působení CHRL (ČSN 73 1326),
- a další.

Výše uvedené vlastnosti a jejich definice dle platných předpisů a norem jsou základním předpokladem pro úspěšný vývoj materiálu/kompozitu.

V případě návrhu jednotlivých kompozitů je nutno dbát, kromě materiálových vlastností vyvíjeného materiálu, také na vlastnosti kompozitů, na které budou tyto materiály následně aplikovány. Ve výsledku je nutná součinnost celé konstrukce a není možno například aplikovat velmi tvrdou stěrku s vysokým modulem pružnosti na původní konstrukci s modulem pružnosti nízkým. Došlo by tak ke změně součinnosti jednotlivých vrstev konstrukce a k jejich rozdílnému zatěžování změnami teplot, vlhkostí, zatížením od vlastní konstrukce atd., což by mělo za následek rozdílná pnutí na souvrství těchto materiálů a při nejmenším by vedlo ke snížení životnosti konstrukce, či například k delaminaci těchto vrstev a v kritických případech až např. ke zřícení konstrukce.

Při návrhu kompozitů je tedy nutno brát v potaz veškeré okrajové podmínky jako jsou podmínky prostředí, druh a stav podkladní konstrukce, zohlednit požadavky na povrch (jemnost), na vlastnosti materiálu (faktor difuzního odporu) a dále všechny situace, do kterých se může vybraný materiál během své návrhové životnosti dostat (chemické zatížení, vlhkostní zatížení, působení rozpuštěných minerálů, obrus).

1.5.1 SLOŽENÍ CEMENTOVÝCH A POLYMER-CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

Při vývoji cementových a polymer-cementových kompozitů je tedy důležité provést návrh účelu použití, popis prostředí, do kterého je materiál navrhován a jeho plánovanou potřebnou životnost. Následně, po provedení tohoto základního návrhu, je nutno přistoupit k zajištění základních vstupních materiálů, ze kterých se cementové a polymer-cementové kompozity skládají.

Při návrhu cementových a polymer-cementových kompozitů jsou nejčastěji využívány velmi kvalitní vstupní suroviny. Jedná se především o portlandský cement, který je následně výrobcem kompozitu upravován vhodnou dávkou příměsí, jež jsou schopny ovlivnit specifické vlastnosti hmoty. Ať už se jedná o zvýšení dlouhodobých pevností, zvýšení odolnosti např. vůči pronikání tlakové vody, či zvýšení chemické odolnosti, nebo příměsí které ovlivňují reologické vlastnosti čerstvé směsi. Případně je využíván, zejména s ohledem na ekologické a ekonomické zatížení produkce stavebních hmot, cement portlandský směsný, či další směsné cementy.

Tato pojiva jsou následně vhodně kombinována s plnivovými složkami. Nejčastěji se jedná o tříděná, těžená, praná a sušená kameniva vysoké kvality. Dodávaná kameniva jsou důležitá pro zachování vždy stejných, požadovaných vlastností produkovaných materiálů. Kamenivo/plnivo je v daném kompozitu velmi často zastoupeno v několika velmi úzkých frakcích, kdy v rozsahu 0-4 mm je možno využít i 6-8 různých frakcí pro složení kýžené křivky zrnitosti, která je pro daný druh vyvíjeného kompozitu nejvhodnější. Plnivovými složkami lze také do velké míry ovlivňovat například moduly pružnosti, odolnost proti obrusu a chemickou odolnost výsledného kompozitu.

Následně jsou do kompozitu přidávány některé zušlechťující složky, upravující specifické vlastnosti výsledného kompozitu. Jedná se především o přísady, příměsí, vlákna, polymery a další.

Návrh cementových a polymer-cementových kompozitů je nejčastěji návrhem hmot, které budou vyráběny a distribuovány jako 1komponentní pytlovaná směs. Není tedy možno využít, na rozdíl od výroby konvenčních betonů, přísad tekutých, které mohou být již vhodně zkombinovány s jinými chemickými složkami pro odstranění některých nedostatků dostupných přísad, a proto je nutno tyto případné nedostatky vhodným způsobem řešit. Pro přípravu těchto hmot se tedy využívají

přísady ve formě redispergovatelných prášků (RDP). Jedná se především o plastifikační přísady, odpěňovací přísady, napěňující přísady, či polymerní přísady.

V dnešní době nelze téměř na trhu nalézt suchou pytlovanou směs cementového či polymer-cementových kompozitu, který by neobsahoval v nějaké formě plastifikační, super-plastifikační, či jinou vodo-redukující přísadu. Tyto lze vhodně kombinovat, a kromě snížení vodního součinitele (snížení množství potřebné záměsové vody) a zvýšení užitečných vlastností vyráběné směsi je možné těmito přísadami také vhodně kontrolovat dobu zpracovatelnosti. Lze tedy využít přísad, které mají velmi silný vodo-redukující účinek po krátkou dobu, či naopak využít přísad s nízkým, ale dlouho trvajícím plastifikačním účinkem, nebo jejich kombinací. Při návrhu směsí s plastifikačními přísadami se využívají také odpěňovače. Veškeré plastifikační přísady, které se v dnešní době používají, upravují jistým způsobem povrchové napětí záměsové vody a dochází ke zvýšení množství vzduchu v čerstvé maltě. V případě použití tekutých plastifikačních přísad, už tyto přísady jistou formu odpěňovací přísady obsahují. Práškové přísady jsou však velmi často ze 100 hm.% účinná látka, a proto je potřeba ji s vhodným odpěňovačem zkombinovat. Odpěňovače upravují povrchové napětí záměsové vody a snižují množství vzduchových pórů, které by mohly vzniknout při míchání směsi.

Mezi další velmi často používanou složku kompozitů patří vlákna. Nejčastěji jsou využívány PE, či PP vlákna. Tato jsou využívána především pro redukci poruch ve hmotě v důsledku objemových změn, k nimž dochází během hydratačního procesu cementových kompozitů. Tato vlákna mají velmi malý průměr a zároveň nízký modul pružnosti a nízkou pevnost v tahu. Jsou však schopna překlenout v matrici tuhnutí kompozitu drobné změny v napětí, ke kterým dochází vlivem tvorby hydratačních produktů, kdy kompozit ještě nemá dostatečnou pevnost v tahu, aby tyto změny v napětí kompenzoval, a tudíž by mohlo docházet ke vzniku mikrotrhlin, které by následně mohly vést ke snížení trvanlivosti celé konstrukce. Dalším využitím vláken (PE) je jejich záměrné použití v kompozitech u kterých hrozí degradace vlivem vysoké teploty a nárazového ohřívání nad teploty 100 °C. Tohoto je využíváno například v torkretech při aplikaci na ostění tunelů, kdy při vzniku požáru dojde k vytavení těchto vláken a ke vzniku nuceného kapilárního systému v matrici, který zajistí odchod vody v konstrukci (ve formě páry) a nedochází tak při

nárazovém přehřátí konstrukce k přeměně volné vody v konstrukci na páru a následné odprýskání povrchových vrstev konstrukce.

Jednou z dalších důležitých složek, které se do směsí přidávají, jsou polymerní přísady. Dávkování polymerních redispergovatelných prášků může být podobně jako například u přísad do betonu v jednotkách desetin procenta až po desítky procent z celkové hmotnosti kompozitu. Na trhu existuje celá řada druhů a typů RDP polymerů a každý typ přináší do výsledné hmoty jiné vlastnosti. Některé typy výrazným způsobem snižují modul pružnosti, jiné zvyšují přídržnost, jiné zase otevřený čas (zpracovatelnost) či například tvrdost povrchu. Polymerní přísady se využívají ve většině sanačních malt a lepidlech pro zvýšení přídržnosti a kompatibility s podkladními vrstvami konstrukce, které mohou vykazovat různé fyzikálně-mechanické parametry.

1.5.2 CEMENTOVÁ LEPIDLA

Mezi klasická cementová lepidla pro lepení nasákavých, či nenasákavých obkladů, se řadí polymer-cementové kompozity, které se většinou skládají z relativně malého množství surovin. Mezi některé základní suroviny patří například:

- cement,
- (vápenný hydrát),
- písek 0-2 mm,
- křemenná moučka,
- (vápenec),
- přísady (plastifikační přísada, odpěňovací přísada, methyl-celulóza, akryláty apod.),

Pro ověření vlastností stavebních lepidel je využito zkušebních postupů popsaných v technické normě ČSN EN 12004-1, ve které jsou popsány požadavky, posuzování a ověřování stálosti vlastností, klasifikace a označování výrobků. A k této normě také příslušná norma ČSN EN 12004-2, popisující zkušební metody pro stavební lepidla.

Cementová lepidla se posuzují na specifické parametry, které jsou zcela odlišné od většiny standardních zkoušek jiných cementových stavebních materiálů. Mezi požadavky na cementová lepidla pro lepení keramických obkladových prvků patří:

- stanovení otevřené doby (EN 12004-2),
 - o počáteční tahová přídržnost (EN 12004-2),
 - o tahová přídržnost po ponoření do vody (EN 12004-2),
 - o tahová přídržnost po tepelném stárnutí (EN 12004-2),
 - o tahová přídržnost po cyklech zmrazení rozmrazení (EN 12004-2),
- stanovení skluzu (EN 12004-2),
- stanovení tahové přídržnosti (EN 12004-2),
- stanovení příčné deformace (EN 12004-2).

Cementová lepidla se dle ČSN EN 12004-1 rozdělují do více než 40 tříd. Tyto jsou v případě cementových lepidel specifikovány kombinací následujících vlastností:

- standardní lepidlo (1),
- zlepšené lepidlo (2),
- rychle tvrdnoucí lepidlo (F),
- lepidlo se sníženým skluzem (T),
- lepidlo s prodlouženou otevřenou dobou (E),
- deformovatelné (flexibilní) lepidlo (S1),
- vysoce deformovatelné (vysoce flexibilní) lepidlo (S2).

Všechna cementová lepidla jsou označována písmenem C. Cementové lepidlo pro lepení keramických prvků může být tedy označeno například jako „Cementové lepidlo C2FTS1“, to znamená, že se jedná o zlepšené, rychle tvrdnoucí, deformovatelné (flexibilní) cementové lepidlo se sníženým skluzem.

V případě cementových lepidel neexistují požadavky na pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, objemovou hmotnost, odolnost proti abrazi, chemickou odolnost apod. Návrh je tedy do jisté míry jednoduššího charakteru.

1.5.3 SANAČNÍ MALTY

Dalšími materiály, které se řadí mezi jemnozrnné cementové a polymer-cementové kompozity jsou sanační malty, které splňují specifikace podle harmonizované technické normy ČSN EN 1504. Dle ČSN EN 1504-1 jsou rozděleny a specifikovány výrobky především pro sanaci, ochranu a opravu betonových konstrukcí. Mezi ně patří např. výrobky a systémy pro:

- injektáž,

- opravy bez statické funkce,
- opravy se statickou funkcí,
- ochranu výztuže,
- povrchovou ochranu,
- kotvení [51].

Výrobky a systémy pro ochranu a sanaci betonových konstrukcí posuzované dle ČSN EN 1504-1 – ČSN EN 1504-10 jsou zkoušeny pro zcela odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti než cementová a polymer-cementová lepidla. V rámci této práce je řešen návrh hmot splňujících parametry kromě ČSN EN 12004-1 a také požadavky dle ČSN EN 1504-3 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce. V rámci této normy jsou specifikovány následující vyžadované sledované parametry, mezi které patří:

- pevnost v tlaku (EN 12190),
- pevnost v tahu za ohybu (EN 1015-11)
- obsah chloridových iontů (EN 1015-17),
- soudržnost (EN 1542),
- vázané smršťování/rozpínání (EN 12617-4),
- trvanlivost – odolnost proti karbonataci (EN 13295),
- modul pružnosti (EN 13412) [52].

Tyto parametry jsou dále specifikovány podle jednotlivých tříd použití. Třídy jsou označeny R1 – R4 dle hodnot, kterých materiály nabývají. Třídy R1 a R2 jsou považovány za výrobky bez statické funkce a třídy R3 a R4 za výrobky se statickou funkcí. Některé základní ověřované parametry a nabývané hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2 Požadavky na funkční vlastnosti výrobků pro opravy se statickou funkcí a bez statické funkce [52]

Položka č.	Funkční vlastnost	Referenční podklad (EN 1766)	Zkušební metoda	Požadavek			
				Se statickou funkcí		Bez statické funkce	
				Třída R4	Třída R3	Třída R2	Třída R1
1	Pevnost v tlaku	Žádný	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Obsah chloridových iontů	Žádný	EN 1015-17	≤ 0,05 %		≤ 0,05 %	
3	Soudržnost	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
4	Vázané smršťování/rozpínání ^{b,c}	MC(0,40)	EN 12617-4	Soudržnost po zkoušce ^{d,e}			Žádný požadavek
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
5	Odolnost proti karbonataci ^f	Žádný	EN 13295	$d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45))		Žádný požadavek ^g	
6	Modul pružnosti	Žádný	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Žádný požadavek	

^a Hodnota 0,8 MPa není požadována, pokud nastane kohezní porušení v materiálu pro opravy. Pokud nastane kohezní porušení je požadována minimální pevnost v tahu 0,5 MPa.

^b Není požadováno pro metodu opravy 3.3.

^c Není požadováno, pokud je prováděno teplotní cyklování.

^d Průměrná hodnota s jednotlivými hodnotami ne menšími než 75 % minimálního požadavku.

^e Maximální přípustná průměrná šířka trhliny ≤ 0,05 mm, s žádnou trhlinou ≥ 0,1 mm a bez delaminace.

^f Pro trvanlivost.

^g Není vhodný pro ochranu proti karbonataci, pokud systém pro opravy nezahrnuje systém povrchové ochrany, který prokazatelně chrání proti karbonataci (viz EN 1504-2).

1.5.4 NÁVRH CEMENTOVÝCH A POLYMER-CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

Ve výše uvedených odstavcích je popsáno, co je nutno při návrhu jemnozrnných cementových a polymer-cementových kompozitů zohlednit.

Při návrhu jemnozrnných kompozitů je vhodné při návrhu postupovat podobně jako v případě návrhu betonu. Lze tedy aplikovat standardní postupy, mezi které patří rovnice absolutních objemů, výpočet množství cementu, kameniva, příměsí, přísad, návrh křivky zrnitosti či návrh množství záměsové vody.

Specifické množství použitých polymerů při přípravě polymer-cementových kompozitů závisí na výsledném použití směsi. Standardní dávkování polymerních redispergovatelných prášků se pohybuje v dávce 5-25 hm.% vzhledem k dávce pojiva. Kromě několika málo specifických způsobů použití (lehčené omítky, napěněné směsi apod.), je nutno přidat do směsi odpěňovače, jelikož RDP podobně jako plastifikátory upravují povrchové napětí záměsové vody a dochází k uzavření vzduchových pórů do čerstvé směsi PCC.

Cementy typů I, II, III, IV, V portlandských cementů, hlinitanových cementů, či jejich kombinací lze využít při přípravě PCC v kombinaci s polymerními přísadami. Standardní dávka cementu na metr kubický je výrazně vyšší než v případě standardních betonů. Dávka cementu se zde pohybuje mezi 400–700 kg/m³ čerstvé směsi.

Kvalitní tříděné těžené kamenivo by mělo být vždy využito při přípravě 1komponentních pytlovaných PCC směsí pro zajištění dobré zpracovatelnosti. Pro zajištění vysoké kvality konstrukce by nikdy nemělo být využito kamenivo, které je větší než jedna třetina navrhované minimální tloušťky jedné nanášené vrstvy. Tento poměr lze v případě PCC z těžených kameniv možno lehce upravit, díky velmi nízkému indexu tvaru kameniva. Standardně je však uvažován u betonů, ve kterých se používají také ostrohranná, drcená kameniva.

Standardně využívaný vodní součinitel se v případě PCC pohybuje mezi 0,3 – 0,4. Což je v případě velmi jemného kameniva nutno zajistit použitím velmi vysoce vodo redukujících (super-plastifikačních) přísad.

V případě přípravy PCC jako nátěru lze zvýšit množství záměsové vody na vodní součinitel až 0,6. Nátěry standardně obsahují menší množství velmi jemného kameniva a větší množství použité polymerní příměsi.

V následujících tabulkách Tab. 3, Tab. 4 a Tab. 5 jsou uvedeny některé základní směrné receptury, které se využívají pro přípravu PCC směsí dle ACI COMMITTEE (American Concrete Institute committee).

Tab. 3 Směrná receptura pro tenkovrstvou PCC stěrku [53]

Název složky	Množství na 1 m ³
Portlandský cement	400 kg
Jemný tříděný písek	500-800 kg
Latex RDP	50 kg
Vodní součinitel (w/m_c)	0,25-0,40
Maximální obsah vzduchu	6,5 %

Tab. 4 Směrná receptura pro polymer-cementovou maltu [53]

Název složky	Množství na 1000 kg [kg]
Portlandský cement	300
Jemný tříděný písek	450-590
Latex RDP	30-60
Odpěňovač (poly-di-methyl siloxan)	0,06-0,30
Množství vody	75-120

Tab. 5 Směrná receptura pro polymer-cementový nátěr [53]

Název složky	Množství na 1000 kg [kg]
Portlandský cement	300
Jemný tříděný písek	0-300
Latex RDP	30-60
Odpěňovač (poly-di-methyl siloxan)	0,06-0,30
Množství vody	75-195

Po smíchání polymer-cementových směsí s vodou a přípravě čerstvé směsi se používají podobné zkoušky jako v případě zkoušek čerstvých betonů, či čerstvých malt, a to včetně stanovení konzistence sednutím, rozlitím, či stanovením pevnostních charakteristik po zatvrdnutí směsi.

1.6 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY CEMENTOVÝCH A POLYMER-CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

U všech materiálů dochází k jistým objemovým změnám. K těmto změnám dochází v důsledku několika faktorů. Nejznámější objemová změna je změna teplotní neboli teplotní délková roztažnost. Obecně platí, že při zvyšování okolní teploty dochází k rozpínání materiálů a při poklesu teploty dochází k jejich smrštění. Tato objemová změna je vratná. Aby nedošlo k ohrožení konstrukce z důvodu těchto změn, dochází k tvoření pohyblivých kloubových uložení, expanzních sekcí, zalomení apod., které umožňují konstrukcím přizpůsobovat se teplotním změnám.

Stavební materiály, mezi které patří například malty či betony na cementové bázi, či materiály na bázi termosetů (epoxidy, novolaky, PMMA, vinyl-estery a další), procházejí někdy významnými délkovými/objemovými změnami v průběhu jejich hydratace, zrání a chemického vytvrzování. Tyto změny mohou být až v řádech několika procent. Objemové změny, ať už jsou hydratační nebo k nim dochází důvodu změn teploty či vlhkosti, vytváří uvnitř materiálu pnutí. Aby k tomuto nedocházelo, je nutno tvořit dilatační celky. Maximální velikosti dilatačních celků, resp. doporučené velikosti dilatačních celků jsou popsány například v ČSN 73 1201: Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb. Standardní délka dilatačního celku se pohybuje od 3 do 24 metrů [54].

Hydratační objemové změny se týkají především materiálů cementových. Velikost hydratačních změn závisí na několika faktorech. Mezi ty nejdůležitější patří:

- typ použitého cementu (OPC I, II, III, IV, V, CSA, CAC, ACA),
- dávka cementu,

- množství záměsové vody,
- druh kameniva,
- množství kameniva,
- maximální velikost částic plniva.

Hydratační změny jsou velmi odlišné podle prostředí, ve kterém k hydratačnímu procesu a zrání cementových kompozitů dochází. Obecně platí, že se hydratační objemové změny skládají z teplotních objemových změn, autogenních (chemických) objemových změn a plastických objemových změn (plastické smrštění). Při výpočtu objemových změn lze tedy vytvořit následující rovnice.

$$\varepsilon_{\text{celkové}} = \varepsilon_{\text{teplotní}} + \varepsilon_{\text{autogenní}} + \varepsilon_{\text{plastické}}$$

Kde ε je poměrné délkové prodloužení.

1.6.1 TEPLTNÍ HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY

K teplotním objemovým změnám dochází během hydratace cementu nejen díky rozdílu teplot samotné čerstvé směsi a okolí, ale také díky vývinu hydratačního tepla, které je uvolňováno během chemických přeměn, k nimž dochází během hydratačního procesu cementu. V případě, že je konstrukce tepelně izolovaná od svého okolí nebo je rychlost nárůstu teploty vlivem uvolňování hydratačního tepla vyšší, než je přechod tohoto tepla do okolí, může docházet k hromadění tepla v konstrukci. K tomuto dochází v případě větších monolitických staveb, jako jsou například základy velkých budov, výstavba přehrad apod. Nárůst teploty konstrukce může zvýšit rozměry konstrukce, a to ve chvíli, kdy konstrukce ještě nemá dostatečnou vnitřní soudržnost a pevnost. Ve chvíli, kdy dojde následně ke zchladnutí konstrukce, dojde k vytvoření velkého množství mikrotrhlin, které snižují trvanlivost konstrukce. V případě masivních konstrukcí také dochází k teplotním výkyvům uprostřed a na okrajích konstrukce a k nevratným deformacím. Z tohoto důvodu se využívá cementů směsných s pomalejším vývinem hydratačního tepla, použití velmi studené záměsové vody či např. vnitřní ochlazování konstrukce pomocí potrubí s chladivem. Teplotní zatížení zatvrdlé konstrukce již provází změny vratné, je však nutno provádět dilatační celky tak, aby nedošlo vlivem teplotní délkové roztažnosti k poškození konstrukce.

1.6.2 AUTOGENNÍ A CHEMICKÉ HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY

Autogenní a chemické smrštění vzniká důsledkem úbytku vody vázané v objemu cementového kamene a také vlivem chemické reakce slínkových minerálů, kdy objem vznikajících novotvarů je odlišný od objemu vstupních složek. Autogenní a chemické smršťování je velmi často opomínáno a řešeno je především smrštění vlivem vysoušení čerstvé směsi (plastické). V některých případech však může být objemová změna v důsledku autogenního a chemického smrštění dostatečná, aby způsobila tvorbu trhlin v konstrukci. Především v dnešní době, kdy vznikají velmi vysoce hodnotné betony a malty s velmi nízkým vodním součinitelem a vysokou dávkou cementu, může tento problém nastat. Podobně také u velmi masivních konstrukcí.

Chemické smrštění jednotlivých hydratačních procesů slínkových minerálů lze spočítat díky známé hmotnosti a hustotě jednotlivých chemických sloučenin, které vstupují a vystupují z reakce hydratačního procesu [55]. Celkové chemické smrštění cementové pasty je součtem chemických objemových změn jednotlivých slínkových minerálů. Největší vliv na chemické smrštění má tedy zvolený typ cementu, jeho množství, vodní součinitel a použité přísady. V případě cementů obsahujících vysoké množství C_2S , nebo příměsí jako je granulovaná vysokopecní struska, vysokoteplotní popílek či vápenec, jsou projevy chemického smrštění nízké [56].

V případě, že konstrukce obsahuje velké množství cementu a velmi nízký vodní součinitel, nemá hmota dostatečné množství vody pro hydrataci. Pokud je taková konstrukce hydratována ve vodním uložení, může od svého okolí přijmout vodu potřebnou k hydrataci. Pokud k tomu však nedojde, dochází k odsátí veškeré vnitřní vody hydratujícím cementem, což vede k tvorbě mikropórů a mikrokapilár uvnitř struktury, které však vznikají za vysokého negativního tlaku, a ten následně vede ke smrštění konstrukce [56].

Autogenní smrštění je smrštění, jež vzniká v důsledku poklesu množství vnitřní vody v cementové pastě, která je spotřebována hydratačním procesem. Je obecně známý fakt, že v průběhu hydratačního procesu cementu dochází během několika týdnů a měsíců od počátku hydratace k poklesu vnitřní *vlhkosti* matrice díky spotřebovávání vody hydratačním procesem za vzniku hydratačních produktů [57]. K tomuto jevu dochází bez ovlivnění konstrukce vnějšími vlivy.

1.6.3 PLASTICKÉ HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY

Autogenní i plastické smrštění je smrštění vznikající poklesem množství vody v cementové matrici. Autogenní smrštění je způsobeno vlivem vnitřního spotřebování záměsové vody, plastické smrštění je způsobeno odchodem záměsové vody do okolí. Z tohoto tedy vyplývá, že plastické smrštění lze eliminovat vhodným kondicionáním, resp. vytvořením velmi hutné struktury, která vysychání konstrukce zabrání. V případě, že je materiál uchovávan ve vodním prostředí a je zabráněno odpařování vody, je autogenní smrštění cementové pasty takřka eliminováno. Z toho důvodu se v dnešní době využívají k eliminaci smrštění postřiky, například na principu vosků, které uzavřou povrch čerstvé směsi tenkou vrstvou nepropustného filmu a ten chrání konstrukci před prudkým odpařením. Případně se využívá jednodušších metod, a to například zakrytí čerstvé konstrukce nasáklou geotextilií. Plastické smrštění a rychlost vysoušení roste s teplotou konstrukce, teplotou a relativní vlhkostí okolí a rychlostí proudění vzduchu okolo konstrukce.

1.7 MODERACE HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚN

Objemové změny, jak již z výše uvedených odstavců vyplývá, lze ovlivňovat několika způsoby. Především se jedná o:

- typ cementu,
- dávka cementu,
- vodní součinitel,
- plastifikační přísady a jejich množství,
- typ a množství použitého kameniva,
- příměsí,
- přísady ovlivňující objemové změny – expanzní přísady.

Zároveň z výše uvedeného vyplývá, že pro snížení objemového smrštění lze využít i několik jiných kroků, mezi které patří například:

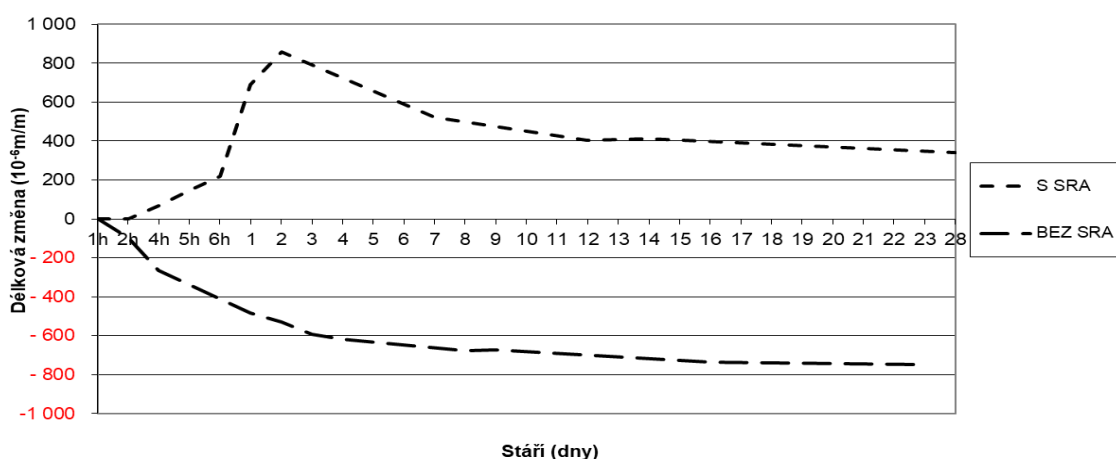
- použití cementů s pomalým vývojem hydratačního tepla,
- použití belitických cementů,
- použití vláken s nízkým modulem pružnosti (PE, PP)
- zvýšení vodního součinitele.

V případě, že je potřeba zachovat velmi nízký vodní součinitel, množství příměsí (včetně například vyšší dávky srážené mikrosiliky), dávku a typ cementu

a dochází k výraznému smrštění, či tvorbě trhlin, což je nežádoucí, lze přistoupit k přidavku složek, které toto eliminují. Jedná se především o použití přísad pro regulaci objemových změn, které zadržují vodu ve struktuře, či zabraňují její vypařování, nebo suroviny, které fungují v přítomnosti cementové pasty a slínkových minerálů expanzivně. Přísady používané pro redukci objemových změn se označují jako SRA – shrinkage reducing agent (admixture).

Základní myšlenkou použití expanzních přísad je zvětšení objemu původního prvku během prvotních fází hydratace. K tomuto zvětšení objemu může docházet fyzicky, či formou vnitřního pnutí – stlačení konstrukce. Následně vlivem chemického, plastického, autogenního smrštění dojde k relaxaci konstrukce na původní délkové rozměry a uvolnění vnitřního tlaku, resp. dojde pouze k malému smrštění, které se neprojevuje tvorbou trhlinek, či jiných deformací. V prvních fázích hydratačního procesu, kdy ještě konstrukce nedosahuje dostatečných tahových pevností, není schopna matrice tahové síly, které vznikají od smrštění, překlenout. V případě, že k objemovým změnám dochází až v zatvrdlém stavu, obecně problém nevzniká. Smysl SRA tedy přenáší problém ze strany tahového namáhání do namáhání tlakového, kterému čerstvý materiál odolá snáze a do oblasti tahové, se konstrukce dostane až v době, kdy jsou již tahové pevnosti konstrukce dostatečné.

Na následujícím Obr. 2 je patrný vývoj objemových změn vzorků betonu při použití SRA a bez použití SRA.



Obr. 2 Hydratační délkové změny v suchém prostředí bez přidavku a s přidavkem SRA

Na obrázku je patrné, že absolutní smrštění obou vzorků je téměř identické (500 a 700 μm). Vzorek s obsahem SRA však během prvního dne hydratačního procesu prošel expanzí a i po 28 dnech zrání je tato objemová změna pozitivní.

Mezi nejpoužívanější SRA patří například přísady upravující povrchové napětí:

- polyoxyalkylen alkyl,
 - o úprava povrchového napětí záměsové vody v pórech, snížení odparu a vnitřních tlaků ve struktuře,
- glykoly.

Dále přísady expanzivního charakteru, které reagují se složkami cementu. ACI (American Concrete Institute) rozděluje tento druh SRA do několika kategorií:

- typ K:
 - o kombinace portlandského cementu, Ye'elimitu ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$), CaSO_4 a CaO , např. CSA (Calcium sulfoaluminat),
 - o tvorba minerálů s vysokým objemem, který anuluje, či převyšuje objemové smrštění slínkových minerálů v OPC,
- typ M:
 - o kombinace OPC, hlinitanového cementu (CAC) a CaSO_4 ,
- typ S:
 - o portlandský cement s vysokým obsahem C_3A , který v raných fázích hydratace vytvoří velké množství ettringitu a dojde k expanzi směsi,
- typ G:
 - o Kombinace CaO a Al_2O_3 , které po kontaktu s vodou vytvoří $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [58; 59].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je studium polymer-cementových kompozitů především pro použití k sanaci, reprofilaci betonových konstrukcí a konstrukcí z prvků z hladkých nenasákavých obkladových prvků (keramika, litý čedič apod.). Zároveň se předpokládá, že uvedené polymer-cementové směsi mohou být použity pro lepení obkladových prvků. Dále je jedním z dílčích cílů ověření vlivu použití polymerních redispergovatelných prášků různého chemického složení na vlastnosti navrhovaných polymer-cementových kompozitů. Především je práce zaměřena na zkoumání jejich vlivu na lepicí schopnosti a přídržnosti k obkladovým prvkům. V rámci výzkumu jsou také ověřeny možnosti kompenzace/eliminace hydratačních objemových změn těchto směsí. Toto je dosaženo optimalizací receptury výsledného kompozitu, ale také využitím přísad pro redukci objemových změn.

Dosažení cíle práce je realizováno vývojem objemově kompenzovaného polymer-cementového kompozitu pro sanaci a reprofilaci betonových konstrukcí a reprofilaci prvků z taveného čediče při velmi vysoké substituci primárních pojiv a plniv druhotnými surovinami, s velmi vysokými užitnými vlastnostmi, mezi které patří vysoké pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, vysoká přídržnost k podkladu a k prvkům z taveného čediče, velmi nízké hydratační objemové změny a dobrá odolnost proti obrusu, včetně vědeckého zkoumání náležitých souvislostí.

3 METODIKA PRÁCE

V následujících podkapitolách je popsána a znázorněna metodika disertační práce. Metodika se vzhledem k rozsahu skládá z šesti na sebe navazujících etap. Posloupnost jednotlivých etap je znázorněna v diagramu na následujícím Obr. 3. Etapy jsou provázány a sestaveny takovým způsobem, aby na sebe navazovaly, navzájem se propojovaly a prohlubovaly nabyté informací z etap předchozích.

V rámci práce je ověřována možnost velmi vysoké náhrady primárních surovinových složek PCC směsí. Především se jedná o velmi vysokou substituci pojivové složky/cementu, při zachování velmi vysokých užitných vlastností směsí, dále se jedná o maximalizaci využití druhotných surovin jako plnivové složky v těchto směsích. Pro účely substituce pojivové složky, portlandského cementu CEM I 42,5 R Mokrý, je využito vysokoteplotního popílku, odpadního obalového skla, či

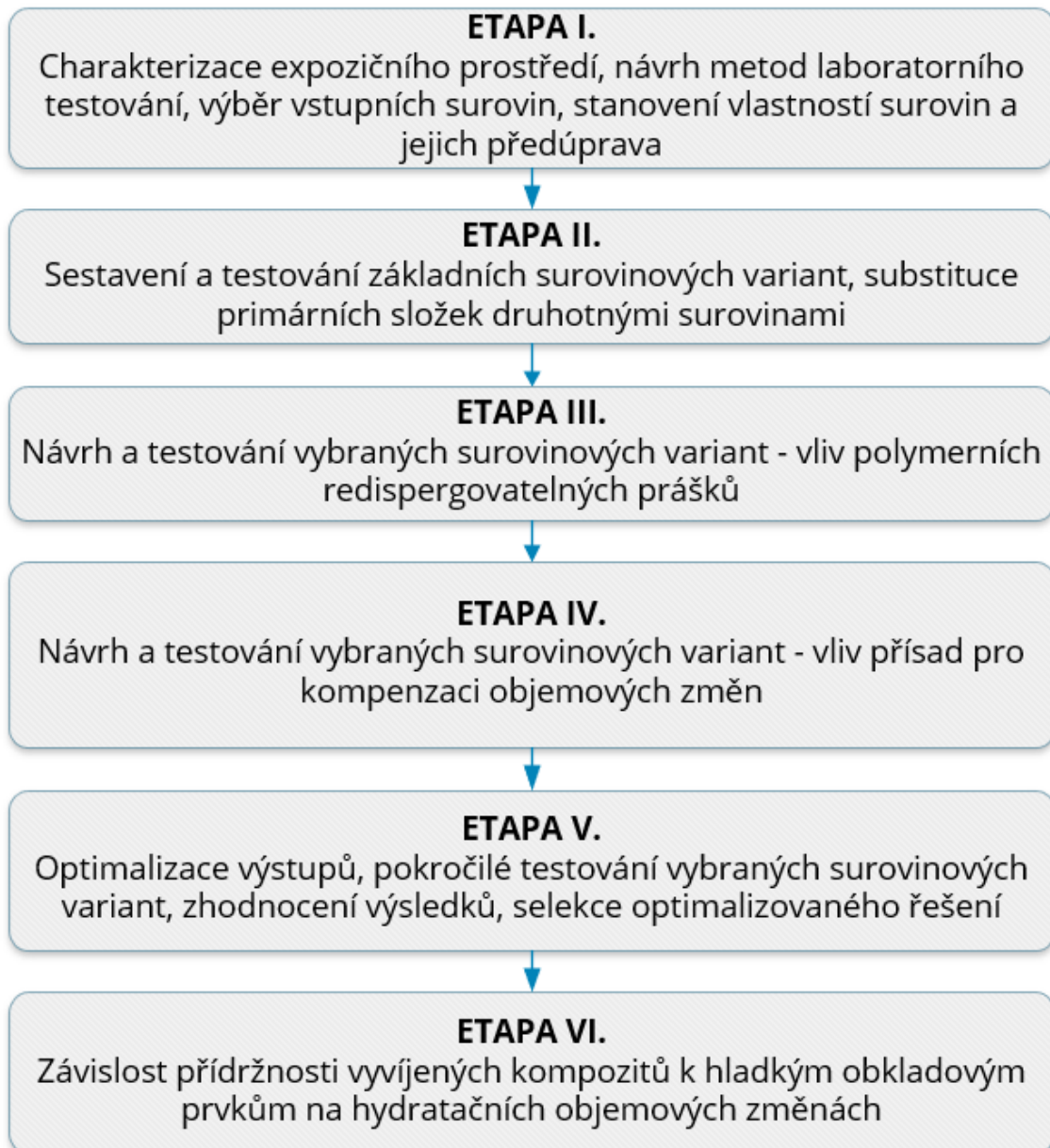
odpadního perlitu z výroby expandovaného perlitu. Pro substituci plnivové složky, tzn. stavebního písku Provodín, je využito odpadu z výroby obkladových prvků z taveného čediče, odpadního slévárenského písku či elektrárenské škváry.

Dále je ověřován vliv polymerních redispergovatelných prášků na bázi styren-akrylátu a kopolymeru ethylen vinylacetátu na vlastnosti vyvíjeného kompozitu. Především je dbán důraz na ověření vlivu těchto přísad na fyzikálně-mechanické vlastnosti, na průběh hydratace, vliv na mikrostrukturu kompozitu či vznik nových hydratačních produktů. Zároveň je kladen důraz na ověření přídržnosti kompozitů k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při zrání v různých prostředích a také na ověření vlivu hydratačních objemových změn na hodnoty přídržností.

V neposlední řadě je ověřován vliv přísad pro regulaci objemových změn silikátových kompozitů. Mezi testovanými je například neopentyl-glycol, CSA, CAC, či moderní přísada na bázi polyetheru. V rámci práce je sledován vliv typu a dávky přísad na hydratační objemové změny cementových a polymer-cementových kompozitů metodou kontinuálního hydrostatického vážení a pomocí trámečkové metody při uložení v různých prostředích, simulující vliv těchto přísad na objemové změny v reálných prostředích. Dále je sledován vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti, a to především na vývoj pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu v čase a dále také na hodnoty přídržnosti k obkladovým prvkům v několika prostředích uložení. Zároveň je provedeno ověření vlivu těchto přísad na hydratační proces cementových a polymer-cementových kompozitů a vliv na mikrostrukturu a vznik hydratačních produktů.

Výsledkem práce je suchá směs pro výrobu inovativního polymer-cementového kompozitu s vysokými užitnými vlastnostmi a relativně nízkou ekologickou stopou a ekonomickou zátěží pro výrobce i zákazníky.

Součástí práce je také ověření závislosti přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vyvíjených kompozitů na hydratačních objemových změnách, které jsou v rámci práce měřeny trámečkovou metodou během prvních 28 dní hydratačního procesu, či metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu.



Obr. 3 Seznam etap metodiky disertační práce

V následujících odstavcích je popsána detailní metodika řešení jednotlivých etap experimentální části práce.

3.1 ETAPA I. - CHARAKTERIZACE EXPOZIČNÍHO PROSTŘEDÍ, NÁVRH METOD LABORATORNÍHO TESTOVÁNÍ A VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN

První etapa disertační práce je poměrně rozsáhlá. Etapa je zaměřena na charakterizaci prostředí, kterému může být výsledný polymer-cementový kompozit vystaven. V rámci této části etapy jsou popsány mechanismy působení vybraných prostředí na cementový kompozit. Zároveň jsou popsány chemické procesy probíhající v reakci s cementovými kompozity pro vybrané degradační procesy, mezi které patří například degradace oxidem uhličitým či například degradace chemickým zatížením.

V rámci této etapy je proveden souhrnný návrh metod a laboratorních postupů pro stanovení materiálových vlastností a sledovaných parametrů surovin které budou v rámci této práce použity, a to z ohledu na primární, ale také druhotné suroviny, viz Obr. 4.

V rámci výběru surovin je prováděno testování základních materiálových vlastností, mezi které patří například objemová hmotnost, měrná hmotnost a nasákavost. Zároveň však jsou u jemných a jemně mletých surovin provedena stanovení měrných povrchů pomocí metody Blaine, případně pomocí BET analýzy. Současně jsou pro substituenty plnivové složky provedeny síťové rozbory, pro velikost částic <0,250 mm je provedeno také stanovení granulometrických křivek pomocí laserové granulometrie využívající přístroj MasterSizer 2000. V rámci práce jsou využity čtyři suroviny jakožto substituenti pojivové složky a tři substituenti složky plnivové. Jako substituce pojiva je testován odpadní perlit, vysokoteplotní popílek, obalové sklo a skelný odpad z výroby skelného rovingu [60]. Jako substituce plniva bude využita elektrárenské škvára, odpadní tavený čedič a slévárenský písek s obsahem vodního skla [61].

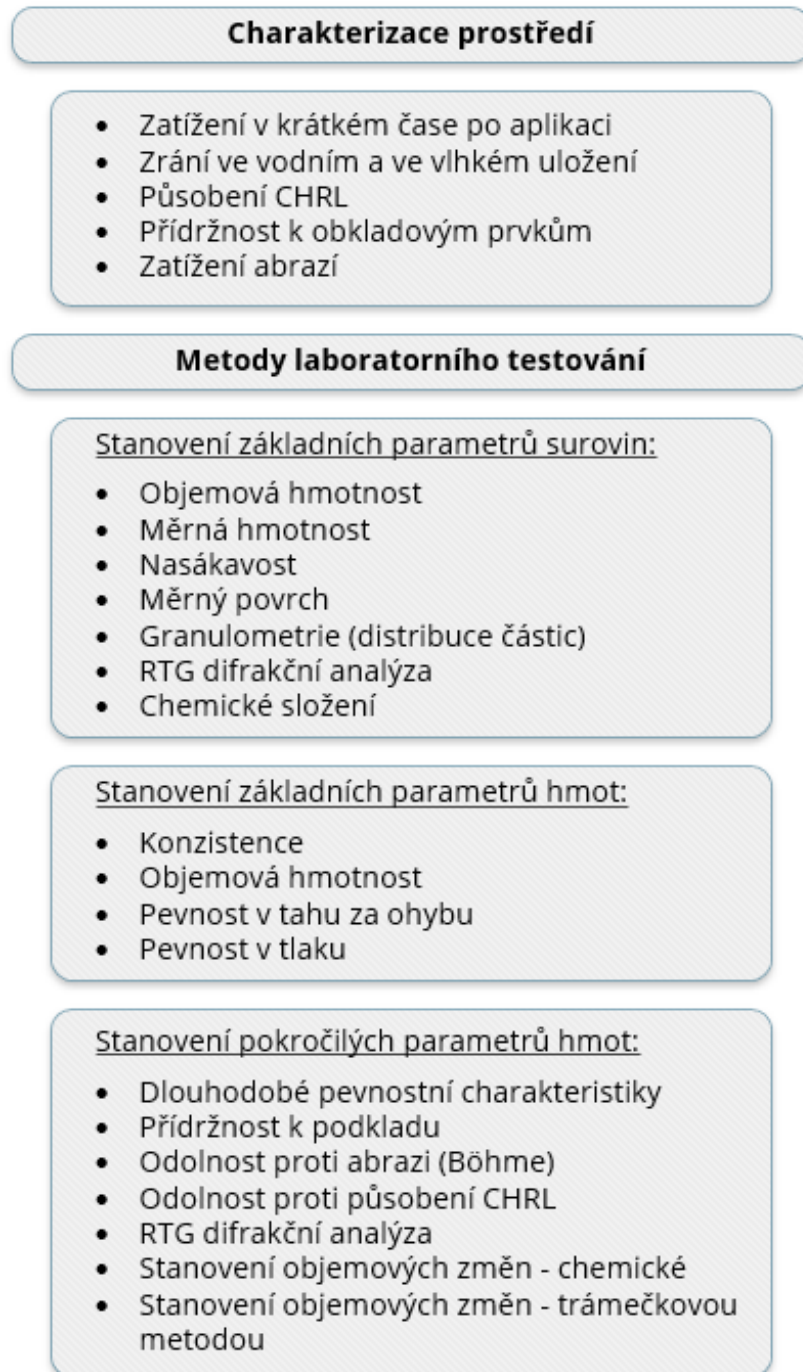
U všech používaných druhotných surovin je provedeno stanovení mineralogického složení pomocí RTG difrakční analýzy a stanovení chemického složení zadáním u externí společnosti. Dále jsou popsány laboratorní metody a zkoušky základních a pokročilých materiálových vlastností, které jsou testovány na vyrobených zkušebních vzorcích. S ohledem na co největší vědní přínos jsou testovány parametry, které nejsou normově, či jinými technologickými předpisy přisouzeny hmotě o konkrétním použití (sanační hmota, lepidlo, stěrka, zálivka

apod.). Mezi základní testované parametry patří stanovení konzistence, objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu, a dále stanovení pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku. Mezi pokročilé testované parametry patří sledování objemových změn, dlouhodobé pevnostní charakteristiky, přídržnost k podkladu a další, viz Obr. 4.

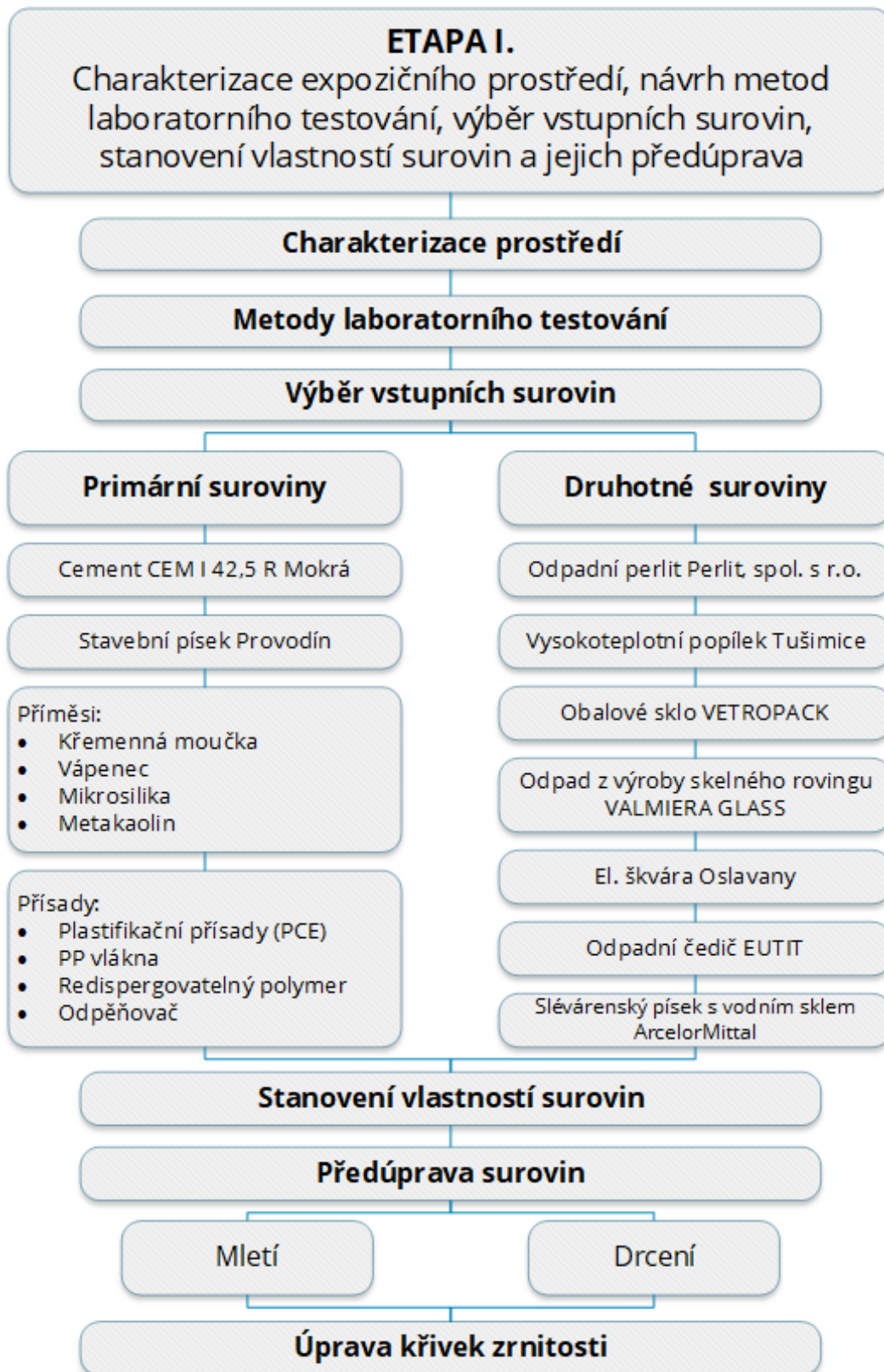
Všechny složky, které jsou používány v rámci výzkumu, budou pouze suchého charakteru, včetně plastifikačních přísad. Toto je dáno skutečností, že výstupem bude kompozit vhodný pro přípravu metodou výroby 1komponentních suchých směsí. Jako primární složky je použito portlandského cementu CEM I 42,5 R a tříděného, sušeného, stavebního písku Provodín. V rámci návrhu referenční směsi je využito příměsí pro zvýšení hutnosti kompozitu a pro zvýšení užitných vlastností směsi. Zároveň je využito plastifikační přísady na bázi kyseliny karboxylové. Z důvodu aplikace všech suchých složek je využito také odpěňovací přísady, jelikož na rozdíl od plastifikačních přísad tekutých, ty suché standardně neobsahují odpěňovací přísady a mohlo by vlivem míchání docházet k napěňování směsi a snižování jejích užitných vlastností. Zároveň se v rámci návrhu uvažuje s využitím redispergovatelných polymerních prášků.

V poslední části této etapy je provedena optimalizace druhotných surovin vhodnou předúpravou. Ta je realizována mletím pomocí kulového mlýnu, či drcením pomocí čelistového drtiče. Zároveň je zajištěna také optimalizace křivek zrnitosti substituentů pro dosažení co nejvyšší hutnosti vyvíjené směsi [62].

Schéma první etapy je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 4 Charakterizace prostředí a metody laboratorního testování surovin a zkušebních hmot



Obr. 5 Etapa I – Charakterizace expozičního prostředí, návrh metod laboratorního testování, výběr vstupních surovin, stanovení vlastností surovin a jejich předúprava

3.2 ETAPA II. - SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH VARIANT, SUBSTITUCE PRIMÁRNÍCH SLOŽEK DRUHOTNÝMI SUROVINAMI

Druhá etapa disertační práce řeší testování základních surovinových variant/receptur, které byly vytvořeny v etapě předchozí. Mezi základní sledované parametry patří stanovení konzistence a objemové hmotnosti v čerstvém stavu, dále stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu v ztvrdlém stavu. Vlastnosti byly testovány po 7, 28 a 90 dnech zrání ve vodním uložení.

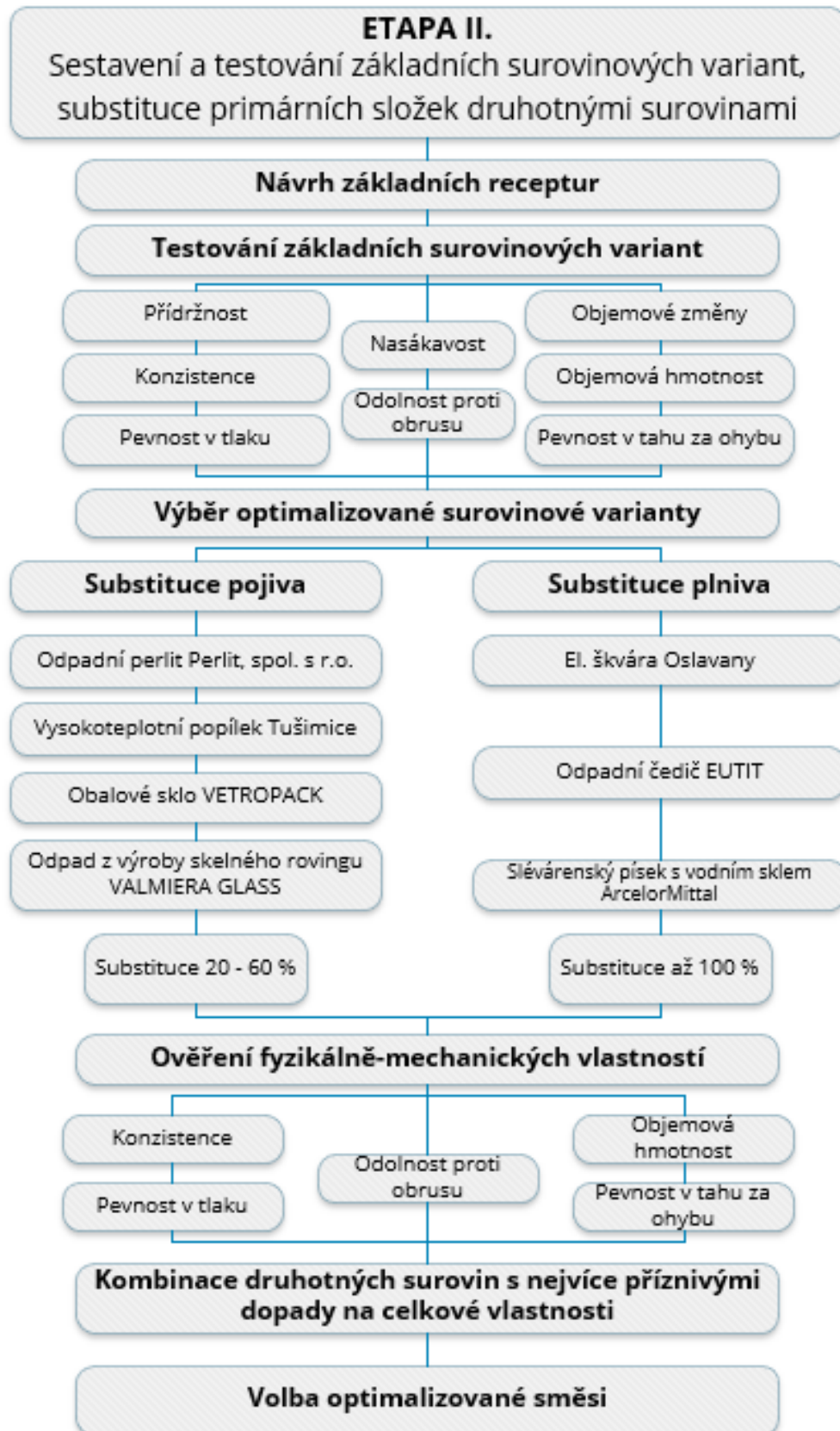
V další části této etapy je proveden výběr optimalizované varianty základní receptury. A je následně prováděna substituce pojivové složky druhotnými surovinami s náhradou 20-60 hm.% a také substituce složky plnivové, a to až do 100% náhrady druhotnou surovinou, či kombinací druhotných surovin.

Následně jsou ověřeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti těchto kompozitů, které jsou rozšířeny o stanovení odolnosti proti obrusu metodou Böhme a odolnosti proti CHRL.

Dále je provedeno vyhodnocení vlastností a parametrů navržených receptur obsahujících substituční složky a je provedena kombinace pojivových a plnivových složek s pozitivním dopadem na celkové vlastnosti hmoty. Zároveň je provedeno u reprezentativních vzorků stanovení RTG difrakční analýzy a vyhodnocení mineralogických změn, ke kterým dochází v případě použití těchto druhotných surovin.

Výstupem této etapy je optimalizovaná směs, vytvořená kombinací druhotných surovin, s velmi vysokými užitnými vlastnostmi.

Schéma etapy je znázorněno na Obr. 6.



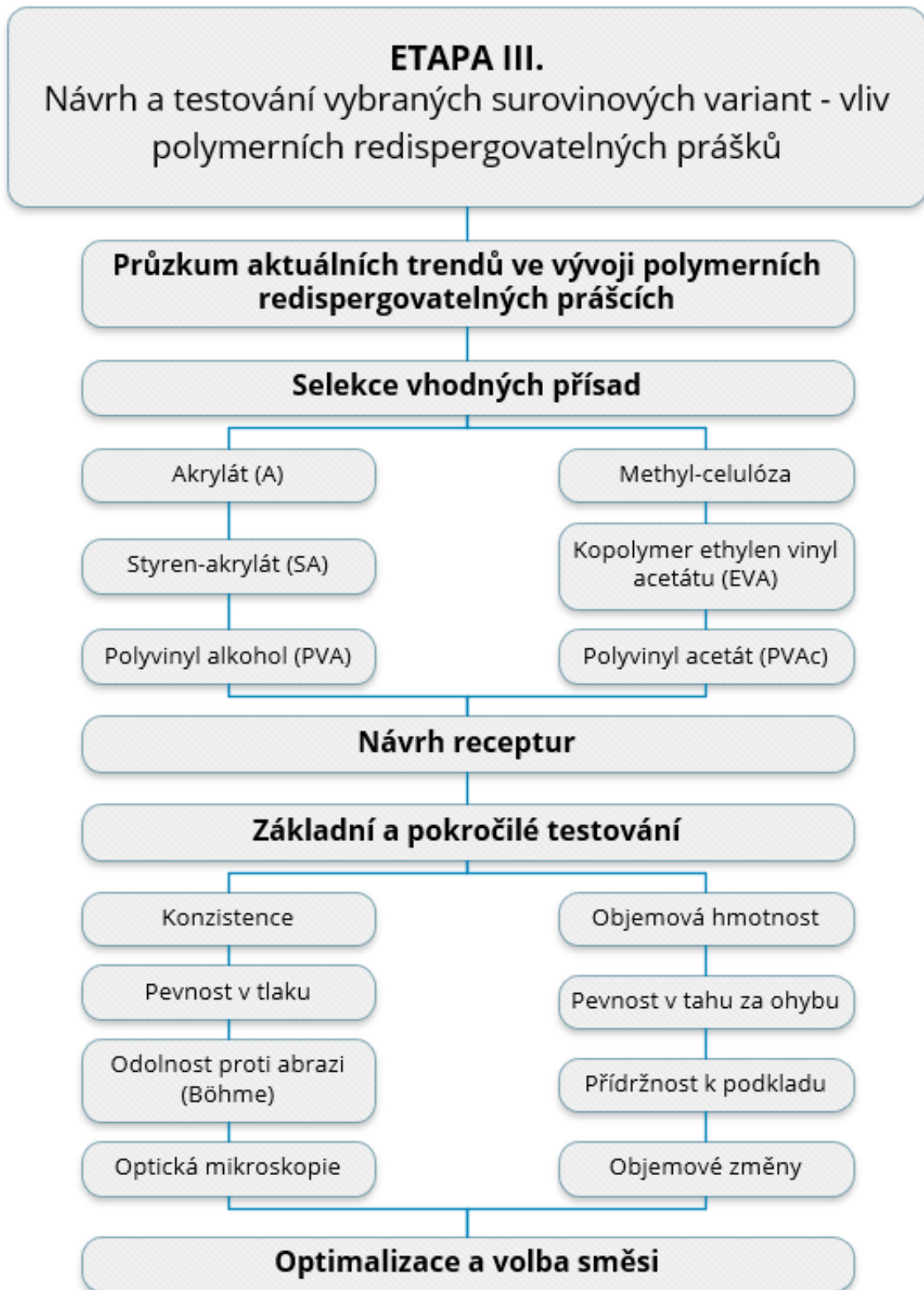
Obr. 6 ETAPA II. - Sestavení a testování základních surovinových variant, substituce primárních složek druhotnými surovinami

3.3 ETAPA III. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ

V rámci třetí etapy je řešeno studium vlivu moderních redispergovatelných polymerních prášků na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých polymer-cementových kompozitů. V první fázi etapy byl proveden průzkum aktuálního trhu a vývoje moderních polymerních přísad a následně proveden výběr několika vhodných kandidátů. Mezi testovanými polymerními redispergovatelnými prášky jsou zahrnuty například přísady na styren-akrylátové bázi, či na bázi kopolymeru ethylen vinyl acetátu. V rámci vývoje jsou využívány komerční prémiové produkty renomovaných výrobců určené především pro stavební lepidla či správkové sanační malty. Cílem je zajistit co nejvyšší přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

Ve druhé fázi této etapy bylo provedeno rozsáhlé testování typů a dávek polymerních přísad se snahou maximalizovat pozitivní vlastnosti přídavku přísad na vlastnosti čerstvých, ale také ztvrdlých polymer-cementových směsí. V rámci testování je kladen důraz především na vliv přísad na přídržnost kompozitu k podkladu, dále na odolnost proti abrazi, což bylo testováno metodou dle Böhme. Zároveň je v etapě ověřeno, zda některé z polymerních přísad nevykazují vliv na hydratační proces cementu a zda nedochází k tvorbě novotvarů, či ke zpomalení, nebo urychlení hydratačního procesu.

Výstupem této etapy je optimalizovaná směs, která je následně použita v etapě V. Schéma Etapy III. je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 ETAPA III. Návrh a testování vybraných surovinových variant - vliv polymerních redispergovatelných prášků

3.4 ETAPA IV. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV PŘÍRAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

V rámci čtvrté etapy byl proveden výběr a testování přísad pro kompenzaci objemových změn. V rámci návrhu je testováno několik druhů a způsobů kompenzace objemových změn. Mezi ně patří využití chemických sloučenin, které fungují jako povrchově aktivní látky a mají vliv na odvod záměsové vody kapilárním systémem cementového tmele, druhým typem přísad pro regulaci objemových změn, které byly využity, jsou látky polymerního charakteru. Všechny známé přísady regulující objemové změny mají vliv na chemické a autogenní smršťování silikátových kompozitů a hydratační proces cementu. Mezi testovanými přísady pro moderaci objemových změn jsou využity například neopentyl-glycol (2,2-dimethylpropane-1,3-diol), polyether, CSA cement, CAC cement a ACA cement. Nevýhodou současných přísad pro kompenzaci objemových změn je možnost zpomalení hydratačního procesu cementových a polymer-cementových kompozitů. Toto bylo v rámci této etapy také zkoumáno.

Ve druhé fázi této etapy bylo provedeno rozsáhlé základní, ale také pokročilé testování různých dávek a typů přísad redukujících objemové změny. V rámci testování je provedeno také stanovení přídržnosti k podkladu a vyhodnoceno, jak objemové změny tento parametr ovlivňují. Zároveň je provedeno ověření vlivu přísad na hydratační proces cementu a případný vliv na mikrostrukturu cementového tmele. Zároveň bylo v rámci etapy provedeno ekonomické a ekologické zhodnocení navržených hmot a použitých přísad. Výstupem této etapy je optimalizovaná směs, která je následně použita v etapě V. Schéma etapy IV. je znázorněno na Obr. 8.



Obr. 8 ETAPA IV. Návrh a testování vybraných surovinových variant - vliv přísad pro kompenzaci objemových změn

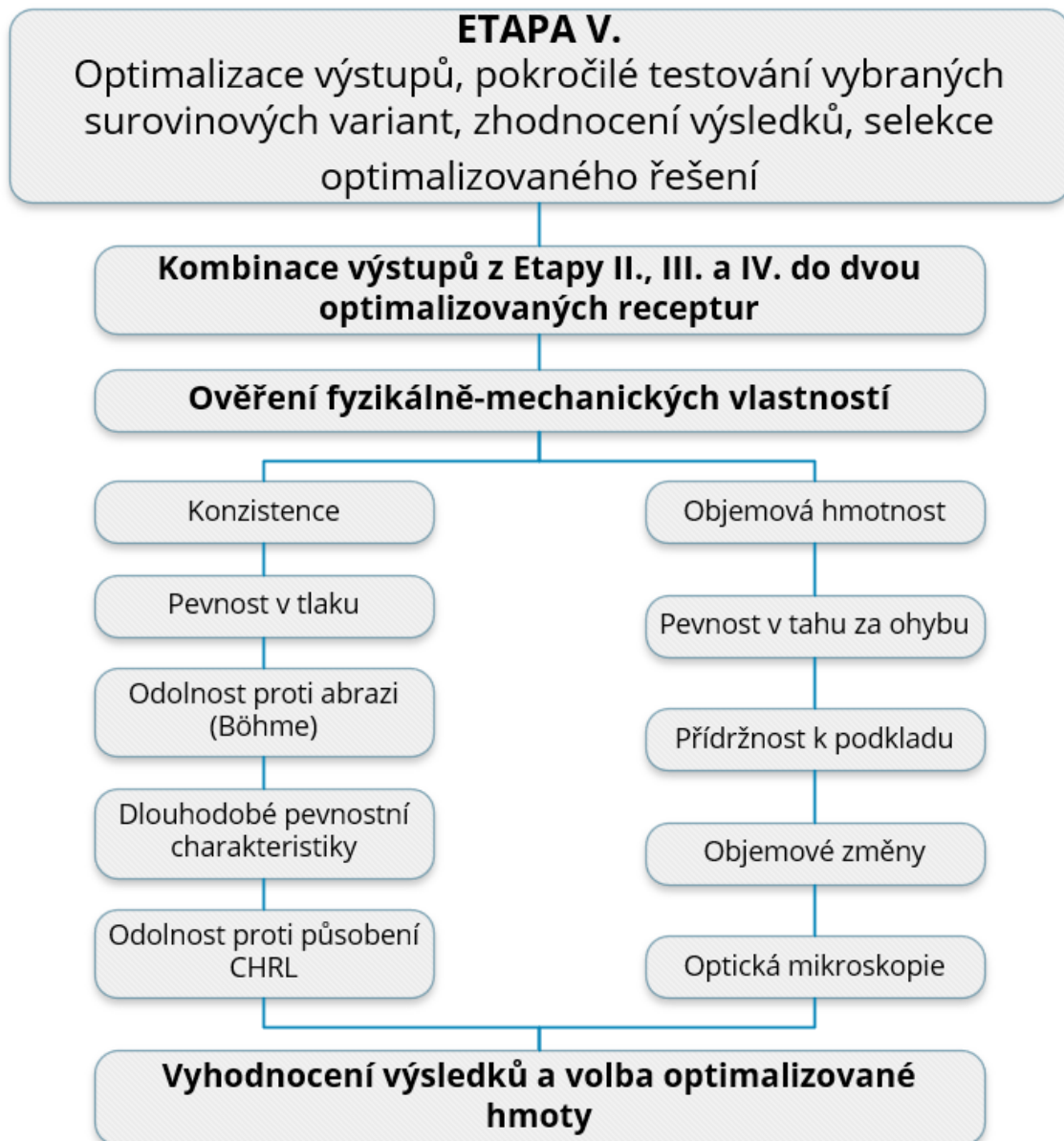
3.5 ETAPA V. - OPTIMALIZACE VÝSTUPŮ, POKROČILÉ TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT, ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, SELEKCE OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

V rámci páté etapy bylo provedeno zhodnocení informací nabytých v rámci výzkumu v předchozích etapách. Na základě získaných informací je provedeno sloučení výsledků z předchozích etap, které měly příznivý dopad na celkové vlastnosti hmoty. Je řešeno využití optimální varianty přísady pro kompenzaci objemových změn a varianty obsahující redispergovatelný polymerní prášek typu a množství, při kterém dochází k nejvíce pozitivnímu zhodnocení vlastností polymer-cementového kompozitu.

Zkušební vzorky připravené dle optimalizovaných receptur jsou zatíženy rozsáhlým testováním základních a pokročilých zkušebních metod a zároveň jsou ověřovány dlouhodobé pevnostní charakteristiky.

V rámci této etapy je ověřován vliv kombinace výše uvedených přísad na hydratační proces. Především je sledován a ověřován vliv synergie pozitivních i negativních dopadů kombinace přísad na hydratační objemové změny, dále na vznik případných novotvarů či změn v průběhu hydratace cementu a zároveň je ověřován vliv dopadu uložení ve vlhkém a vodním uložení na vlastnosti polymer-cementového kompozitu.

Výstupem této etapy je optimalizovaný objemově kompenzovaný polymer-cementový kompozit s vysokými užitnými vlastnostmi a nižším ekologickým a ekonomickým dopadem než hmota referenční. Zároveň kompozit vykazuje velmi vysokých přídržností k betonu, ale také k nenasákavým hladkým nenasákavým obkladovým materiálům. Schéma závěrečné etapy V. je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 9 ETAPA V. Optimalizace receptur, pokročilé testování vybraných surovinových variant, zhodnocení výsledků, selekce optimalizovaného řešení

3.6 ETAPA VI. - ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI VYVÍJENÝCH KOMPOZITŮ K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM NA HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH

V rámci poslední etapy řešení disertační práce je sledován vliv objemových hydratačních změn cementových a polymer-cementových kompozitů na jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. V rámci etapy je sledována především závislost přídržnosti k obkladovým prvkům vzhledem k hydratačním objemovým změnám sledovaných pomocí kontinuálního hydrostatického vážení, ale také trámečkovou metodou ve vodním a vlhkém uložení.

VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE

V následujících kapitolách jsou uvedeny jednotlivé výsledky, kterých bylo v rámci etap řešení experimentální části práce dosaženo, včetně jejich hodnocení a následné diskuse.

4 ETAPA I. - CHARAKTERIZACE EXPOZIČNÍHO PROSTŘEDÍ, NÁVRH METOD LABORATORNÍHO TESTOVÁNÍ A VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN

Předmětem této etapy je charakterizace expozičního prostředí, návrh metod laboratorního testování pro následující etapy a následně výběr vstupních surovin využívaných v rámci vývoje. Především se jedná o primární a druhotné suroviny (pojiva a příměsi) a vhodné primární přísady.

4.1 CHARAKTERIZACE PROSTŘEDÍ

Navrhovaný polymerem-modifikovaný cementový kompozit je určen pro lepení obkladových prvků a správkové práce na betonových a zděných konstrukcích. Tyto konstrukce se nejčastěji nacházejí v prostředí s vyšším expozičním zatížením, než běžné konstrukce domů a bytů.

Jedná se především o zatížení průmyslové, nacházející se v chemických provozech, pivovarech, kuchyních, stáčírňách nebezpečných látek, kanalizacích a jiných. V těchto provozech mohou na konstrukci působit látky, mezi které patří především sírany, dusičnany, či například agresivní rozpouštědla.

Navrhovaný polymerem-modifikovaný cementový kompozit není navrhován jako spárovací hmota, nebude tedy tomuto prostředí primárně vystaven. Je však i přesto vhodné, aby jeho materiálové užité vlastnosti byly velmi vysoké, aby nedošlo k porušení konstrukce v případě poškození spárovací hmoty, či poškození obkladového prvku.

Předpokládá se, že po aplikaci čerstvé hmoty na konstrukci, bude tato hmota vystavena dvěma základním druhům prostředí v průběhu hydratačního procesu. Proto jsou hmoty testovány v rámci této práce na objemové změny a přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

Hmota bude vystavena:

- prostředí – 21 ± 2 °C, 100% relativní vlhkost vzduchu,
 - o simulace prostředí kanalizace, potrubí uzavřených prostor apod.,
- prostředí vodního uložení – 21 ± 2 °C,
 - o simulace prostředí při výstavbě vodohospodářských staveb jako jsou např. nádrže na pitnou vodu, zrací jímky apod.

Předpokladem a cílem je, aby navrhovaná hmota fungovala s vysokými užitnými vlastnostmi v obou prostředích.

4.2 METODY LABORATORNÍHO TESTOVÁNÍ

Navrhované cementové a polymer-cementové kompozity byly testovány na základě vybraných laboratorních zkoušek, které jsou klíčové pro ověření fyzikálně-mechanických a užitných vlastností kompozitů pro konkrétní použití.

Jedná se o výběr zkoušek, které jsou využívány pro ověřování vlastností výrobků pro sanaci, ochranu a opravu betonových konstrukcí dle ČSN EN 1504 a pro cementová lepidla pro lepení keramických obkladových prvků dle ČSN EN 12004.

- stanovení zrnitosti (ČSN EN 1015-1, ČSN EN 933-1),
- stanovení zrnitosti pomocí laserové difrakční granulometrie (ISO 13320:2009),
- stanovení měrného povrchu permeabilní metodou (Blaine) (ČSN EN 196-6),
- chemické složení (ČSN 72 0100),
- měrná hmotnost (ČSN EN 1097-7),
- nasákavost kameniva (ČSN EN 1097-6),
- nasákavost ztvrdlých malt (ČSN 73 1316),
- stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím stráscacího stolku) (ČSN EN 1015-3),
- stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty (ČSN EN 1015-9),
- stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty (ČSN EN 1015-6),
- stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty (ČSN EN 1015-10)
- tahová přídržnost (ČSN EN 12004-2) / soudržnost (ČSN EN 1542) / přídržnost zatvrdlých malt (ČSN EN 1015-12),
- pevnost v tlaku (ČSN EN 1015-11),
- pevnost v tahu za ohybu (ČSN EN 1015-11),

- stanovení odolnosti proti obrusu (Böhme) (ČSN EN 13892-3),
- stanovení objemových změn trámečkovou metodou (ASTM C 1260),
 - o objevuje se v několika normách, ČSN 73 1320 pro betony, ČSN EN 13872 pro stěrky, ČSN EN 13454-2 pro potěry na bázi síranu vápenatého,
- stanovení objemových změn ve volném stavu – chemické smrštění – metoda kontinuálního hydrostatického vážení,
- XRD – rentgenová difrakční analýza,
- FTIR – infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací.

Na základě výše uvedených zkoušek je proveden výběr a optimalizace materiálového složení v jednotlivých etapách experimentální části této práce.

V následujících odstavcích jsou ve zkratce popsány jednotlivé metody laboratorního testování.

Stanovení zrnitosti

Stanovení zrnitosti neboli granulometrie je využíváno pro stanovení granulometrických křivek vybraných použitých plniv a druhotných surovin. V případě plniva, kameniva, stavebního písku je použit síťový rozbor v souladu s ČSN EN 933-1 na normové sadě sít. Na základě síťového rozboru jednotlivých plniv, byla následně zvolena vhodná plniva, jejichž kombinace se velmi blíží navrhované ideální křivce zrnitosti [63]. Sada sít je znázorněna na následujícím Obr. 10.



Obr. 10 Sada sít pro stanovení granulometrie plniv

V případě jemnozrnných surovin, především druhotných surovin pro substituci pojiva (portlandského cementu) byla stanovena také granulometrie metodou laserové difrakční analýzy dle ISO 13320:2009 zařízením Mastersizer 2000. Princip metody spočívá v difrakci laserového paprsku na kontinuálním proudu částic, jež je zachycován na pozadí. Difrakční obraz je následně pomocí Fourierovy transformace převeden na distribuční granulometrickou křivku. Metoda je vhodná především pro částice o maximální velikosti zrna <2000 μm [64; 65].

Stanovení měrného povrchu permeabilní metodou (Blaine)

Pro stanovení měrného povrchu, který se standardně měří u cementů, ale také u příměsí a druhotných surovin, které cementové pojivo substituují, bylo použito laboratorního přístroje ZEB/PC-Blaine Star. Na základě známé měrné hmotnosti a hmotnosti zkoumaného média a doby průchodu stanoveného objemu vzduchu přes toto médium provede zařízení výpočet měrného povrchu zkoumané látky [66]. Použitý přístroj je znázorněn na následujícím Obr. 11.



Obr. 11 Přístroj ZEB/PC-Blaine Star pro stanovení měrného povrchu

Chemické složení

V rámci stanovení materiálových vlastností vybraných použitých primárních a druhotných surovin bylo provedeno stanovení chemického složení v souladu s ČSN 72 0100.

Vzhledem k použití v kombinaci s portlandským cementem byly stanovovány především chemické sloučeniny, mezi které patří např. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , CaO , MgO , K_2O či Na_2O .

Měrná hmotnost

Pro stanovení měrného povrchu metodou podle Blaine je nutno znát měrnou hmotnost zkoumaného materiálu. U všech druhotných surovin, které byly využity pro substituci primárního pojiva, byla stanovena měrná hmotnost pyknometricky pomocí zařízení AccuPyc II 1340 Pycnometer. Toto zařízení používá pro stanovení

měrné hmotnosti dusík nebo helium. Oproti klasickému stanovení měrné hmotnosti za pomoci vody, je tato metoda významně přesnější. Stanovení bylo provedeno v souladu s ČSN EN 1097-7. Přístroj pro stanovení měrné hmotnosti – héliový pyknometr – je znázorněn na následujícím Obr. 12.



Obr. 12 Přístroj AccuPyc II 1340 Pycnometer

Nasákavost

U ztvrdlých cementových a polymer-cementových kompozitů bylo provedeno stanovení nasákavosti po 28 dnech zrání v souladu s ČSN 73 1316.

U použitých druhotných surovin byla stanovena jejich nasákavost ponořením do destilované vody na dobu 24 hodin. Následně byla surovina odloučena od nasáklé vody pomocí filtračního papíru a gravimetricky byla stanovena nasákavost rozdílem suché a nasáklé hmotnosti suroviny. Jedná se o upravenou zkoušku dle ČSN EN 1097-6 pro stanovení nasákavosti kameniv.

Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)

Ve všech krocích vývoje hmoty, byla zachovávána stejná zpracovatelnost, konzistence čerstvé směsi. Množství záměsové vody tedy bylo pro každou směs upraveno tak, aby sednutí rozlitím odpovídalo. Zpracovatelnost (konzistence) byla stanovována pomocí střešacího stolku dle ČSN EN 1015-3 prostřednictvím komolého kužele o vnitřním průměru $100\pm 0,5$ mm (ve spodní části) a $70\pm 0,5$ mm (v části horní) a výšce $60\pm 0,5$ mm [67]. Stanovení konzistence je znázorněno na následujícím Obr. 13.



Obr. 13 Stanovení konzistence čerstvé malty metodou sednutí rozlitím

Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla stanovována v souladu s ČSN EN 12350-6 gravimetrickou metodou rozdílu hmotností prázdné formy a formy naplněné čerstvou maltovou směsí [68]. V grafech této práce je objemová hmotnost čerstvé malty označována zkratkou DČB. Proces přípravy čerstvé směsi je znázorněn na následujícím Obr. 14.



Obr. 14 Proces míchání čerstvé směsi

Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty

Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty bylo prováděno dle ČSN EN 12930-7. Gravimetricky bylo provedeno zvážení zatvrdlých těles na vahách o přesnosti na 0,1 g. Následně bylo provedeno stanovení rozměrů zatvrdlých těles pomocí posuvného měřítka s přesností měření na 0,01 mm. Výpočtem byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty [69]. V grafech této práce je objemová hmotnost čerstvé malty označována zkratkou DZB. Vzorky před odformováním v následujícím Obr. 15.



Obr. 15 Vzorky malt připravené ve formách

Tahová přídržnost / soudržnost / přídržnost zatvrdlých malt

Tahová přídržnost, soudržnost povrchových vrstev, či přídržnost zatvrdlých malt byla stanovena v souladu se zkušebními postupy uvedenými v normách

ČSN EN 12004-2, ČSN EN 1542 a ČSN EN 1015-12. V případě stanovení přídržnosti malty k podkladu bylo provedeno připevnění odtrhového terče pomocí pryskyřičného lepidla přímo na maltu nanesenou na podklad. Následně došlo k oříznutí tohoto terče, včetně malty až na podklad a následně byla vyvozena tahová síla kolmá k rovině podkladu. V případě stanovení přídržnosti obkladového prvku byl odtrhový terč připevněn pomocí pryskyřičného lepidla na obkladový prvek, který byl pomocí malty přilepen k podkladu. Následně došlo k odtrhu tohoto prvku od malty tahovou silou vedenou kolmo na podklad [70; 71; 72]. V následujícím Obr. 16 jsou znázorněny vzorky po testování přídržnosti malt k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům ze IV. etapy této práce.



Obr. 16 Stanovení přídržnosti malty k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům v etapě IV. této práce

Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena na tělesech o rozměrech 40x40x160 mm pomocí přípravku pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem v souladu s ČSN EN 12930-5. Rozpětí podpor přípravku bylo 100 mm. Tahové napětí bylo vypočítáno z nejvyšší hodnoty síly, při které došlo k porušení vzorku [73].

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena v souladu s ČSN EN 12390-4 na zlomcích těles 40x40x160 mm, které vznikly při stanovování pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem. Pevnost v tlaku byla stanovena pomocí přípravku o tlačné ploše o rozměru 40x40 mm, tedy 1600 mm². Vypočtená hodnota pevnosti v tlaku byla stanovena přepočtem z nejvyšší hodnoty síly, při které došlo k porušení vzorku [74].

Stanovení odolnosti proti obrusu (Böhme)

Odolnost proti obrusu byla stanovena podle postupu v souladu s ČSN EN 13892-3. Stanovení bylo provedeno na vzorcích o rozměru 70x70x50 mm, které byly vyrobeny vyříznutím z d o poloviny naplněné formy pro výrobu těles 100x100x100 mm [75]. Stůl pro stanovení je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Stůl pro stanovení odolnosti proti obrusu metodou Böhme

Stanovení objemových změn trámečkovou metodou

Stanovení objemových změn trámečkovou metodou popisují americké normy, konkrétně ASTM C151 a ASTM C490 a využívají se kromě stanovení plastického smrštění také k evaluaci rozpínání malt v důsledku alkalicko-křemičité reakce. Jedná se o tělesa o rozměru 25x25x285 mm, které mají v čelech *zabetonovány* měřicí hroty. Po odformování je těleso změřeno pomocí přípravku s dilatometrem. Tato hodnota je brána jako výchozí. Následně jsou tělesa umístěna do daných prostředí (voda, vlhko, sucho, laboratorní prostředí) a v pravidelných intervalech jsou opět pomocí dilatometru měřena s přesností na 0,001 mm. Výstupem je křivka délkových změn těles v čase [76]. Na následujících Obr. 18 a Obr. 19 jsou znázorněny vzorky při měření objemových změn.



Obr. 18 Vzorek při stanovení objemových změn trámečkovou metodou



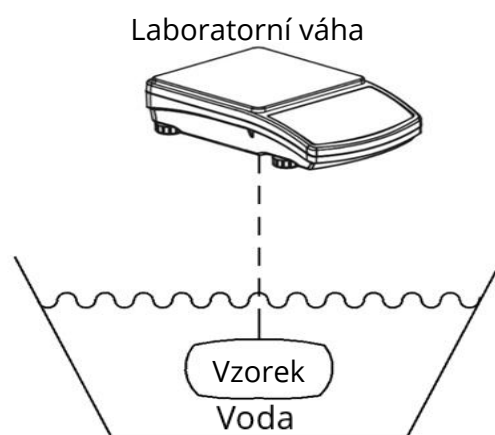
Obr. 19 Vzorek pro stanovení objemových změn trámečkovou metodou

Stanovení objemových změn ve volném stavu

Objemové změny ve volném stavu byly měřeny metodou kontinuálního hydrostatického vážení. Čerstvá malta byla vždy umístěna do pevného PP obalu, ze kterého bylo následně pomocí vyvolání negativního tlaku odsát vzduch a vzduchové póry. Následně byl vzorek v obalu zataven pomocí svářečky. Takto připravený vzorek byl zvážen za sucha a následně byl zavěšen na spodní závěs váhy. Vzorek byl ke spodnímu závěsu připevněn pomocí velmi tenkého PP lanka, aby bylo zkreslení hydrostatického vážení v případě kolísání hladiny vody zanedbatelné. Takto probíhalo měření po dobu 48-72 hodin [77].

Tato metoda je vhodná pro měření chemického smrštění hmoty. Jelikož je vzorek hermeticky uzavřen v neprodyšném obalu, nedochází k objemovým změnám v důsledku odpařování, či k plastickým objemovým změnám.

Stanovení objemových změn pomocí hydrostatického vážení je znázorněno na následujícím Obr. 20.



Obr. 20 Znáznornění hydrostatického vážení

Správnost a relevantnost tohoto druhu měření objemových změn byla ověřena pomocí laserového stanovení objemových změn v souladu s americkou normou ASTM C827/C827M-16, kdy je měřena objemová změna na tělese ve tvaru

kužele. Tvar tohoto kužele byl navržen tak, aby naměřená změna vzdálenosti povrchu kužele od čočky laseru odpovídala délkové změně v jednotkách mm/m [78].

Na následujícím Obr. 21 a je uveden vzorek na váze před stanovením kontinuálního hydrostatického vážení a měřicí stanice.



Obr. 21 Měřicí zařízení pro stanovení kontinuálního hydrostatického vážení

XRD – rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakční analýza byla použita pro stanovení mineralogického složení druhotných surovin a vzorků vyvíjených kompozitů pro ověření, k jakým změnám dochází vlivem substituce primárních pojivových a plnivových složek druhotnými surovinami v mineralogickém složení ztvrdlých kompozitů. Rentgenová difrakční analýza využívá Braggova zákona pro vykreslení difraktogramu, pomocí kterého lze následně s využitím difraktogramů známých minerálů určit kvalitativně, případně také kvantitativně mineralogické složení vzorků [79].

4.3 VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN

Na základě požadavků na cílené vysoké užitné vlastnosti vyvíjené směsi byly vybírány vysoce kvalitní primární suroviny, které se využívají při výrobě suchých omítkových a suchých maltových směsí (SOMS). Mezi tyto suroviny patří portlandský cement CEM I 42,5 R, dále vysoce kvalitní stavební tříděný, těžký křemenný písek a křemenná moučka. Pro zvýšení užitných vlastností byly dále vybrány příměsi, mezi které patří mikromletý vápenec, metakaolin, či mikrosilika.

Dále byly vybrány vhodné druhotné suroviny, které poté sloužily pro částečnou substituci pojivové a plnivové složky. Jedná se kromě běžně využívaných druhotných surovin také o aktuální druhotné, či odpadní suroviny, které mají velmi malé užití v praxi.

Dále byly zvoleny přísady, které zvýší užité vlastnosti vyvíjených kompozitů, a to především velmi kvalitní plastifikační a odpěňující přísady a také přísady polymerní. Tyto přísady byly vybrány od renomovaných výrobců a byly zvoleny v několika typech druhů. Dále byly určeny přísady pro kompenzaci objemových změn. Tyto byly vybírány jako suroviny běžně se vyskytující a běžně prodávané za tímto účelem, ale také suroviny, které jsou na trhu relativně krátkou dobu.

4.4 PRIMÁRNÍ SUROVINY

Primární suroviny jsou takové suroviny, které jsou vyráběny primárně za účelem použití v betonových či maltových směsích. Primární suroviny použité v této práci jsou popsány v následujících odstavcích.

4.4.1 CEMENT (OPC)

Pro účely vývoje byl využit portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý vyráběný společností Českomoravský cement, a.s. Jedná se o portlandský cement s rychlým nárůstem pevností. V následujících tabulkách Tab. 6 a Tab. 7 jsou uvedeny vlastnosti tohoto cementu platné k prosinci 2022. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 23. $N \cdot mm^{-2}$

Tab. 6 Mechanické a fyzikální vlastnosti PC CEM I 42,5 R Mokrý 12/2022 [80]

Měrný povrch	Normální konzistence	Počátek tuhnutí	Konec tuhnutí	Pevnost v tlaku		Pevnost v ohybu	
				2 dny	28 dní	2 dny	28 dní
[m^2/kg]	[%]	[min]	[min]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
414	27,5	199	279	29,7	61,4	6,4	9,3

Tab. 7 Chemické složení PC CEM I 42,5 R Mokrý 12/2022 [80]

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ A ve slínku
20,05	4,93	3,54	2,98	63,21	1,33	0,81	0,15	6,76

4.4.2 STAVEBNÍ TŘÍDĚNÝ PÍSEK

Pro účely vývoje byl použit stavební tříděný praný těžký písek Provodín vyráběný společností Provodínské písky a.s.

Využito bylo několik frakcí pro vytvoření plynulé křivky zrnitosti. Mezi použité materiály patřily následující písky:

- PR 30/31 o zrnitosti 0,3 – 1,0 mm,
- PR 35 o zrnitosti 0,1 – 0,35 mm,
- PR 1-2 o zrnitosti 1,0 – 2,0 mm.

Provodínské písky obsahují SiO_2 v množství vyšším než 98 hm.%. Chemické a fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v následujících Tab. 8 a Tab. 9. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 22.

Tab. 8 Fyzikální a chemické vlastnosti Provodínských písků [81]

Zastoupení v hm %					Vlastnost	
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Vyplavitelné látky	Ztráta žháním	Spékavost	Vlhkost
99,00	0,30	0,03	0,15	0,3	> 1500 °C	0,1 %

Tab. 9 Fyzikální vlastnosti použitých provodínských písků

Specifická hmotnost [g/cm ³]	Sypná hmotnost [kg/m ³]
2,65	1500-2000

4.4.3 KŘEMENNÁ MOUČKA

Křemenná moučka se vyrábí suchým mletím křemenných písků o vysokém obsahu SiO_2 . Použitá křemenná moučka byla dodána společností Sklopísek Střeleč, a.s. ve variantě Křemenná moučka ST 2.

Podle technického technické specifikace jsou v následujících Tab. 10, Tab. 11 a Tab. 12 uvedeny její fyzikální a chemické charakteristiky a sítový rozbor. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 22.

Tab. 10 Fyzikální vlastnosti Křemenné moučky ST 2 [82]

Velikost středního zrna (d50) [μm]	měrný povrch [m ² /kg]	olejové číslo [ml/100 g]	sypná hmotnost [kg/m ³]	Hustota [g/cm ³]	Tvrдост [-]	Vlhkost [%]	pH [-]
27	317	33,9	1190	2,65	7	< 0,2	6,4

Tab. 11 Chemické složení Křemenné moučky ST 2 [82]

Zastoupení v hm %					
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO} + \text{MgO}$	ZŽ
99,6	0,2	0,05	0,1	0,1	0,2

Tab. 12 Sítový rozbor Křemenné moučky ST 2 [82]

Velikost oka [μm]	90	63	45	40	45	40	32	20	15	10	5	2	1
Celkový propad [%]	5,7	14,5	19,8	31	35	44	58	66	73	83	93	97	

4.4.4 VÁPENEC (LL)

V rámci vývoje kompozitů byl použit mikromletý vápenec VBS 40 od společnosti LB Cemix, s.r.o. z lomu Kotouč Štramberk. Mikromletý vápenec se vyrábí mletím kusového vápence na požadovanou granulometrii. V následujících Tab. 13 a Tab. 14 jsou uvedeny chemické vlastnosti použitého mikromletého vápence. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 22.

Tab. 13 Chemické složení Mikromletého vápence VBS 40 [83]

Zastoupení v hm %						
CaCO ₃ + MgCO ₃	Z toho MgCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Z toho Fe ₂ O ₃	SO ₃	
97,33	1,07	< 2,0	0,45	0,13	0,04	

Tab. 14 Fyzikální vlastnosti Mikromletého vápence VBS 40

Specifická hmotnost	Sypná hmotnost
[g/cm ³]	[kg/m ³]
2,71	700-900

4.4.5 METAKAOLIN

V rámci vývoje byla použita surovina metakaolin, která sloužila jako pucolánově aktivní příměs k portlandskému cementu za účelem zvýšení užitných fyzikálně-mechanických vlastností výsledné hmoty. Metakaolin pro účely výroby suchých omítkových a maltových směsí se vyrábí kalcinací obohaceného kaolinu. V následujících Tab. 15 a Tab. 16 jsou uvedeny fyzikálně-mechanické parametry použitého metakaolinu od společnosti České lupkové závody a.s. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 22.

Tab. 15 Chemické složení použitého metakaolinu

Zastoupení v hm %			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
50-56	40-43	<1,5	<2,0

Tab. 16 Fyzikální vlastnosti použitého metakaolinu

Specifická hmotnost	Měrný povrch	Sypná hmotnost	Distribuce zrnitosti	
[g/cm ³]	[cm ² /g]	[kg/m ³]	d50	d90
			[μm]	[μm]
2,6	22000	360-600	5	12

4.4.6 MIKROSILIKA

Mikrosilika se vyrábí srážením SiO₂ v plynné formě při výrobě v hutním průmyslu. Tato srážená mikrosilika se následně dodává ve dvou variantách. Dodává

se hutněná a nehutněná forma. Hutněná forma je kompaktnější, ale při jejím použití v maltových a omítkových směsích dochází k zachování shluků mikrosiliky, což má za následek nevyužití pucolánového potenciálu této suroviny. Naopak nehutněná mikrosilika je sice výrazně finančně náročnější na dopravu, ale během jejího použití nedochází k tvorbám shluků a naopak dochází k plnému využití velmi vysokého měrného povrchu této suroviny a tím i k výraznému zvýšení užitných vlastností navrhovaných maltových směsí. V následujících Tab. 17 a Tab. 18 jsou uvedeny fyzikální a chemické parametry použité mikrosiliky od společnosti KEMA d.o.o. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 22.

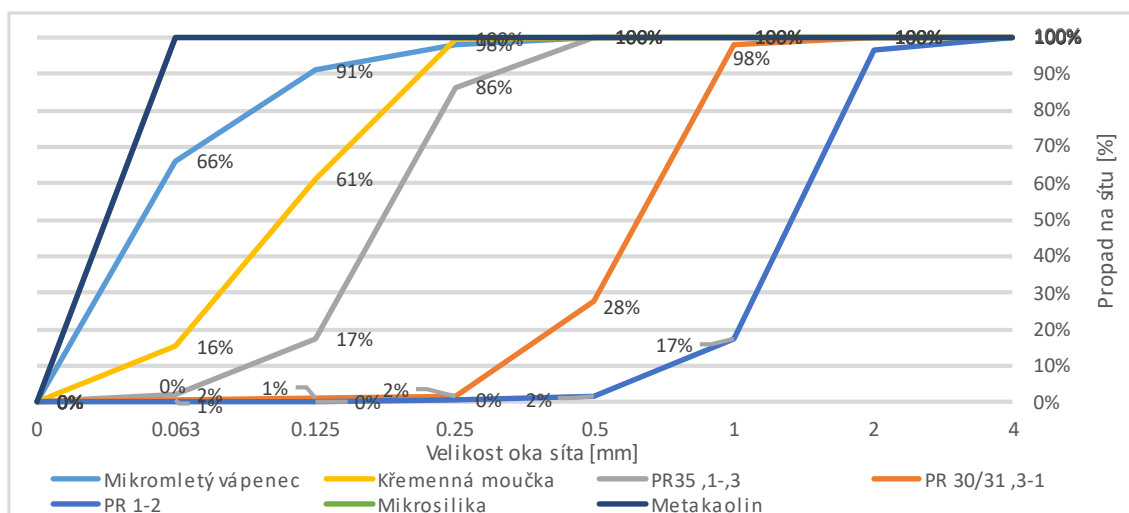
Tab. 17 Chemické složení použité mikrosiliky

Zastoupení v hm %							
SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	BaO	ZŽ
90	0,5	0,8	1,5	1,0	1,0	0,91	3

Tab. 18 Fyzikální vlastnosti použité mikrosiliky

Specifická hmotnost	Sypná hmotnost	Měrný povrch
[g/cm ³]	[kg/m ³]	[cm ² /g]
2,2	150-250	18000

Na následujícím Obr. 22 jsou uvedeny distribuční křivky primárních plniv, stavebního křemenného písku a vybraných primárních příměsí a mikroplniv, které jsou uvedeny v odstavcích výše.



Obr. 22 Distribuční křivky primárních plniv a příměsí

4.5 DRUHOTNÉ SUROVINY

V následujících odstavcích jsou uvedeny fyzikální a mechanické vlastnosti použitých druhotných surovin, které byly využity jako substituce primárních pojiv a plniv v rámci vývoje kompozitů.

4.5.1 ODPADNÍ SLÉVÁRENSKÝ PÍSEK POJENÝ VODNÍM SKLEM

Jako jedna z druhotných surovin nahrazující částečně plnivovou složku vyvíjeného kompozitu byl zvolen odpadní slévárenský písek pojený vodním sklem, který se využívá pro výrobu forem v hutnickém průmyslu. Sklářský písek velmi vysoké kvality (s vysokým obsahem SiO_2) je pojen pomocí sodného nebo draselného vodního skla za účelem vytvoření formy pro odlévání hutnických výrobků. Tento písek je několikrát regenerovatelný a je tedy možné ho opakovaně znovu použít. Ve chvíli, kdy již toto není možné (po 5. či 6. použití), stává se odpadní surovinou. Jedná se o písek o frakci $<2,0$ mm, který díky pojení vodním sklem vytváří shluky o velikosti i několika desítek centimetrů. Před použitím je proto nutno upravit jeho granulometrickou křivku pomocí drcení. V následujících Tab. 19 a Tab. 20 jsou uvedeny fyzikální a chemické parametry použité suroviny. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 24.

Tab. 19 Chemické složení slévárenského písku s vodním sklem

Zastoupení v hm %								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
82,00	1,73	2,71	0,10	0,30	0,60	0,40	0,21	$<0,10$

Tab. 20 Fyzikální charakteristiky slévárenského písku s vodním sklem

Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m^3]	Sypná hmotnost setřesená [kg/m^3]	Měrná hmotnost [g/cm^3]	Měrný povrch [cm^2/g]
1150	1500	2,86	360

4.5.2 ODPADNÍ ELEKTRÁRENSKÁ ŠKVÁRA

Odpadní škvára použitá jako částečná substituce plniva nebo pojiva vyvíjené směsi pochází ze složiště tepelné elektrárny Oslavany. Jedná se o škváru, která vznikla v průběhu provozu elektrárny a nyní leží po několik desetiletí na složišti v areálu bývalé elektrárny a dochází k její postupné degradaci a zanášení místní flórou. V následujících Tab. 21 a Tab. 22 jsou uvedeny fyzikální a chemické

parametry použité suroviny. Její křivka zrnitosti byla upravena pomocí drcení. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 24.

Tab. 21 Chemické složení odpadní škváry

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
51,0	22,6	0,90	1,15	4,22	1,65	3,30	1,85	0,27

Tab. 22 Fyzikální charakteristiky odpadní škváry

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,61	280

4.5.3 ODPAD Z VÝROBY OBKLADOVÝCH PRVKŮ Z TAVENÉHO ČEDIČE

Čedičové odkapy byly použity jako částečná substituce plnivové složky. Jedná se o zbytky vznikající při výrobě obkladových prvků z taveného čediče. Tyto zbytky jsou nerovnoměrně zchlazeny, během jejich chlazení na vzduchu tedy dochází k nerovnoměrnému vývoji vnitřního pnutí a ke komplexnímu porušení těchto úkapů. Výsledkem je ostrohranné kamenivo amorfního charakteru, které je před použitím potřeba předupravit pomocí vhodného procesu na požadovanou granulometrii. V následující Tab. 23 a Tab. 24 fyzikální a chemické parametry použité suroviny. Křivka zrnitosti byla upravena pomocí drcení. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 24.

Tab. 23 Chemické složení odpadních čedičových odkapů

Zastoupení v hm %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ZŽ
50,0	15,0	14,50	9,50	10,0	0,0

Tab. 24 Fyzikální charakteristiky odpadních čedičových odkapů

Měrná hmotnost [g/cm ³]
2,95

4.5.4 VYSOKOTEPLTNÍ POPÍLEK (HFA)

Jako částečná substituce pojivové složky byl využit vysokoteplotní popílek z tepelné elektrárny Tušimice, která využívá při spalování hnědé uhlí. Vysokoteplotní popílek použitý v rámci práce je popílek zachycený z kouřových plynů vznikajících při spalování. K jeho zachycování dochází na elektrostatických odlučovačích. Použitý popílek je z druhého odlučovače a jeho měrný povrch je přibližně 400 m²/kg. Popílek

splňuje normu ČSN EN 450-1+A1 pro použití jako popílek do betonu. V následujících Tab. 25 a Tab. 26 jsou uvedeny fyzikální a chemické vlastnosti použitého popílku. Použitý vysokoteplotní popílek nebylo nutno před použitím předupravovat. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 23.

Tab. 25 Chemické složení vysokoteplotního popílku

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
50,2	26,1	6,0	0,4	1,5	1,0	2,0	0,3	0,1

Tab. 26 Fyzikální charakteristiky vysokoteplotního popílku

Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
850	1200	2,41	4000

4.5.5 ODPADNÍ EXPANDOVANÝ PERLIT (EPP)

Při výrobě expandovaného perlitu z původní horniny vzniká velké množství (2-10 %) velice jemných částic s velikostí nižší než 200 μm. Tyto částice jsou zachytávány pomocí cyklonových odlučovačů. Takto vyrobený odpadní materiál se vyznačuje vysokým měrným povrchem, velice nízkou objemovou hmotností a vysokým obsahem amorfní fáze.

V následujících Tab. 27 a Tab. 28 jsou uvedeny chemické a fyzikální vlastnosti použitého expandovaného perlitu. Odpadní expandovaný perlit byl před použitím předupraven pomocí kulového mlýnu. Distribuční křivka zrnitosti je znázorněna na Obr. 23.

Tab. 27 Chemické složení odpadního expandovaného perlitu

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
74,0	13,1	2,0	<0,01	1,2	0,2	4,6	2,1	<0,02

Tab. 28 Fyzikální charakteristiky odpadního expandovaného perlitu

Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	Objemová hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]	Nasákavost [hm.%]
70	100	280	15000	240

4.5.6 ODPADNÍ OBALOVÉ SKLO

Při recyklaci obalového skla nelze provést kompletní recyklaci veškerého skla. Především z důvodu barevnostních nehomogenit, kdy velmi jemné částice již není možné na automatických linkách vytřídit. V následujících Tab. 29 a Tab. 30 jsou uvedeny fyzikální a chemické parametry použitého odpadního obalového skla. Odpadní obalové sklo bylo předupraveno drcením a mletím na požadovaný měrný povrch.

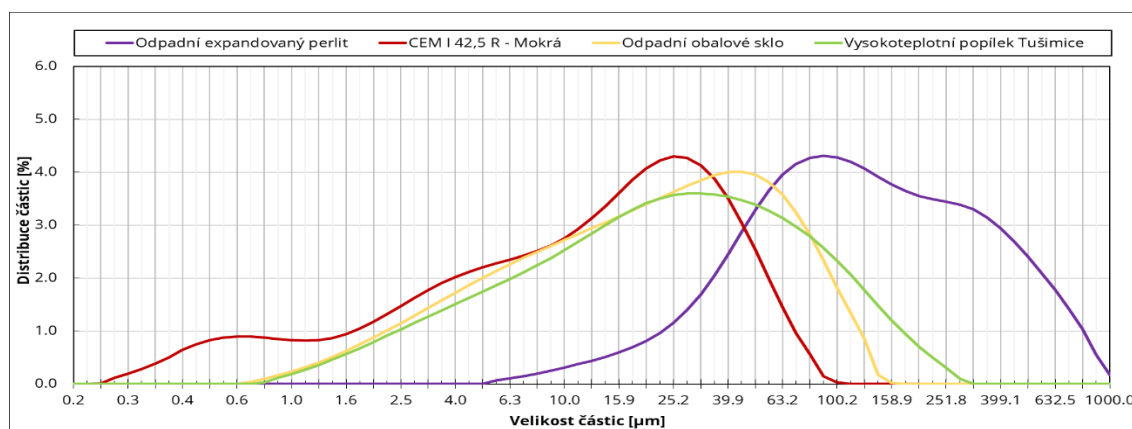
Tab. 29 Chemické složení odpadního obalového skla

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
71,5	1,6	0,6	-	10,3	2,2	0,2	13,1	-

Tab. 30 Fyzikální charakteristiky odpadního obalového skla

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,60	4000

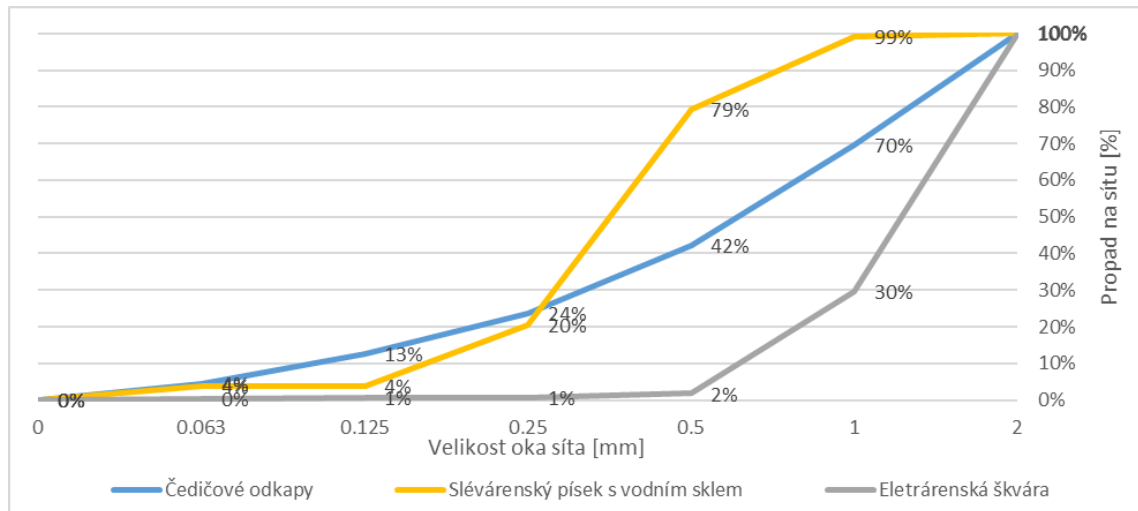
V následujícím grafu na Obr. 23 jsou znázorněny distribuční křivky vybraných primárních a druhotných pojiv.



Obr. 23 Distribuční křivka vybraných substitučních a primárních pojivových složek

V následujícím grafu na Obr. 24 jsou znázorněny distribuční křivky jednotlivých druhotných surovin, které byly předupraveny pomocí čelistového drtiče.

Z grafu vyplývá, že aby bylo možno dané suroviny použít do cementových kompozitů, je nutno jejich granulometrickou křivku upravit. Tohoto bylo dosaženo v další části práce použitím primárních plniv (tříděných stavebních písků a křemenné moučky). Z důvodu kombinace primárních plniv s druhotnými není zároveň možno v rámci práce dosáhnout 100% substituce plnivové složky.



Obr. 24 Distribuční křivka vybraných substitučních plnivových složek

4.6 PŘÍSADY

V následujících odstavcích jsou uvedeny přísady, které byly použity při vývoji cementových a polymer-cementových kompozitů, které jsou součástí této práce.

4.6.1 PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADY

V rámci vývoje byl dbán důraz na maximalizaci užitečných vlastností. Bylo proto použito pouze vysoce vodo-redukující přísady na bázi polykarboxyl-etheru (PCE).

Super-plastifikační přísada na bázi kyseliny polykarboxylové vhodná pro použití především pro suché maltové a omítkové směsi od společnosti Imerys S.A.

Dávkování přísady: 0,05 hm.% - 1,00 hm.% vzhledem k množství pojiva. Na základě použitého cementu bylo experimentálně zvoleno ideální dávkování. Přísada obsahuje více než 95 hm.% funkční složky.

4.6.2 ODPĚŇOVACÍ PŘÍSADY

Z důvodu použití práškové super-plastifikační přísady byla použita vhodná prášková odpěňovací přísada pro snížení množství vzduchu vznikajícího v čerstvé směsi.

Použitá odpěňovací přísada je na bázi minerálních olejů a neiontových povrchově aktivních látek vázaných na inertním nosiči od společnosti Synthomer a.s. Dávkování přísady v poměru ku celkovému množství suché směsi. Dávkování bylo experimentálně zvoleno v množství 0,1-0,3 hm.% z celkové navážky.

4.6.3 POLYMERNÍ PŘÍSADY

V rámci vývoje polymer-cementových přísad byly zvoleny přísady na několika nejvíce rozšířených bázích od renomovaných výrobců. Tyto jsou popsány v následujících odstavcích. Všechny použité přísady jsou ve vodě rozpustné, resp. vodou ředitelné.

4.6.3.1 STYREN-AKRYLÁT (SA)

Polymerní redispergovatelný prášek na bázi styren-akrylátů byl dodán společností BASF spol. s r.o. Příklad je velmi vhodná do polymer-cementových lepidel a správkových malt. V následující Tab. 31 jsou uvedeny vlastnosti použitého polymeru.

Tab. 31 Vlastnosti použitého polymeru BASF SA

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH [-]
Bílý prášek	99-100	500	-1	6,5-8,0

4.6.3.2 KOPOLYMER ETHYLEN VINYLACETÁTU (VAE)

Polymerní redispergovatelný prášek na bázi kopolymer ethylen vinylacetátu byl dodán společnostmi Wacker Chemie AG a DCC plc. Obě přísady jsou velmi vhodné do polymer-cementových lepidel a správkových malt. V následujících Tab. 32 a Tab. 33 jsou uvedeny vlastnosti použitého polymeru.

Tab. 32 Vlastnosti použitého polymeru WACKER VAE

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH [-]
Běžový prášek	Min. 98	500-600	4	6,0-7,0

Tab. 33 Vlastnosti použitého polymeru DCC VAE

Vzhled [-]	Obsah pevné složky	Objemová hmotnost [kg/cm ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH [-]
Bílý prášek	99-100	500	-15±5	7,0

4.6.3.3 TERPOLYMER VINYLACETÁTU, VINYLCHLORIDU A ETHYLENU (VAE, VC, E)

Polymerní redispergovatelný prášek na bázi terpolymeru vinylacetátu, vinylchloridu a ethyleny byl dodán společností Wacker Chemie AG. Příklad je primárně určena do polymer-cementových lepidel. V následující Tab. 34 jsou uvedeny vlastnosti použitého polymeru.

Tab. 34 Vlastnosti použitého polymeru WACKER VAE/VC/E

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH [-]
Běžový prášek	Min. 98	450-650	4	6,0-7,0

4.6.3.4 KOPOLYMER VINYLACETÁTU, VINYL ESTERU A ETHYLENU (VAE, VE, E)

Polymerní redispergovatelný prášek na bázi kopolymeru vinylacetátu, vinyl esteru a ethyleny byl dodán společností Yil-Long Chemical Group Ltd. Příklad je primárně určena do polymer-cementových lepidel a správkových malt. V následující Tab. 35 jsou uvedeny vlastnosti použitého polymeru.

Tab. 35 Vlastnosti použitého polymeru Redipol VAE,VE, E

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH [-]
Bílý prášek	98	300-500	1	6,0-8,0

4.6.3.5 HYDROXYPROPYL METHYL CELULÓZA (HPMC)

Redispergovatelný prášek na bázi hydroxypropyl methyl celulózy byl dodán společností SE Tylose GmbH. Příklad je primárně určena do polymer-cementových lepidel a stěrek. V následující jsou uvedeny vlastnosti použité suroviny.

Tab. 36 Vlastnosti použitého suroviny SE Tylose HPMC

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota pH
Bílý prášek	100	1100-1500	-	6,0-8,0

4.6.4 PŘÍSAKY PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

V rámci výzkumu byly zkoumány vlastnosti chování čerstvých a ztvrdlých směsí při použití přísad pro kompenzaci objemových změn. Byly zvoleny běžně využívané, ale také i netradiční materiály.

4.6.4.1 NEOPENTYL GLYCOL (2,2-DIMETHYLPROPANE-1,3-DIOL)

Neopentyl glycol byl dodán společností WhitChem Limited. Tato protismršťovací přísada funguje na principu navázání alkoholových molekul na záměsovou vodu a zrna cementu. To následně vede k úpravě povrchového napětí a smáčecího úhlu záměsové vody a ke snížení plastického smrštění během hydratačního procesu díky snížení výparu během hydratace. Zároveň však dochází, podobně jako v případě použití cukru či jiných zpomalujících přísad, ke zpomalení hydratačního procesu a ke snížení rychlosti vývinu hydratačního tepla. Fyzikální vlastnosti jsou popsány v následující Tab. 37.

Tab. 37 Vlastnosti použitého Neopentyl glycolu

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hodnota pH [-]
Bílý prášek	98	1000-1100	7,0

4.6.4.2 POLYETHER

Protismršťovací přísada na bázi polyetherů byla dodána společností Evonik Industries AG. Tato přísada obsahuje především polymer oxiranmethyly s oxiranovou mono(3,5,5-trimethylhexanoate) skupinou. Přísada funguje především na principu úpravy smáčecího úhlu záměsové vody a vyššího smočení cementových zrn, které zaručují snížení plastického smrštění směsí a tím zmenšení hydratačních objemových změn. Fyzikální vlastnosti jsou popsány v následující Tab. 38.

Tab. 38 Vlastnosti použitého polyetheru

Vzhled [-]	Obsah pevné složky [hm.%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hodnota pH [-]
Bílý prášek	98	500-800	6,0-9,0

4.6.4.3 SÁDRA

Sádra použitá jako vstupní surovina při návrhu vyvíjených kompozitů byla dodána společností Saint-Gobain Formula GmbH. Složením se jedná téměř o čistý

hemihydrát síranu vápenatého. V následující Tab. 39 jsou uvedeny základní charakteristiky použité suroviny. V případě, že cement obsahuje větší množství C_3A než je schopno zreagovat se sádrovcem přidaným do portlandského cementu, dochází při přidání sádry ke vzniku ettringitu, který způsobuje moderaci objemových změn.

Tab. 39 Fyzikální charakteristiky sádry

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]	Hodnota pH [-]
2,6-2,8	6000	7-8

4.6.4.4 CAC CEMENT

Jedná se o hlinitanový cement dodaný společností Calucem d.o.o. CAC cement tedy lze použít pro moderaci objemových hydratačních změn. Směs je však nutno z důvodu urychlení hydratačního procesu nutno zpomalovat např. vhodnou kyselinou. V následujících Tab. 40 a Tab. 41 jsou uvedeny chemické a fyzikální vlastnosti použitého CAC cementu.

Tab. 40 Chemické složení CAC cementu

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
5,8	39,0	14,0	<0,4	38,0	1,3	-	-	-

Tab. 41 Fyzikální charakteristiky CAC cementu

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
3,3	3600

4.6.4.5 CSA CEMENT

CSA cement byl dodán společností Caltra Nederland B.V. Jedná se o směs $3CaO_3 \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$, CaO a $CaSO_4$. Díky tomuto složení dochází během hydratačního procesu k tvorbě ettringitu. Během hydratačního procesu dochází k zarůstání struktury ettringitem dochází k expanzi, která může až převyšovat smrštění během hydratačního procesu portlandského cementu. Během hydratačního procesu může dojít při předávkování této přísady k deformacím, až k destrukci vzorku. V následujících Tab. 42 a Tab. 43 jsou uvedeny chemické a fyzikální vlastnosti použitého CSA cementu.

Tab. 42 Chemické složení CSA cementu

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
1,0	17,5	0,5	28,0	53,0	1,5	-	-	-

Tab. 43 Fyzikální charakteristiky CSA cementu

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,86	3700

4.6.4.6 ACA CEMENT

Jedná se o amorfnní kalcium-aluminátový cement dodaný společností Caltra Nederland B.V. jehož hlavní složkou je minerál Mayenit C₁₂A₇. Tato složka hlinitanových cementů urychluje tuhnutí a tvrdnutí cementů. Čím více je té složky přítomno, tím rychlejší je hydratační reakce. V případě reakce této složky s portlandským cementem dochází k pozitivním délkovým hydratačním změnám. ACA cement tedy lze použít pro moderaci objemových hydratačních změn. V případě použití ACA je však nutno díky urychlení reakce použít např. některou z vhodných kyselin (citronová, vinná), které se využívají pro oddálení počátku tuhnutí. V následujících Tab. 44 a Tab. 45 jsou uvedeny chemické a fyzikální vlastnosti použitého ACA cementu.

Tab. 44 Chemické složení ACA cementu

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
<3,0	22,0	0,5	<1,0	42,0	<1,0	-	-	-

Tab. 45 Fyzikální charakteristiky ACA cementu

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,94	6000

5 ETAPA II. - SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH VARIANT, SUBSTITUCE PRIMÁRNÍCH SLOŽEK DRUHOTNÝMI SUROVINAMI

Předmětem této etapy je sestavení referenční receptury, následná úprava a optimalizace jejího složení pomocí primárních příměsí a následné ověření možnosti využití vysokého množství druhotných a odpadních surovin pro maximální substituci primárních pojivových a plnivových složek.

Výstupem z této etapy je optimalizovaná referenční receptura pomocí primárních příměsí a optimalizované receptury se substitucí primárních pojiv a plniv druhotnými surovinami.

5.1 NÁVRH ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

Základní receptury vyvíjených polymer-cementových kompozitů byly navrhovány s ohledem na běžné složení sanačních malt a lepidel a s ohledem na směrnice American Concrete Institute (ACI) viz Tab. 4 tohoto dokumentu. Běžné složení sanačních malt a lepidel je navrhováno dle směrnice Amerického institutu pro betonové konstrukce z důvodu, že neexistuje (v době řešení této práce) evropská směrnice či norma obsahující doporučené, či startovací receptury pro návrh těchto kompozitů.

Základní receptury byly upraveny tak, aby byly zaručeny jejich velmi vysoké užitné vlastnosti, mezi které patří pevnost v tlaku, přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům, hutnost, či nízké hydratační objemové změny.

Při návrhu základních receptur byla v případě použití příměsí metakaolin a mikrosilika provedena substituce cementu těmito příměsemi v poměru 1:1. V následující Tab. 46 jsou uvedeny základní navržené receptury.

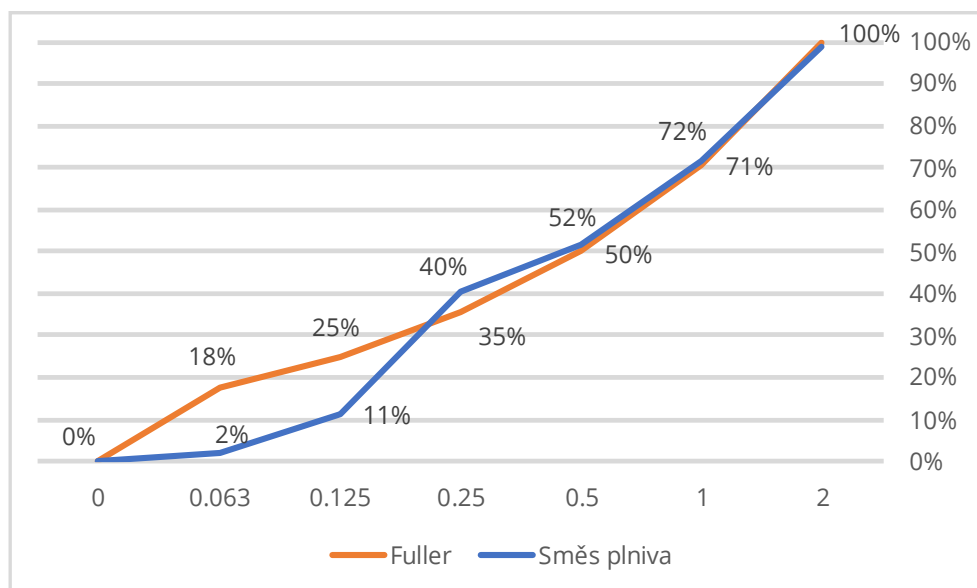
Tab. 46 Základní receptury PMCC

Složka	A ref	B	C	D	E	F
OPC 42,5 R	350.0	290.0	320.0	320.0	290.0	350.0
PR 30/31	148.0	148.9	142.0	142.0	142.0	142.0
PR 35	271.0	264.3	252.0	252.0	252.0	252.0
PR 1-2	227.7	233.5	222.7	222.7	222.7	222.7
Mikromletý vápenec	0.0	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Mikrosilika	0.0	30.0	30.0	0.0	30.0	0.0
Metakaolin	0.0	30.0	0.0	30.0	30.0	0.0
Suchý odpěňovač	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Suchý plastifikátor	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Suma	1000	1000	1000	1000	1000	1000

V rámci všech směsí bylo upravováno množství záměsové vody dle zpracovatelnosti čerstvé směsi. Všechny testované receptury byly upraveny pro zpracovatelnost metodou stanovení konzistence na střešacím stolku dle ČSN EN 1015-3 s hodnotou sednutí rozlitém v rozmezí 140 ± 5 mm.

Výše uvedené receptury byly navrhovány s ohledem na doporučené množství cementu pro polymer-cementové kompozity, mezi které patří v tomto směru návrhu především správkové hmoty. Základní receptury byly navrženy bez polymerních přísad, či přísad pro kompenzaci objemových změn. V případě dávkování přísad je v rámci následujícího řešení práce nahrazována nejjemnější složka plniva, tedy kamenivo PR35 o zrnitosti 0,1-0,3 mm.

V rámci návrhu byla zvolena použitá frakce 0-2 mm pro možnost aplikace výsledného polymer-cementového kompozitu v tenčích vrstvách, zároveň však nebylo voleno jemnějších frakcí, aby nedocházelo k ovlivnění fyzikálně-mechanických vlastností výsledného kompozitu vyšším požadavkem na množství záměsové vody v důsledku většího měrného povrchu zrn kameniva. V rámci návrhu byla volena plynulá křivka, která se blížila ideální křivce zrnitosti dle Fullera. Směsí použitého kameniva nebylo této křivky docíleno, jemné podíly však částečně nahrazuje vyšší dávka pojiva, kdy cementové mléko vytváří dostatečné hutnou strukturu, která je schopna udržet kamenivo ve vznosu a zabránit segregaci. Použitá křivka zrnitosti kameniva je uvedena v následujícím grafu na Obr. 25.



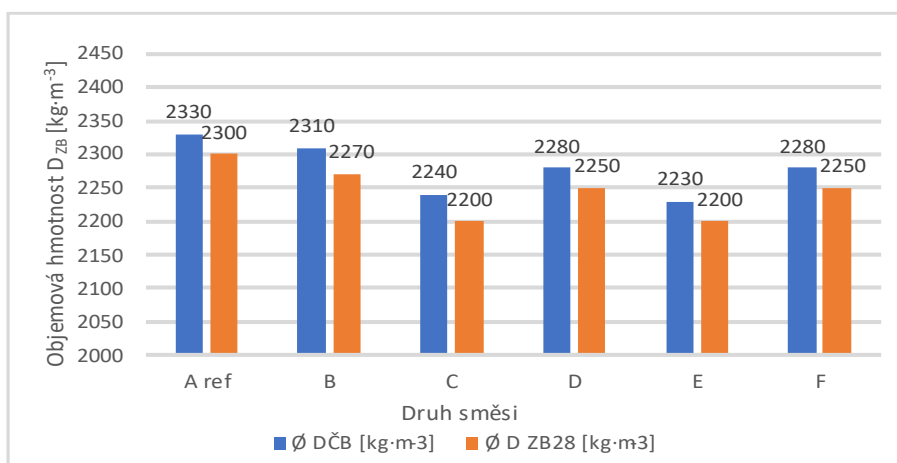
Obr. 25 Křivka zrnitosti kameniva v základních recepturách

5.1.1 TESTOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

Na vzorcích připravených dle receptur uvedených v Tab. 46 byly stanoveny základní parametry, které jsou uvedeny na Obr. 25. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v následujících odstavcích a na příslušných grafech.

5.1.1.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY

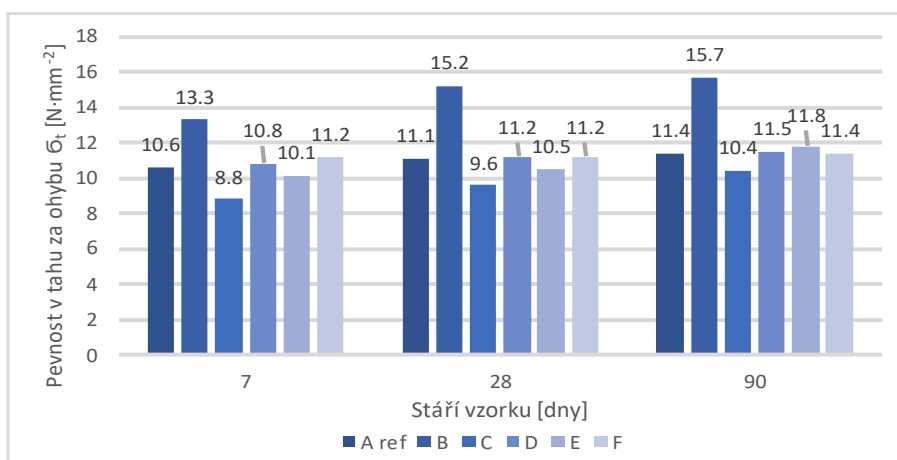
Na následujícím grafu na Obr. 26 jsou znázorněny objemové hmotnosti čerstvých a ztvrdlých směsí (po 28 dnech zrání).



Obr. 26 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že se objemová hmotnost jednotlivých navržených receptur příliš nemění. To je důsledkem především té skutečnosti, že v recepturách nejsou prováděny zásadní změny zastoupení jednotlivých složek a v dávce záměsové vody.

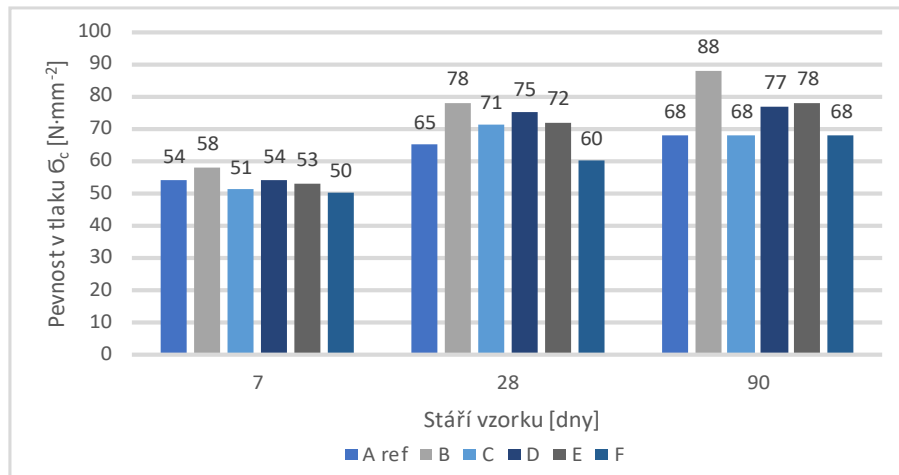
Na následujícím grafu Obr. 27 jsou znázorněny pevnosti v tahu za ohybu.



Obr. 27 Pevnost v tahu za ohybu vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že receptura **B** dosahovala významně vyšších parametrů pevnosti v tahu za ohybu než ostatní navržené receptury. Toto je dáno především kombinací příměsí mikrosiliky a metakaolinu. Podobná tendence je patrná také u receptury **E**, která však kromě výše zmíněných obsahuje také mikromletý vápenec, který naopak vedl k mírnému zvýšení dávky záměsové vody a k nižšímu projevu pozitivních vlivů příměsí.

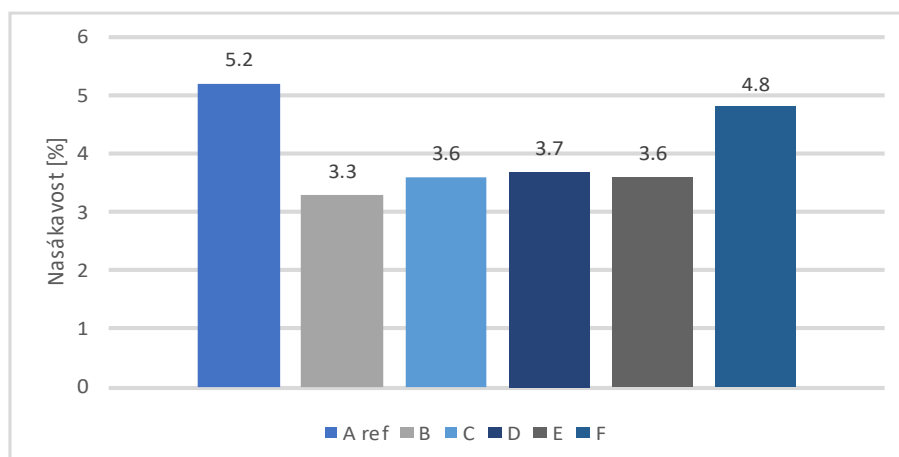
Na následujícím Obr. 28 jsou znázorněny pevnosti v tlaku.



Obr. 28 Pevnost v tlaku vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že během raných fází hydratace dochází k pouze drobným odchýlkám v pevnostech v tlaku vzorků, tyto rozdíly se však postupně zvyšují a po 90 dnech zrání je velice patrný vliv zastoupení složek vykazující pucolánovou aktivitu, jako je metakaolin a mikrosilika.

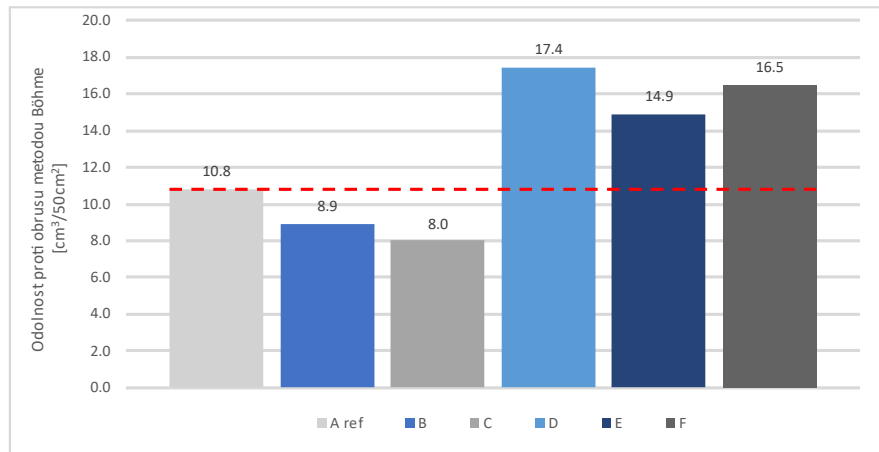
Na následujícím Obr. 29 jsou znázorněny nasákavosti jednotlivých receptur po 28 dnech zrání.



Obr. 29 Nasákavost vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že receptura **B** dosahovala nejnižší nasákavosti, a tedy nejvyšší hutnosti struktury. Toto je opět dáno zvýšením hutnosti kompozitu vhodným použitím primárních příměsí.

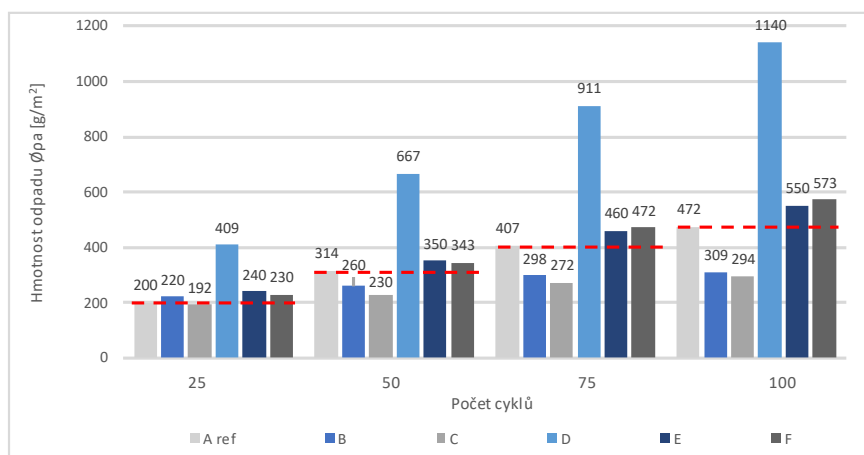
Na následujícím Obr. 30 jsou znázorněny hodnoty odolností proti obrusu metodou Böhme na vzorcích po 28 dnech zrání.



Obr. 30 Odolnost proti obrusu metodou Böhme vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného vyplývá, že nejnižších hodnot obrusu, tedy nejvyšší odolnosti proti obrusu vykazovaly receptury **B** a **C** a to o 20-30 % oproti referenční receptuře. Toto je dáno především vhodnou volbou primárních příměsí.

Na následujícím Obr. 31 jsou znázorněny odolnosti proti působení chemických rozmrazovacích látek u vzorků dle základních receptur po 28 dnech zrání.

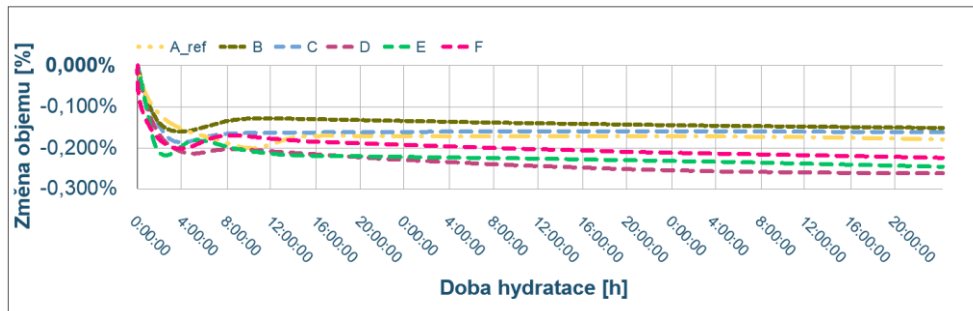


Obr. 31 Odolnost proti působení CHRL vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného je zřejmé, že výrazně vyšší odolnost po 100 cyklech zatěžování vykazovaly vzorky připravené dle receptur **B** a **C** o cca 50 % oproti referenční receptuře **A ref**.

5.1.1.2 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY A PŘÍDRŽNOST K OBKLADOVÝM PRVKŮM

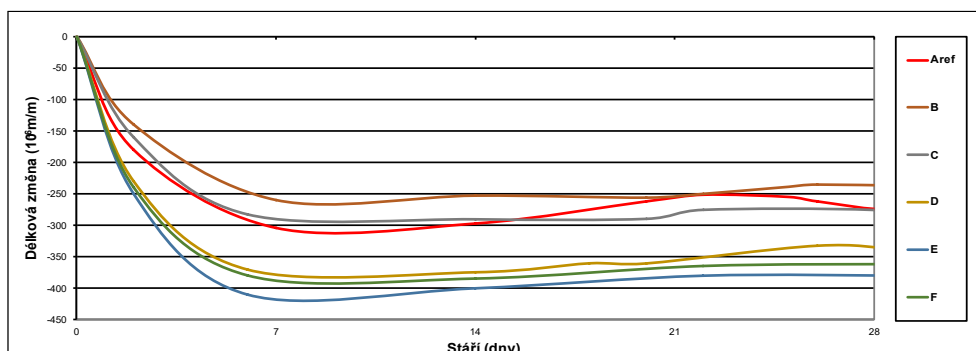
Na následujícím Obr. 32 jsou znázorněny chemické objemové změny vzorků dle základních receptur během prvních 72 hodin od zamíchání.



Obr. 32 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků dle základních receptur

Z výše uvedeného vyplývá, že nejnižších hodnot hydratačního chemického smrštění stanoveného metodou kontinuálního hydrostatického vážení během 72 hodin od zamíchání dosahovala hmota **B**, **E** a hmota referenční **A ref**. Toto je způsobeno především velmi nízkým vodním součinitelem a nižší dávkou cementu díky obsahu primárních příměsí, které sloužili jako substituce pojiva.

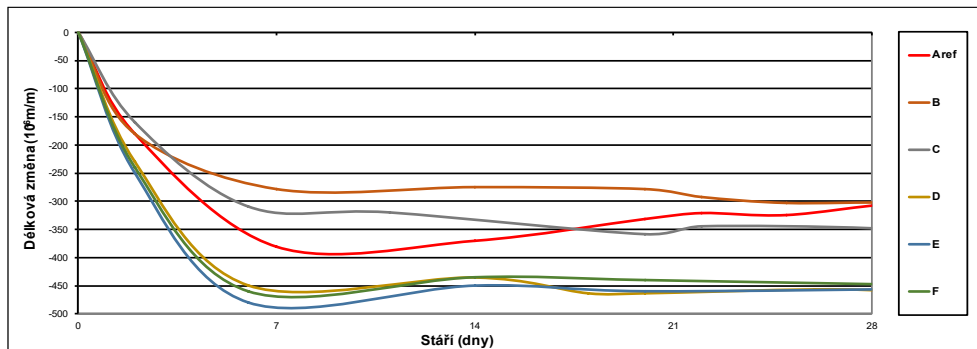
Na následujícím Obr. 33 jsou uvedeny objemové změny vzorků dle základních receptur, které byly hydratovány ve vodním uložení. Z grafu je patrné, že všechny vzorky prošly během prvních 7 dní fází smršťovací a následně začalo docházet ke snižování tohoto smrštění. Nejnižších hodnot dosahovala **receptura B** a **A ref** referenční receptura. Smrštění po 28 dnech zrání se u obou hmot pohybovalo okolo 250-300 $\mu\text{m/m}$



Obr. 33 Stanovení objemových změn trámečkovou metodou ve vodním prostředí během prvních 28 dní hydratace vzorků dle základních receptur

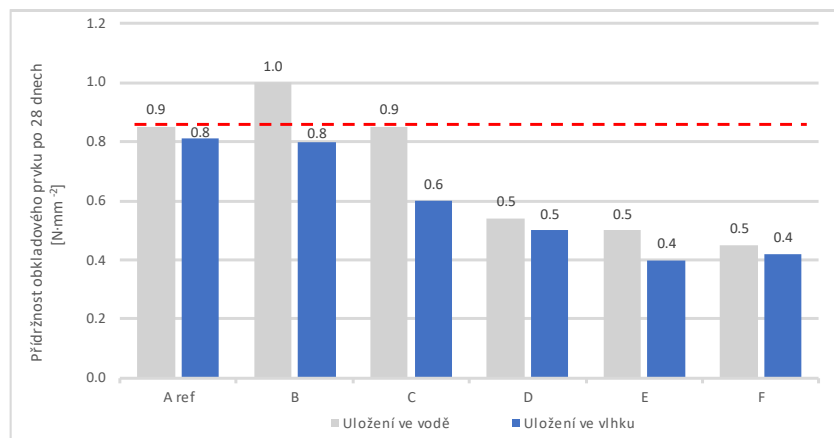
Na následujícím Obr. 34 jsou znázorněny objemové změny vzorků dle základních receptur, které byly uloženy ve vlhkém uložení. Z grafu je patrné, že

smrštění vzorků je vyšší než v případě vodního uložení. Nejnižšího smrštění opět dosahovala **receptura B** a receptura **A ref** s hodnotami smrštění okolo 300 μm .



Obr. 34 Stanovení objemových změn trámečkovou metodou ve vlhkém uložení během prvních 28 dní hydratace vzorků dle základních receptur

Na následujícím Obr. 35 jsou znázorněny hodnoty přídržnosti kompozitů připravených dle referenční receptury a dle základních receptur k hladkým nenasávkavým obkladovým prvkům.

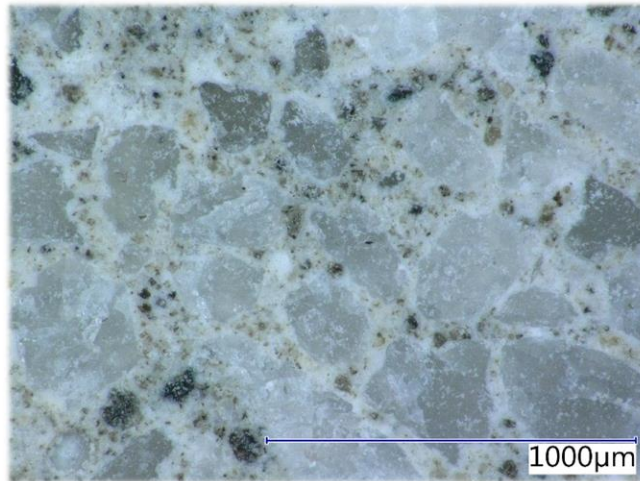


Obr. 35 Přídržnost kompozitů dle základních receptur k hladkým nenasávkavým obkladovým prvkům

Z výše uvedeného vyplývá, že vyšších přídržností dosahovaly vzorky uložené ve vodním uložení. Tyto vzorky zároveň dosahovaly nižších hodnot smrštění, což odpovídá standardnímu chování cementových kompozitů ve vodním uložení. Tímto se částečně potvrzuje předpoklad, který je v rámci práce sledován, že přídržnost cementových a polymer-cementových kompozitů je, mimo jiné, závislá na hydratačních objemových změnách těchto kompozitů.

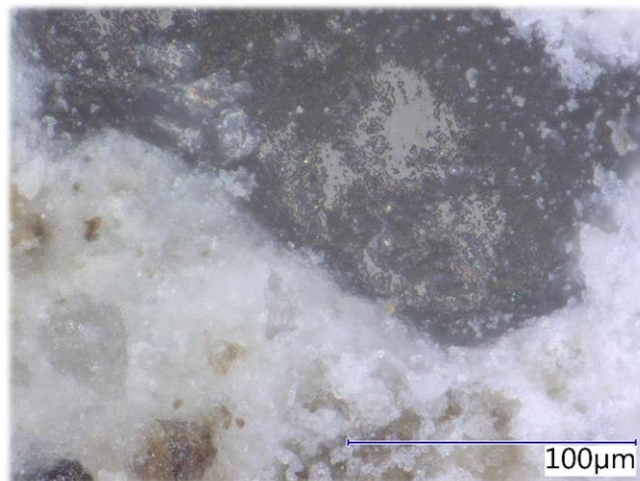
5.1.1.3 MIKROSTRUKTURA VZORKŮ

Na následujících Obr. 36 až Obr. 39 jsou znázorněny detaily mikrostruktury vzorků A ref a B.



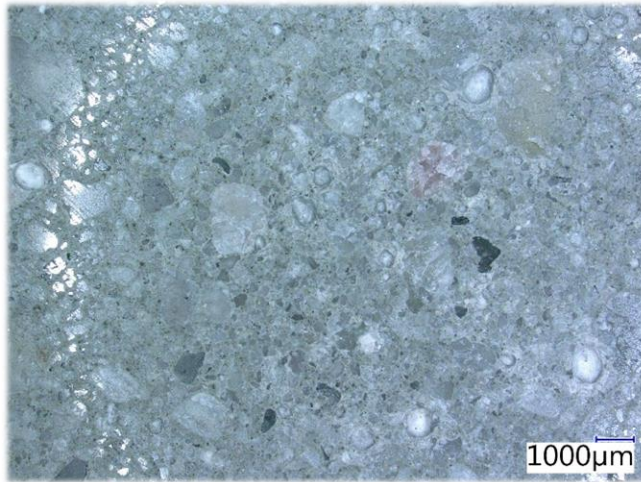
Obr. 36 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury A ref při zvětšení 200x

Na obrázku výše jsou patrná jednotlivá zrna křemenného stavebního písku, která jsou velmi těsně obalena cementovým kamenem. Ze snímku vyplývá, že vzorek má velmi vysokou hutnost a nízkou porozitu.



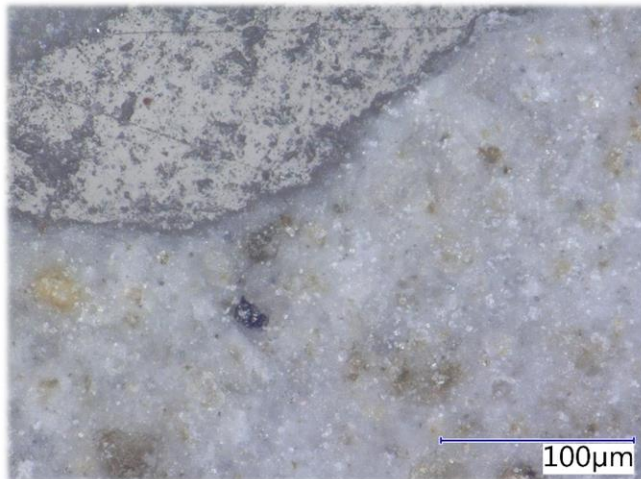
Obr. 37 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury A ref při zvětšení 1500x

Na obrázku výše je znázorněn detail zrna křemenného stavebního písku a tranzitní zóny. Ve struktuře cementového kamene jsou patrná jednotlivá zrnka velmi jemného filleru, který je součástí primárního plniva.



Obr. 38 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B při zvětšení 20x

Na snímku výše je znázorněn detail vzorku dle základní **receptury B**, ve kterém je patrná struktura vzorku s obsahem několika větších pórů o velikosti 600-800 μm.



Obr. 39 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B při zvětšení 1000x

Na výše uvedeném obrázku je znázorněn detail mikrostruktury vzorku dle základní **receptury B**. Na snímku je patrná tranzitní zóna kameniva a cementového kamene. Vzorek dle základní **receptury B** obsahuje kromě cementového pojiva také sráženou neuhlenou mikrosiliku a metakaolin. Na snímku je patrný tmavý shluk mikrosiliky. Ze snímku vyplývá, že tranzitní zóna okolo zrna kameniva je celistvá a vzorek má kromě určitého množství větších pórů velmi vysokou hutnost. Toto se projevilo také velmi vysokými fyzikálně-mechanickými parametry, viz výše v této kapitole.

5.1.2 OPTIMALIZACE ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

V následujících tabulkách a jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a fyzikální parametry vzorků připravených dle základních receptur.

Tab. 47 Přehled parametrů vzorků dle základních receptur z první části I. etapy

Označení	w/c	Konz.	OH		Nasáka- vost	CHRL 100	Obrus
	[-]	Ø [mm]	Ø D _{čB} [kg·m ⁻³]	Ø DZB ₂₈ [kg·m ⁻³]	Ø NV ₂₈ [%]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]
A ref	0.34	135	2330	2300	5.2	472	10.8
B	0.34	130	2310	2270	3.3	309	8.9
C	0.34	135	2240	2200	3.6	294	8
D	0.33	135	2280	2250	3.7	1140	17.44
E	0.33	140	2230	2200	3.6	550	14.9
F	0.32	135	2280	2250	4.8	573	16.5

Tab. 48 Přehled pevnostních charakteristik vzorků dle základních receptur

Označení	Ø Pevnost v tahu za ohybu			Ø Pevnost v tlaku			Přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům	
	[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]	
	7	28	90	7	28	90	Voda	Vlhko
A ref	10.6	11.1	11.4	54	65	72	0.9	0.8
B	13.3	15.2	15.7	58	78	88	1.0	0.8
C	8.8	9.6	10.4	53	69	78	0.9	0.6
D	10.8	11.2	11.5	49	66	74	0.5	0.5
E	10.1	10.5	11.8	53	72	78	0.5	0.4
F	11.2	11.2	11.4	50	60	68	0.5	0.4

Optimalizační proces úpravy složení referenční receptury pro návrh základních receptur a následná volba optimalizované varianty byla provedena pomocí optimalizačních metod které jsou popsány v této kapitole.

Jako rozhodující vlastnosti pro volbu optimalizované varianty byly zvoleny tyto klíčové vlastnosti:

- Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu (po 28 dnech zrání)
- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu za ohybu
- Nasákavost
- Přídržnost
- Odolnost proti působení CHRL
- Cena

Vyhodnocení bylo provedeno metodou multikriteriálního srovnání. Váhy jednotlivých kritérií $f_i [-]$ byly stanoveny metodou párového srovnání. Následně byla provedena volba požadavku pro dané kritérium, viz následující Tab. 49, ve které je uvedeno, zda je u daného kritéria požadavek na maximalizaci, či minimalizaci dané hodnoty [84; 85].

Tab. 49 Volba kritérií - vlastností základních receptur

Pořadí	Kritérium - Parametr	Jednotka	Optimum
1	Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu	kg/m ³	MAX
2	Pevnost v tlaku	MPa	MAX
3	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	MAX
4	Nasákavost	hm. %	MIN
5	Přídržnost	MPa	MAX
6	Odolnost proti působení CHRL	g/m ²	MIN
7	Cena	Kč/kg	MIN
8	Objemové změny ve vlhku po 28 dnech	μm/m	MIN
9	Chemické smrštění po 72 h hydratace	%	MIN

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny rozhodné parametry. Mezi tyto patřila také cena za 1 kilogram suché směsi. Výpočet ceny jednotlivých receptur byl proveden na základě velkoobchodních cen bez DPH.

Dle výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matrice A_{ij} , která obsahuje jednotlivé fyzikálně-mechanické parametry vzorků vyrobených dle základních receptur. Viz Tab. 50

Tab. 50 Rozhodovací matrice A_{ij} pro základní receptury

Ozn. Receptury	Parametr								
	OH	Tlak	Tah	Nasá-kavost	Přídrž-nost	CHRL	Cena	Obj. změny - vlhko	Chem. smrštění
	D_{ZB} [kg/m ³]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	NV_{28} [%]	σ_f [MPa]	[g/m ²]	[Kč]	[μm/m]	[%]
A ref	2300	72	11.4	5.2	0.8	472	2.9	-303.0	-0.15
B	2270	88	15.7	3.3	0.8	309	3.6	-302.0	-0.14
C	2200	78	10.4	3.6	0.6	294	3.6	-348.1	-0.16
D	2250	74	11.5	3.7	0.5	1140	3.4	-460.0	-0.22
E	2200	78	11.8	3.6	0.4	550	3.8	-455.0	-0.24
F	2250	68	11.4	4.8	0.4	573	3.1	-450.0	-0.25

Rozhodovací matice A_{ij} byla následně transformována pomocí následujících vzorců na rovnici B_{ij} [84; 85]:

- Výpočet MINima:
$$b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$
- Výpočet MAXima:
$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN(a_{ij})}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$

Transformace výše uvedené matice proběhla na základě stanovení kritérií vlastností uvedených v Tab. 49, které byly určeny jako rozhodné pro polymer-cementové kompozity. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v Tab. 51.

Tab. 51 Transformovaná matice B_{ij} pro základní receptury

Ozn. Receptury	Kritérium - Parametr								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A ref	1	0.2	0.19	0	1.00	0.79	1	0.99	0.91
B	0.7	1	1	1	0.98	0.98	0.22	1	1
C	0	0.5	0	0.84	0.49	1	0.29	0.71	0.82
D	0.5	0.3	0.21	0.79	0.24	0	0.49	0	0
E	0	0.5	0.26	0.84	0.00	0.70	0	0.03	0.09
F	0.5	0	0.19	0.21	0.05	0.67	0.78	0.06	0.00

V následující Tab. 52 je vysvětlení jednotlivých vah, které jsou následně přiřazeny jednotlivým kritériím v Tab. 53.

Tab. 52 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku

Číslo	Porovnání kritérií
1	Rovnocenná kritéria
3	Slabě preferované kritérium
5	Silně preferované kritérium
7	Velmi silně preferované kritérium
9	Absolutní preference kritéria

Dle metody kvantitativního párového srovnání byla stanovena váha jednotlivých kritérií. Následně byla pro výpočet použita Saatyho matice viz Tab. 53. V této tabulce je výpočtem stanovena váha i -tého kritéria f_i [-] z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kriterií s_{ij} [-] pomocí následujících vzorců [84; 85]:

- $S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij}$
- $R_{ij} = (s_{ij})^n$
- $f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$

Tab. 53 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro základní receptury

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	1	5	4	5	5	5	3	5	4	
2	0.2	1	0.8	1	1.5	0.7	0.6	1.5	1.5	
3	0.25	1.25	1	1	1.5	0.8	0.6	1.5	1.5	
4	0.2	1	1	1	2	1	1	1.1	1.1	
5	0.2	0.67	0.67	0.50	1	1	1	1	1	
6	0.2	1.43	1.25	1	1	1	1	1.5	1.5	

7	0.33	1.67	1.67	1	1	1	1	1.5	1.5	
8	0.2	0.67	0.67	0.91	1	0.67	0.67	1	1	
9	0.25	0.67	0.67	0.91	1	0.67	0.67	1	1	
S_i	0.00	4.41	1.98	2.07	22.50	1.24	0.48	27.84	22.28	
R_i	0.00	0.49	0.22	0.23	2.50	0.14	0.05	3.09	2.48	9.199
f_i	0.00	0.05	0.02	0.02	0.27	0.02	0.01	0.34	0.27	1

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejdůležitějším kritériem s nejvyšší vahou je přídržnost, objemové změny a následně pevnost v tlaku. Posledním krokem výpočtu je sestavení výpočtové matice C_{ij} uvedené v Tab. 54, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} a váhami jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 54 Výpočtová matice C_{ij} pro základní receptury

	Kritérium - Parametr										%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ	
A ref	0.000	0.011	0.005	0.000	0.272	0.012	0.006	0.334	0.245	0.883	88.34
B	0.000	0.053	0.024	0.025	0.265	0.015	0.001	0.336	0.269	0.989	98.86
C	0.000	0.027	0.000	0.021	0.133	0.015	0.002	0.238	0.220	0.655	65.53
D	0.000	0.016	0.005	0.020	0.066	0.000	0.003	0.000	0.073	0.183	18.31
E	0.000	0.027	0.006	0.021	0.000	0.010	0.000	0.011	0.024	0.100	9.95
F	0.000	0.000	0.005	0.005	0.013	0.010	0.005	0.021	0.000	0.059	5.89

Na základě výpočtové matice v Tab. 54 byla jako optimální základní receptura zvolena varianta B. Tato obsahuje složení viz Tab. 46 tohoto dokumentu. Ta bude následně použita v následující části této etapy.

5.1.3 SHRNUÍ A VYHODNOCENÍ PRVNÍ ČÁSTI ETAPA II. – ZÁKLADNÍ RECEPTURY

V rámci první části II. etapy byl proveden návrh referenční receptury. Složení receptury bylo následně upraveno za pomoci primárních příměsí. Mezi ně patřil metakaolin, srážená neuhněná mikrosilika a mikromletý vápenec. Na základě substituce primárního pojiva a portlandského cementu, těmito příměsemi vzniklo 6 základních receptur, u nichž byly stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti po 7, 28 a 90 dnech zrání. Na základě výsledků byla zvolena pro další řešení práce receptura **B** obsahující substituci portlandského cementu sráženou neuhněnou mikrosilikou a metakaolinem v celkovém množství 17 hm.%.

Vybraná/zvolená receptura bude použita v rámci následující části II. etapy pro substituci plnivových a pojivových složek druhotnými a alternativními surovinami.

5.2 NÁVRH RECEPTUR S OBSAHEM DRUHOTNÝCH A ODPADNÍCH SUROVIN

V předchozí části II. etapy byla zvolena receptura s nejvyššími fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, která byla následně v rámci druhé části této etapy modifikována substitucí plnivové a pojivové složky pomocí druhotných surovin uvedených v kapitole 4.5 *Druhotné suroviny* tohoto dokumentu. Navržené receptury PMCC se substitucí pojivových a plnivových složek jsou uvedeny Tab. 55.

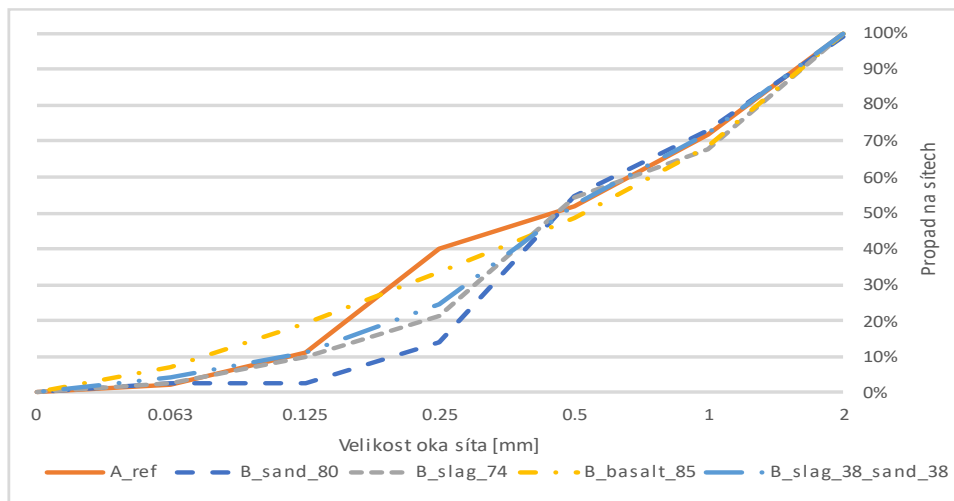
Tab. 55 Receptury PMCC s druhotnými a odpadními surovinami

Označení receptury	Použitá druhotná surovina	Primární pojivo [hm.%]	Druhotné pojivo [hm.%]	Primární plnivo [hm.%]	Druhotné plnivo [hm.%]
B_perlit_10		90	10	100	0
B_perlit_20	Odpadní perlit	80	20	100	0
B_perlit_30		70	30	100	0
B_HFA_20		80	20	100	0
B_HFA_30	Vysokoteplotní popílek	70	30	100	0
B_HFA_40		60	40	100	0
B_glass_20		80	20	100	0
B_glass_30	Odpadní obalové sklo	70	30	100	0
B_glass_40		60	40	100	0
B_oving_20		80	20	100	0
B_oving_30	Odpadní skelný roving	70	30	100	0
B_oving_40		60	40	100	0
B_slag_74	Škvára	100	0	26	74
B_sand_80	Slév. písek	100	0	20	80
B_basalt_85	Odp. čedič	100	0	15	85
B_slag_38_sand_38	Slév. písek + El. škvára	100	0	23	77
B_basalt_41_sand_41	Odp. čedič + Slév. Písek	100	0	18	82
B_basalt_40_slag_40	Odp. čedič + El. Škvára	100	0	21	79
B_sand_27_slag_27_basalt_27	Slév. písek + El. škvára + Odp. čedič	100	0	20	80
B_basalt_85_glass_20	Odp. čedič + odp. obalové sklo	80	20	15	85
B_basalt_85_glass_30		70	30	15	85
B_basalt_85_HFA_20	Odp. čedič +	80	20	15	85
B_basalt_85_HFA_30	Vysokoteplotní popílek	70	30	15	85

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny jednotlivé receptury modifikující základní recepturu **B** substitucí pojivových a plnivových složek v maximální možné míře. Dle stanovené metodiky byla testována substituce pojivové složky –

portlandského cementu v množství 20-40 hm.%. Substituce primární plnivové složky probíhala v množství až 85 hm.%. Jednotlivé druhotné suroviny jsou popsány v kapitole 4.5 *Druhotné suroviny* tohoto dokumentu.

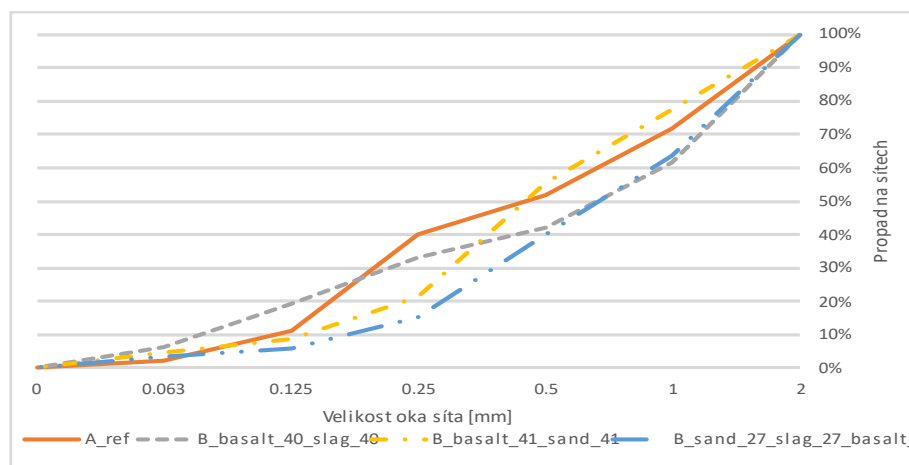
V následujících grafech na obrázcích Obr. 40 a Obr. 41 jsou uvedeny jednotlivé křivky zrnitosti, které byly použity při přípravě druhotných surovin pro zajištění plynulé křivky zrnitosti blížící se původnímu návrhu, viz Obr. 25.



Obr. 40 Křivky zrnitosti druhotných a odpadních plniv

Na výše uvedeném grafu jsou uvedeny křivky druhotných plniv. Označení jednotlivých křivek je shodné s označením receptur viz Tab. 55. Jedná se o křivky plniv složené z druhotných surovin, jejichž granulometrie byla optimalizována pro zajištění křivky zrnitosti významně se podobající křivce zrnitosti referenční receptury.

Na následujícím obrázku Obr. 41 jsou uvedeny zbylé křivky zrnitosti pro směsná plniva po optimalizaci granulometrie.



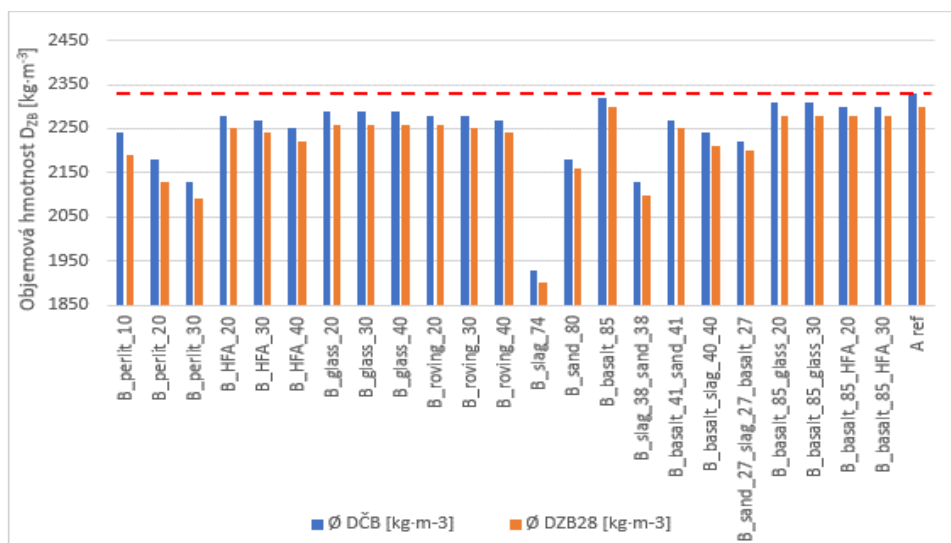
Obr. 41 Křivky zrnitosti druhotných a odpadních plniv

5.2.1 TESTOVÁNÍ RECEPTUR S OBSAHEM DRUHOTNÝCH A ODPADNÍCH SUROVIN

Vlastnosti čerstvých a ztvrdlých směsí byly testovány dle navržené metodiky etapy II. viz Obr. 6. V následujících grafech na obrázcích Obr. 42 až Obr. 47 jsou vyobrazeny výsledky testování základních fyzikálně-mechanických parametrů základních receptur.

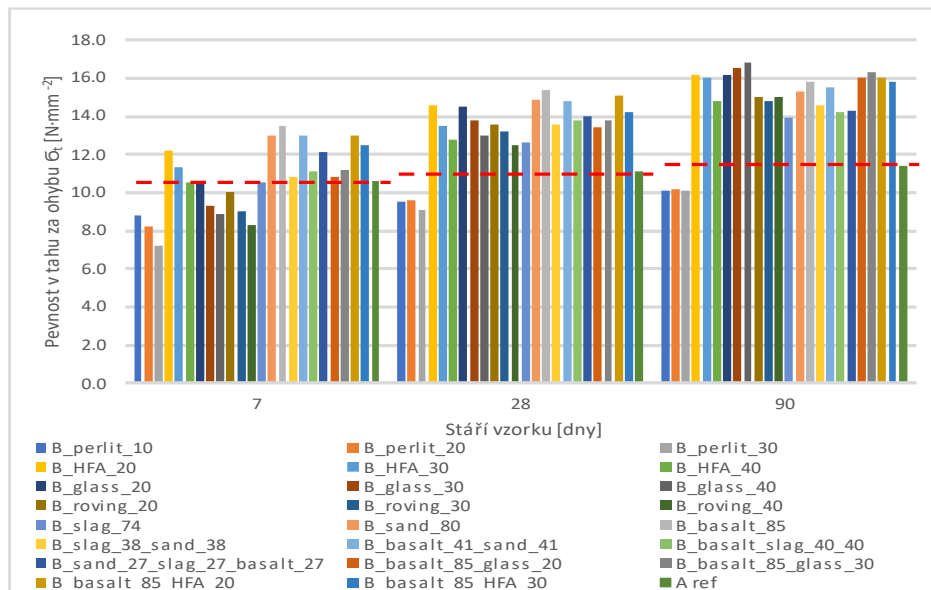
5.2.1.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY

Na následujícím grafu na Obr. 42 jsou znázorněny objemové hmotnosti čerstvých a ztvrdlých směsí (po 28 dnech zrání).



Obr. 42 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

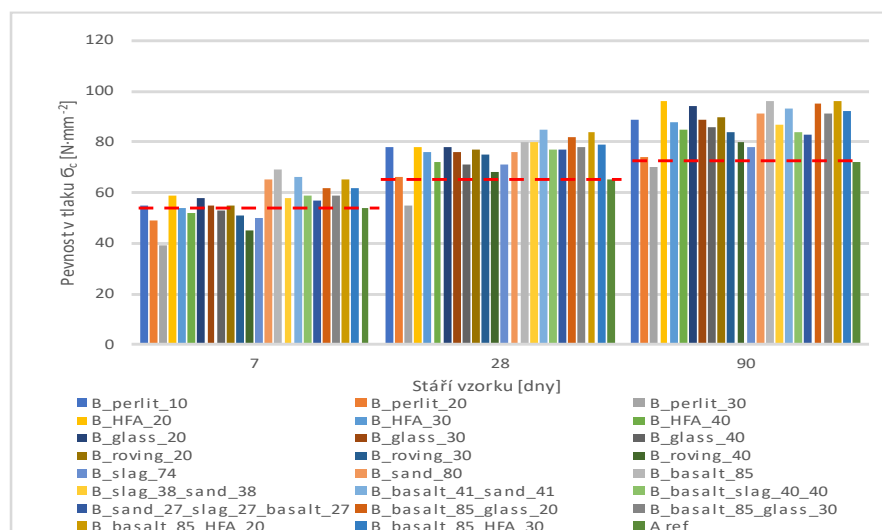
Z výše uvedeného vyplývá, že obecně docházelo ke snížení objemové hmotnosti v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu. Toto je způsobeno rozdílnou objemovou hmotností druhotných surovin a primárního pojiva a portlandského cementu. Nejnižších hodnot dosahovaly suroviny perlit a struska, u kterých bylo nutno zvýšit množství záměsové vody pro zajištění vhodné konzistence.



Obr. 43 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Z výše uvedeného je zřejmé, že použití druhotných surovin mělo významný vliv na hodnoty pevností v tahu za ohybu připravených vzorků. Především v pozdějších fázích hydratace po 28 a 90 dnech zrání.

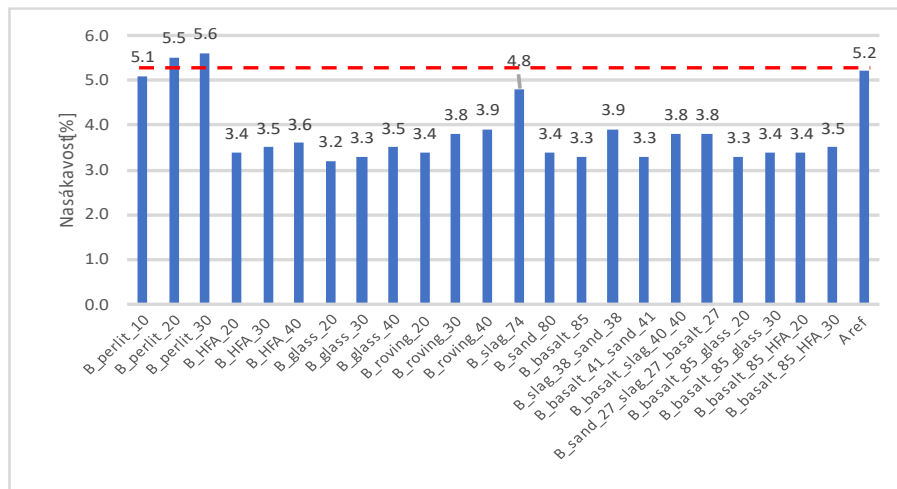
Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky obsahující substituci pojiva odpadním obalovým sklem v dávce 40 hm.% a vzorky obsahující substituci plniva odpadem z výroby taveného čediče.



Obr. 44 Pevnost v tlaku vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

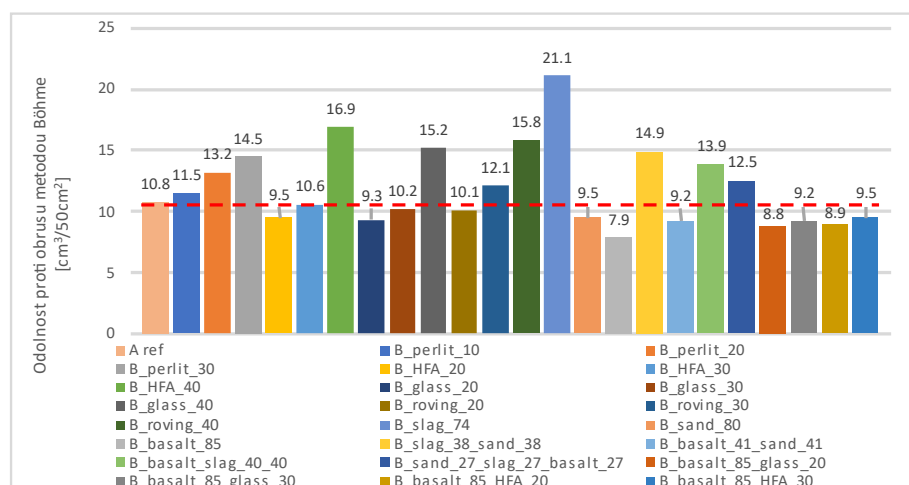
Pevnost v tlaku vzorků byla ovlivněna podobně jako pevnost v tahu za ohybu. Pozitivní vlastnosti pucolánově aktivních druhotných surovin se projevila po 28 a 90 dnech zrání. Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky obsahující substituci pojiva 20 hm.% vysokoteplotním popílkem či odpadním obalovým sklem a v případě

substituce plniva dosahovaly nejvyšších hodnot vzorky s obsahem odpadu z výroby taveného čediče.



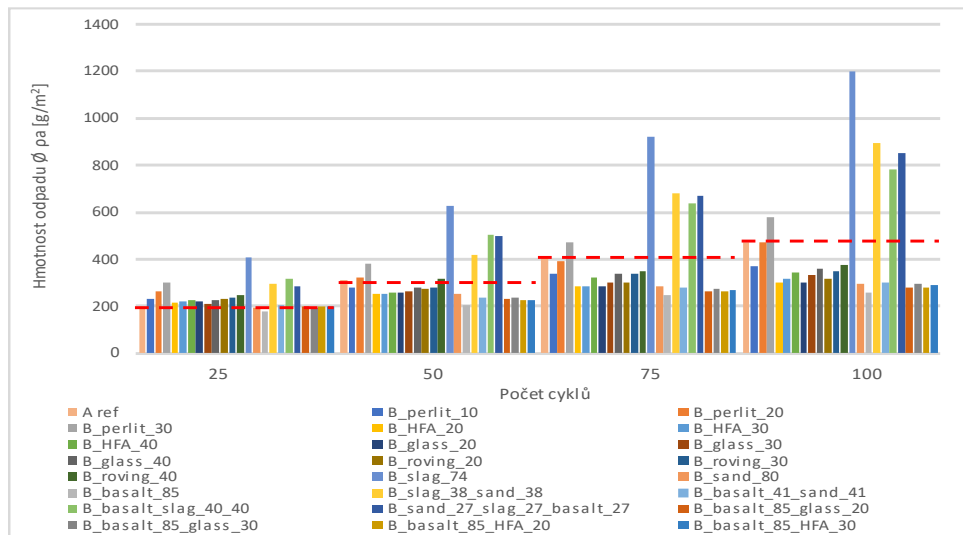
Obr. 45 Nasákavost vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Substituce pojiv ovlivnila pozitivně nasákavost vzorků po 28 dnech, a to nejvíce u vzorků obsahující odpadní obalové sklo a odpadní popílek v dávce 20 hm.%. V případě substituce plniv došlo k nejvyššímu pozitivnímu efektu v případě vzorků obsahujících odpad z výroby taveného čediče.



Obr. 46 Odolnost proti obrusu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Vyšší dávka substitučních pojiv způsobovala snížení odolnosti proti obrusu vzorků. Vyšší odolnosti po 28 dnech zrání dosahovaly vzorky obsahující substituci pojiva odpadním obalovým sklem či vysokoteplotním popílkem v dávce 20 a 30 hm.%. Vyšší odolnost proti obrusu také způsobovaly vzorky obsahující substituci plniva odpadem z výroby taveného čediče, či pískem s vodním sklem.

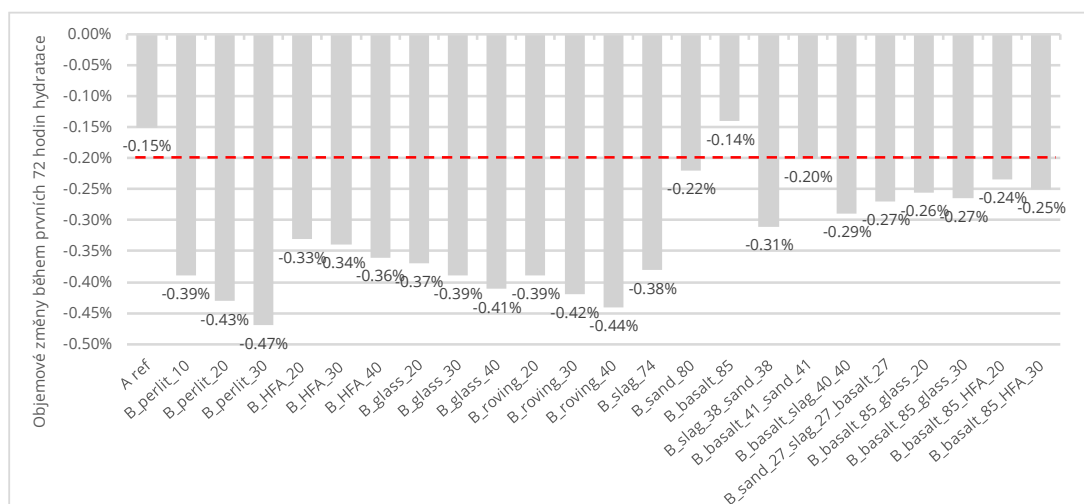


Obr. 47 Odolnost proti působení CHRL vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Většina substitucí pojiv měla pozitivní vliv na odolnost proti působení CHRL po 50-100 cyklech zatěžování. Výrazné snížení odolnosti proti působení CHRL bylo zaznamenáno u vzorků obsahujících odpadní strusku. Toto je způsobeno především vysokou nasákovostí daného plniva a obsahem nečistot a nehomogenit.

5.2.1.2 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY

Na následujícím Obr. 48 je zobrazeno srovnání chemického smrštění jednotlivých vzorků s obsahem druhotných pojiv či plniv během prvních 72 hodin hydratace.



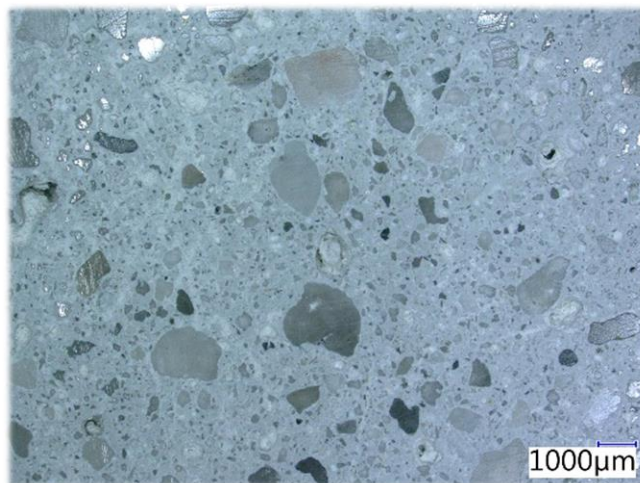
Obr. 48 Objemové změny během prvních 72 hodin hydratace vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Kromě substituce plniva odpadem z výroby obalového skla dosahovaly všechny vzorky se substitucí pojiva či plniva vyššího smrštění než vzorky podle

referenční receptury. Toto je dáno především změnou dávky záměsové vody, ale také rovněž díky odlišnému způsobu průběhu hydratace oproti hydratačnímu procesu portlandského cementu. Z grafu vyplývá, že nejnižších hodnot chemického hydratačního smrštění během prvních 72 hodin hydratace vykazovaly – v případě substituce plniv – vzorky dle receptury B_basalt_85 s 85 hm.% substitucí plnivové složky odpadem z výroby obkladových prvků z taveného čediče. V případě substituce pojivové složky dosahovaly nejnižších hodnot vzorky dle receptury B_HFA_20 a B_HFA_30 s obsahem 20 hm.% či 30 hm.% substituce pojivové složky vysokoteplotním popílkem. Naopak je z grafu patrné, že při použití jemně mletého odpadního perlitu dochází k výraznému zvýšení chemického smrštění během hydratačního procesu.

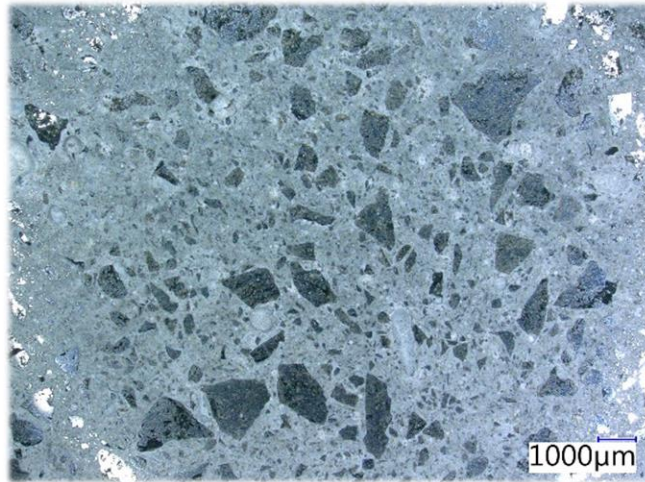
5.2.1.3 MIKROSTRUKTURA VZORKŮ A XRD

Na následujících Obr. 49 až Obr. 52 jsou zobrazeny detaily mikrostruktury vzorků vyrobených dle základní receptury B s obsahem druhotných surovin.



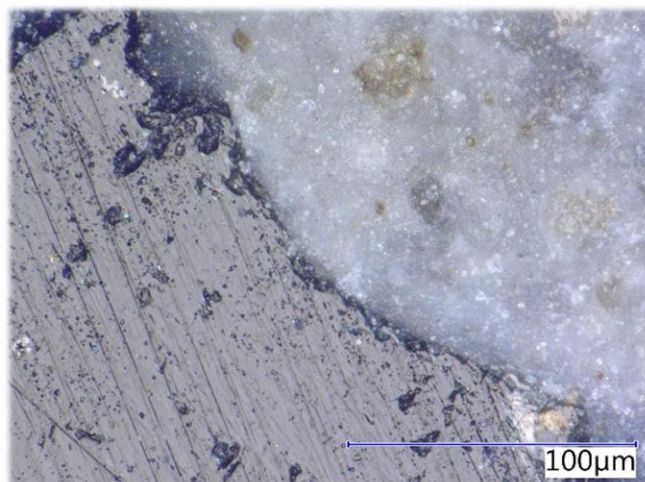
Obr. 49 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Glass_30 při zvětšení 20x

Na výše uvedeném snímku vzorku **B_Glass_30** s obsahem 30% hm. substituce cementu jemně mletým odpadním obalovým sklem je patrná distribuce zrn stavebního písku o frakci 1-2 mm, které jsou rovnoměrně rozprostřeny strukturou vzorku. Na snímku nejsou viditelné kaverny či póry.



Obr. 50 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur *B_basalt_85* při zvětšení 20x

Na výše uvedeném snímku vzorku **B_basalt_85** s obsahem 85% hm. substituce plnivové složky odpadem z výroby obkladových prvků z taveného čediče je patrná rovnoměrná distribuce jednotlivých zrn plniva v cementové matrici. Na snímku je patrné, že drcený odpad z výroby prvků z taveného čediče má výrazně vyšší tvarový index, než primární stavební křemenný písek.



Obr. 51 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur *B_basalt_85_glass_30* při zvětšení 1500x

Na výše uvedeném snímku je detail vzorku **B_basalt_85_glass_30** s 85% hm. substitucí plnivové složky odpadem z výroby obkladových prvků z taveného čediče a 30% hm. substitucí portlandského cementu jemně mletým obalovým sklem. Na snímku je viditelný řez zrnem čedičového plniva, tranzitní zóna styku zrna plniva a cementové matrice ve které jsou patrná zrna filleru z plniv. Opět je viditelná neporušená a velmi hutná struktura kompozitu.

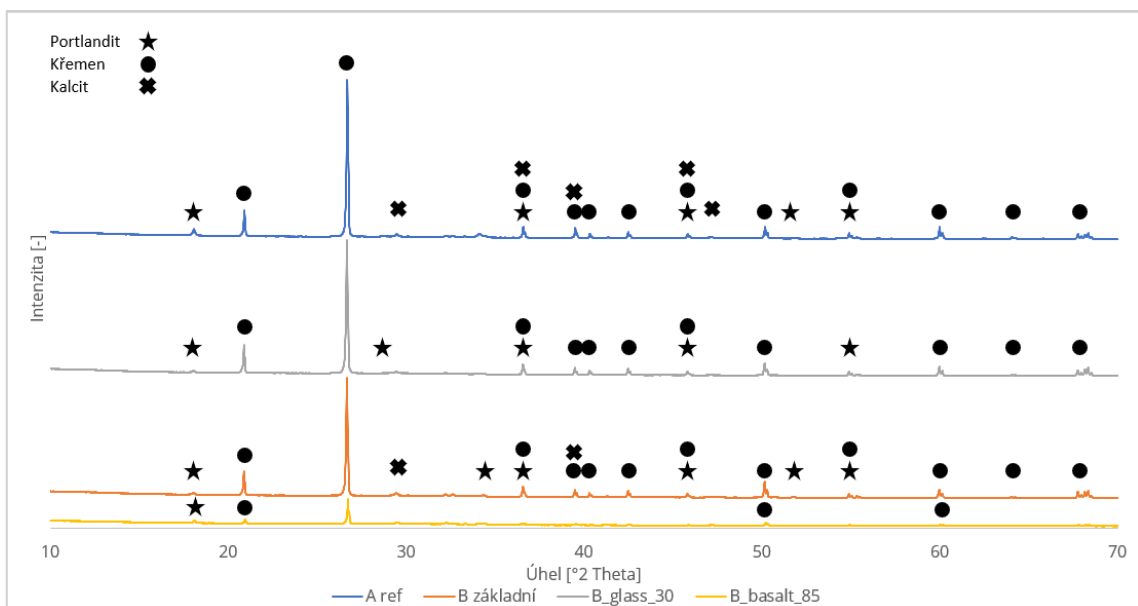


Obr. 52 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Glass_30 při zvětšení 2000x

Na výše uvedeném snímku vzorku **B_Glass_30** s obsahem 30% hm. substituce portlandského cementu jemně mletým obalovým sklem je znázorněno částečně zbroušené zrno křemenného stavebního písku a detail tranzitní zóny tohoto zrna plniva s cementovou maticí ve které jsou patrné stopy fillerů. Na snímku je opět pozorovatelná hutná struktura kompozitu.

U vzorků obsahujících druhotné či odpadní suroviny byla provedena také rentgenová difrakční analýza (XRD) pro stanovení kvalitativního mineralogického složení.

Na následujícím Obr. 53 je znázorněno srovnání záznamů z XRD analýzy vybraných vzorků dle receptur navrhovaných v první etapě.



Obr. 53 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků z II. etapy

Na výše uvedeném obrázku je provedeno srovnání jednotlivých záznamů z XRD analýzy vzorků dle receptur z I. etapy práce. Z grafu vyplývá, že vzorky referenční, **A ref** obsahují jako jediné stopy kalcitu a zároveň, ze všech vzorků, vykazují nejsilnější intenzitu křemene a portlanditu.

Vzorky dle základní optimalizované **B** receptury s obsahem mikrosiliky a metakaolinu již neobsahují kalcit a obsahují výrazně menší zastoupení portlanditu. Předpokladem je, že portlandit vznikající během hydratačního procesu cementu zreagoval s pucolánovými přísadami (mikrosilika a metakaolin) na mineralogické novotvary, které nejsou ve své formě na XRD analýze patrné.

Podobná situace nastala také u vzorků dle receptury **B_glass_30** s obsahem 30% hm. substituce pojivové složky jemně mletým odpadním sklem. Zde je také zobrazeno velmi nízké množství portlanditu a je výrazné zastoupení křemene.

V případě vzorků dle receptury **B_basalt_85** s 85% hm. substitucí plnivové složky odpadem z výroby prvků z taveného čediče je patrné velmi nízké množství křemene. V daném vzorku již není křemenný stavební písek, ale plnivo se skládá z 85 hm.% z čediče a z 15 hm.% z křemenné moučky. Zároveň je však viditelné také velmi nízké zastoupení portlanditu a je předpoklad, že jemný filler čedičových odkapů zreagoval, z důvodu vysoké pucolánové aktivity skelné fáze čedičových odkapů, částečně zreagoval s volným portlanditem na novotvary které nejsou na záznamu zobrazeny.

5.2.2 OPTIMALIZACE RECEPTUR S OBSAHEM DRUHOTNÝCH A ODPADNÍCH SUROVIN

V následujících tabulkách Tab. 56 a Tab. 57 jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a fyzikální parametry vzorků připravených dle receptur se substitucí pojivových a/nebo plnivových složek, které jsou následně použity v optimalizačním výpočtu, který je uveden v následujících odstavcích.

Tab. 56 Přehled fyzikálně-mechanických parametrů vzorků s druhotnými či odpadními surovinami z druhé části II. etapy

Označení	w/c	Konz.	OH		Nasáka- vost	CHRL 100	Obrus
	[-]	Ø [mm]	Ø D _{CB} [kg·m ⁻³]	Ø DZB ₂₈ [kg·m ⁻³]	Ø NV ₂₈ [%]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]
A ref	0.34	135	2330	2300	5.2	472	
B	0.34	130	2310	2270	3.3	309	10.8
B_perlit_10	0.39	130	2240	2190	5.1	370	8.9
B_perlit_20	0.41	130	2180	2130	5.5	470	11.5
B_perlit_30	0.44	135	2130	2090	5.6	580	13.2
B_HFA_20	0.34	130	2280	2250	3.4	301	14.5
B_HFA_30	0.34	135	2270	2240	3.5	320	9.5
B_HFA_40	0.35	130	2250	2220	3.6	345	10.6
B_glass_20	0.34	135	2290	2260	3.2	300	16.9
B_glass_30	0.34	130	2290	2260	3.3	332	9.3
B_glass_40	0.33	130	2290	2260	3.5	360	10.2
B_roving_20	0.35	135	2280	2260	3.4	315	15.2
B_roving_30	0.36	130	2280	2250	3.8	350	10.1
B_roving_40	0.37	135	2270	2240	3.9	375	12.1
B_slag_74	0.40	130	1930	1900	4.8	1200	15.8
B_sand_80	0.35	135	2180	2160	3.4	295	21.1
B_basalt_85	0.33	130	2320	2300	3.3	258	9.5
B_slag_38_sand_38	0.39	135	2130	2100	3.9	897	7.9
B_basalt_41_sand_41	0.34	130	2270	2250	3.3	301	14.9
B_basalt_slag_50_50	0.39	140	2240	2210	3.8	782	9.2
B_sand_27_slag_27_basalt_27	0.37	140	2220	2200	3.8	853	13.9
B_basalt_85_glass_20	0.34	135	2310	2280	3.3	279	12.5
B_basalt_85_glass_30	0.35	135	2310	2280	3.4	295	8.8
B_basalt_85_HFA_20	0.34	130	2300	2280	3.4	280	9.2
B_basalt_85_HFA_30	0.35	130	2300	2280	3.5	289	8.9

Tab. 57 Přehled pevnostních charakteristik vzorků dle základních receptur

Označení	Ø Pevnost v tahu za ohybu [N·mm ⁻²]			Ø Pevnost v tlaku [N·mm ⁻²]		
	7	28	90	7	28	90
A ref	10.6	11.1	11.4	54	65	72
B	13.3	15.2	15.7	58	78	88
B_perlit_10	8.8	9.5	10.1	55	78	89
B_perlit_20	8.2	9.6	10.2	49	66	74
B_perlit_30	7.2	9.1	10.1	39	55	70
B_HFA_20	12.2	14.6	16.2	59	78	96
B_HFA_30	11.3	13.5	16	54	76	88
B_HFA_40	10.5	12.8	14.8	52	72	85
B_glass_20	10.6	14.5	16.2	58	78	94
B_glass_30	9.3	13.8	16.5	55	76	89
B_glass_40	8.9	13	16.8	53	71	86
B_roving_20	10	13.6	15	55	77	90
B_roving_30	9	13.2	14.8	51	75	84
B_roving_40	8.3	12.5	15	45	68	80
B_slag_74	10.5	12.6	13.9	50	71	78
B_sand_80	13	14.9	15.3	65	76	91
B_basalt_85	13.5	15.4	15.8	69	80	96
B_slag_38_sand_38	10.8	13.6	14.6	58	80	87
B_basalt_41_sand_41	13	14.8	15.5	66	85	93
B_basalt_slag_50_50	11.1	13.8	14.2	59	77	84
B_sand_27_slag_27_basalt_27	12.1	14	14.3	57	77	83
B_basalt_85_glass_20	10.8	13.4	16	62	82	95
B_basalt_85_glass_30	11.2	13.8	16.3	59	78	91
B_basalt_85_HFA_20	13	15.1	16	65	84	96
B_basalt_85_HFA_30	12.5	14.2	15.8	62	79	92

Optimalizační proces úpravy složení receptur s obsahem druhotných či odpadních surovin a následná volba optimalizovaných variant byla provedena pomocí optimalizačních metod, které jsou popsány v této kapitole.

Jako rozhodující vlastnosti pro volbu optimalizované varianty byly zvoleny tyto klíčové vlastnosti:

- Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu
- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu za ohybu
- Nasákavost
- Odolnost proti působení CHRL
- Odolnost proti obrusu
- Chemické smrštění po 72 h hydratace
- Výše substituce primární suroviny

Vyhodnocení bylo provedeno metodou multikriteriálního srovnání. Váhy jednotlivých kritérií $f_i [-]$ byly stanoveny metodou párového srovnání. Následně byla provedena volba požadavku pro dané kritérium, viz následující Tab. 58, ve které je uvedeno, zda je u daného kritéria požadavek na maximalizaci, či minimalizaci dané hodnoty [84; 85].

Tab. 58 Volba kritérií - vlastností vzorků s druhotnými či odpadními surovinami

Pořadí	Kritérium - Parametr	Jednotka	Optimum
1	Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu	kg/m ³	MAX
2	Pevnost v tlaku	MPa	MAX
3	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	MAX
4	Nasákavost	hm. %	MIN
5	Odolnost proti působení CHRL	g/m ²	MIN
6	Odolnost proti obrusu	cm ³ /50cm ²	MIN
7	Chemické smrštění po 72 h hydratace	%	MIN
8	Výše substituce primární suroviny	hm. %	MAX

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny rozhodné parametry. Dle výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matrice A_{ij} , která obsahuje jednotlivé fyzikálně-mechanické parametry vzorků vyrobených dle receptur s druhotnými či odpadními surovinami. Viz Tab. 59

Tab. 59 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami

Ozn. Receptury	Parametr							
	OH	Tlak	Tah	Nasá- kavost	CHRL	Obrus	Chem. smrště- ní	Míra substitu- ce poj.+pln.
	D_{ZB} [kg/m ³]	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	NV_{28} [%]	[g/m ²]	[cm ³ /50cm ²]	[%]	[hm. %]
B_perlit_10	2190	89	10.1	5.1	370	11.5	-0.39	10
B_perlit_20	2130	74	10.2	5.5	470	13.2	-0.43	20
B_perlit_30	2090	70	10.1	5.6	580	14.5	-0.47	30
B_HFA_20	2250	96	16.2	3.4	301	9.5	-0.33	20
B_HFA_30	2240	88	16.0	3.5	320	10.6	-0.34	30
B_HFA_40	2220	85	14.8	3.6	345	16.9	-0.36	40
B_glass_20	2260	94	16.2	3.2	300	9.3	-0.37	20
B_glass_30	2260	89	16.5	3.3	332	10.2	-0.39	30
B_glass_40	2260	86	16.8	3.5	360	15.2	-0.41	40
B_roving_20	2260	90	15.0	3.4	315	10.1	-0.39	20
B_roving_30	2250	84	14.8	3.8	350	12.1	-0.42	30
B_roving_40	2240	80	15.0	3.9	375	15.8	-0.44	40
B_slag_74	1900	78	13.9	4.8	1200	21.1	-0.38	74
B_sand_80	2160	91	15.3	3.4	295	9.5	-0.22	80

B_basalt_85	2300	96	15.8	3.3	258	7.9	-0.14	85
B_slag_38_sand_38	2100	87	14.6	3.9	897	14.9	-0.31	77
B_basalt_41_sand_41	2250	93	15.5	3.3	301	9.2	-0.20	82
B_basalt_slag_50_50	2210	84	14.2	3.8	782	13.9	-0.29	79
B_sand_27_slag_27_basalt_27	2200	83	14.3	3.8	853	12.5	-0.27	80
B_basalt_85_glass_20	2280	95	16.0	3.3	279	8.8	-0.26	105
B_basalt_85_glass_30	2280	91	16.3	3.4	295	9.2	-0.27	115
B_basalt_85_HFA_20	2280	96	16.0	3.4	280	8.9	-0.24	105
B_basalt_85_HFA_30	2280	92	15.8	3.5	289	9.5	-0.25	115

Rozhodovací matice A_{ij} byla následně transformována pomocí následujících vzorců na rovnici B_{ij} [84; 85]:

- Výpočet MINima:
$$b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$
- Výpočet MAXima:
$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN(a_{ij})}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$

Transformace výše uvedené matice proběhla na základě stanovení kritérií vlastností uvedených v Tab. 58, které byly stanoveny jako rozhodné pro polymer-cementové kompozity. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v Tab. 60.

Tab. 60 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami

Ozn. Receptury	Kritérium - Parametr								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
B_perlit_10	0.73	0.73	0.00	0.21	0.88	0.73	0.24	0.00	
B_perlit_20	0.58	0.15	0.01	0.04	0.77	0.60	0.12	0.33	
B_perlit_30	0.48	0.00	0.00	0.00	0.66	0.50	0.00	0.67	
B_HFA_20	0.88	1.00	0.91	0.92	0.95	0.88	0.42	0.33	
B_HFA_30	0.85	0.69	0.88	0.88	0.93	0.80	0.39	0.67	
B_HFA_40	0.80	0.58	0.70	0.83	0.91	0.32	0.33	1.00	
B_glass_20	0.90	0.92	0.91	1.00	0.96	0.89	0.30	0.33	
B_glass_30	0.90	0.73	0.96	0.96	0.92	0.83	0.24	0.67	
B_glass_40	0.90	0.62	1.00	0.88	0.89	0.45	0.18	1.00	
B_roving_20	0.90	0.77	0.73	0.92	0.94	0.83	0.24	0.33	
B_roving_30	0.88	0.54	0.70	0.75	0.90	0.68	0.15	0.67	
B_roving_40	0.85	0.38	0.73	0.71	0.88	0.40	0.09	1.00	
B_slag_74	0.00	0.31	0.57	0.33	0.00	0.00	0.27	0.00	
B_sand_80	0.65	0.81	0.78	0.92	0.96	0.88	0.76	0.55	
B_basalt_85	1.00	1.00	0.85	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	
B_slag_38_sand_38	0.50	0.65	0.67	0.71	0.32	0.47	0.48	0.27	
B_basalt_41_sand_41	0.88	0.88	0.81	0.96	0.95	0.90	0.82	0.73	
B_basalt_slag_50_50	0.78	0.54	0.61	0.75	0.44	0.55	0.55	0.45	
B_sand_27_slag_27_basalt_27	0.75	0.50	0.63	0.75	0.37	0.65	0.61	0.55	
B_basalt_85_glass_20	0.95	0.96	0.88	0.96	0.98	0.93	0.65	0.00	
B_basalt_85_glass_30	0.95	0.81	0.93	0.92	0.96	0.90	0.62	1.00	
B_basalt_85_HFA_20	0.95	1.00	0.88	0.92	0.98	0.92	0.71	0.00	
B_basalt_85_HFA_30	0.95	0.85	0.85	0.88	0.97	0.88	0.67	1.00	

V následující Tab. 61 je vysvětlení jednotlivých vah, které jsou následně přiřazeny jednotlivým kritériím v Tab. 62.

Tab. 61 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku

Číslo	Porovnání kritérií
1	Rovnocenná kritéria
3	Slabě preferované kritérium
5	Silně preferované kritérium
7	Velmi silně preferované kritérium
9	Absolutní preference kritéria

Dle metody kvantitativního párového srovnání byla stanovena váha jednotlivých kritérií. Následně byla pro výpočet použita Saatyho matice viz Tab. 62. V této tabulce je výpočtem stanovena váha i -tého kritéria f_i [-] z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kritérií s_{ij} [-] pomocí následujících vzorců [84; 85]:

- $S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij}$
- $R_{ij} = (s_{ij})^n$
- $f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$

Tab. 62 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
1	1	5	5	3	3	3	3	4	
2	0.2	1	0.8	1	0.7	0.7	1.7	1	
3	0.2	1.25	1	1.2	1	1.1	1.5	1	
4	0.33	1.00	0.83	1	0.9	1	1	1	
5	0.33	1.43	1.00	1.11	1	1	1	1.1	
6	0.33	1.43	0.91	1	1	1	1	1.1	
7	0.33	0.59	0.67	1.00	1	1	1	0.9	
8	0.25	1.00	1.00	1.00	0.91	0.91	1.11	1	
S_i	0.00	7.50	2.02	4.00	1.72	2.10	8.50	4.36	
R_i	0.00	0.94	0.25	0.50	0.21	0.26	1.06	0.54	3.775
f_i	0.00	0.25	0.07	0.13	0.06	0.07	0.28	0.14	1.000

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejdůležitějším kritériem s nejvyšší vahou je chemické smrštění, pevnost v tlaku a výše uvedená substituce primárních surovin. Posledním krokem výpočtu je sestavení výpočtové matice C_{ij} uvedené v Tab. 63, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} a vahami jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 63 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami

	Kritérium - Parametr									%
	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	
B_perlit_10	0.000	0.182	0.000	0.028	0.050	0.051	0.068	0.000	0.378	37.81
B_perlit_20	0.000	0.038	0.001	0.006	0.044	0.042	0.034	0.048	0.213	21.27
B_perlit_30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.035	0.000	0.096	0.168	16.84
B_HFA_20	0.000	0.248	0.061	0.121	0.054	0.061	0.119	0.048	0.714	71.37
B_HFA_30	0.000	0.172	0.059	0.116	0.053	0.055	0.111	0.096	0.662	66.24
B_HFA_40	0.000	0.143	0.047	0.110	0.052	0.022	0.094	0.144	0.613	61.25
B_glass_20	0.000	0.229	0.061	0.132	0.054	0.062	0.085	0.048	0.673	67.26
B_glass_30	0.000	0.182	0.064	0.127	0.052	0.057	0.068	0.096	0.647	64.67
B_glass_40	0.000	0.153	0.067	0.116	0.051	0.031	0.051	0.144	0.613	61.30
B_roving_20	0.000	0.191	0.049	0.121	0.053	0.058	0.068	0.048	0.589	58.92
B_roving_30	0.000	0.134	0.047	0.099	0.051	0.047	0.043	0.096	0.518	51.76
B_roving_40	0.000	0.096	0.049	0.094	0.050	0.028	0.026	0.144	0.486	48.59
B_slag_74	0.000	0.076	0.038	0.044	0.000	0.000	0.077	0.000	0.235	23.53
B_sand_80	0.000	0.201	0.052	0.121	0.055	0.061	0.213	0.079	0.782	78.17
B_basalt_85	0.000	0.248	0.057	0.127	0.057	0.070	0.281	0.144	0.984	98.45
B_slag_38_sand_38	0.000	0.162	0.045	0.094	0.018	0.033	0.136	0.039	0.528	52.80
B_basalt_41_sand_41	0.000	0.220	0.054	0.127	0.054	0.063	0.230	0.105	0.853	85.29
B_basalt_slag_50_50	0.000	0.134	0.041	0.099	0.025	0.038	0.154	0.066	0.556	55.64
B_sand_27_slag_27_basalt_27	0.000	0.124	0.042	0.099	0.021	0.045	0.171	0.079	0.581	58.11
B_basalt_85_glass_20	0.000	0.239	0.059	0.127	0.056	0.065	0.183	0.000	0.729	72.86
B_basalt_85_glass_30	0.000	0.201	0.062	0.121	0.055	0.063	0.175	0.144	0.820	82.05
B_basalt_85_HFA_20	0.000	0.248	0.059	0.121	0.056	0.064	0.200	0.000	0.749	74.91
B_basalt_85_HFA_30	0.000	0.210	0.057	0.116	0.055	0.061	0.188	0.144	0.831	83.11

Z této výpočtové matice v Tab. 63 je patrné, že vyhodnocení probíhalo ve třech rovinách. Nejprve proběhl výběr vhodných substitucí pojivových složek.

Jako optimální varianty byly zvoleny receptury obsahující substituci primární pojivové složky - portlandského cementu, vysokoteplotním popílkem nebo odpadním obalovým sklem v množství substituce 20, či 30 hm.%, tedy receptury s označením:

- **B_HFA_20**
- **B_HFA_30**
- **B_glass_20**
- **B_glass_30**

Jako optimální pro substituci plnivových složek byla následně zvolena receptura obsahující 85 hm.% substituci plnivové složky odpadem z výroby taveného čediče:

- **B_basalt_85**

Dle složení těchto receptur byla pak provedena kombinace pojivových a plnivových složek pomocí multikriteriálního srovnání a byly vytvořeny receptury:

- **B_basalt_85_glass_20**
- **B_basalt_85_glass_30**
- **B_basalt_85_HFA_20**
- **B_basalt_85_HFA_30**

Z nich byly následně na základě multikriteriálního srovnání vybrány dvě receptury s vyšším množstvím substituce druhotnými surovinami pojivových složek:

- **B_basalt_85_glass_30**
- **B_basalt_85_HFA_30**

Složení předmětných, výše uvedených receptur je uvedeno v Tab. 55 tohoto dokumentu.

5.2.3 SHRNUÍ A VYHODNOCENÍ DRUHÉ ČÁSTI II. ETAPY – RECEPTURY S OBSAHEM DRUHOTNÝCH A ODPADNÍCH SUROVIN

V rámci první části II. etapy byl proveden návrh referenční receptury. Složení této receptury bylo následně upraveno za pomoci primárních příměsí, viz Tab. 46. Na základě výsledků byla zvolena pro další řešení práce **receptura B** obsahující substituci primárního pojiva (OPC) sráženou neuhněnou mikrosiliku v množství 8,5 hm.% a metakaolin v množství 8,5 hm.% z dávky OPC. V rámci druhé části II. etapy byly následně testovány substituce pojivových složek v dávce 10-40 hm.% ze zbytkové dávky pojiva. V případě nejmenší náhrady (10 hm.%) tedy obsahovaly hmoty celkovou substituci portlandského cementu cca 25 hm.% a v případě nejvyšší dávky (40 hm.%) to byla substituce cca 50 hm.%.

Cílem druhé etapy bylo navrhnout a zvolit receptury, které by obsahovaly co nejvyšší dávku substituce pojivových a plnivových složek při zachování či zvýšení užitných parametrů referenční receptury.

Na základě výsledků substitucí pojiva a plniva jednotlivými druhotnými surovinami byly provedeny také kombinace těchto surovin pro ověření synergie jednotlivých výstupů.

Nejvyšších užitečných parametrů při substituci pojivových složek dosahovaly receptury obsahující odpadní obalové sklo v množství 20 a 30 hm.% z dávky OPC a receptury obsahující vysokoteplotní popílek v množství 20 a 30 hm.% z dávky OPC.

Nejvyšších užitečných parametrů při substituci plnivových složek dosahovaly receptury obsahující odpad z výroby taveného čediče v dávce 85 hm.% a odpad ze slévárny oceli, konkrétně slévárenský písek pojený vodním sklem v dávce 80 hm.%.

Na základě výsledků byla poté provedena kombinace substitučních pojivových a plnivových složek pro ověření synergie druhotných pojivových a plnivových složek. Konkrétně bylo zvoleno jako plnivo – odpad z výroby taveného čediče a jako pojivo – vysokoteplotní popílek a odpadní obalové sklo. Nejvyšších užitečných vlastností dosahovaly následně receptury obsahující 85 hm.% substituci plniva odpadem z výroby taveného čediče a 20 hm.% substituci pojiva vysokoteplotním popílkem nebo odpadním obalovým sklem.

Pro maximalizaci substituce pojivových složek druhotnými surovinami byly pro vstup do V. etapy této práce zvoleny dvě receptury, **B_basalt_85_glass_30** a **B_basalt_85_HFA_30** obsahující 85 hm.% substituci plniva odpadem z výroby taveného čediče a 30 hm.% substituci pojiva vysokoteplotním popílkem či odpadním obalovým sklem. Tyto receptury dosahovaly na základě multikriteriálního srovnání nejvyšších užitečných hodnot. Vzorky dosahovaly především vyšších hodnot pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku po 7, 28 i 90 dnech zrání. Dále dosahovaly nižší nasákavosti po 28 dnech zrání, vyšší odolnosti proti obrusu, vyšší odolnost proti CHRL, ale zároveň dosahovaly vyššího chemického smrštění během prvních 72 hodin hydratace než receptura referenční.

6 ETAPA III. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ

Předmětem třetí etapy je provedení návrhu a testování úpravy složení základní **receptury B**, u které byla v rámci II. etapy práce provedena optimalizace složení pomocí primárních příměsí. V rámci třetí etapy je základní **receptura B** modifikována pomocí polymerních redispergovatelných práškových přísad (RDP) za účelem zvýšení užitných vlastností, mezi které patří především přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům. V rámci třetí etapy je sledován a posuzován vliv těchto přísad na fyzikálně-mechanické parametry ztvrdlých kompozitů včetně hydratačních objemových změn.

Výstupem III. etapy je optimalizovaná receptura, která dosahuje nejvyšších sledovaných vlastností, především z pohledu přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

6.1 NÁVRH RECEPTUR – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ

Na základě výsledků z první části II. etapy byly v rámci třetí etapy testovány polymerní redispergovatelné prášky, kterými byla modifikována základní **receptura B**, jež obsahovala kromě portlandského cementu, také sráženou nehydnou mikrosiliku a metakaolin.

V rámci třetí etapy byly zvoleny polymerní redispergovatelné prášky, které jsou popsány výše v kapitole 4.6.3 Polymerní přísady tohoto dokumentu. Dávkování přísad bylo voleno dle doporučení výrobce a na základě laboratorního ověření. Většina polymerních redispergovatelných prášků byla dávkována v množství 1,5-2,5 hm.% vzhledem k dávce cementu. Pouze v případě hydroxypropyl methyl celulózy bylo voleno dávkování v množství 0,5-1,0 hm.% z dávky cementu. Tato polymerní přísada se vyznačuje velmi vysokými nároky na množství záměsové vody a také se vyznačuje významnými reologickými změnami, konkrétně zhoršením zpracovatelnosti čerstvého kompozitu.

Navržené receptury jsou uvedeny v následující Tab. 64.

Tab. 64 Receptury PMCC s polymerními přísadami

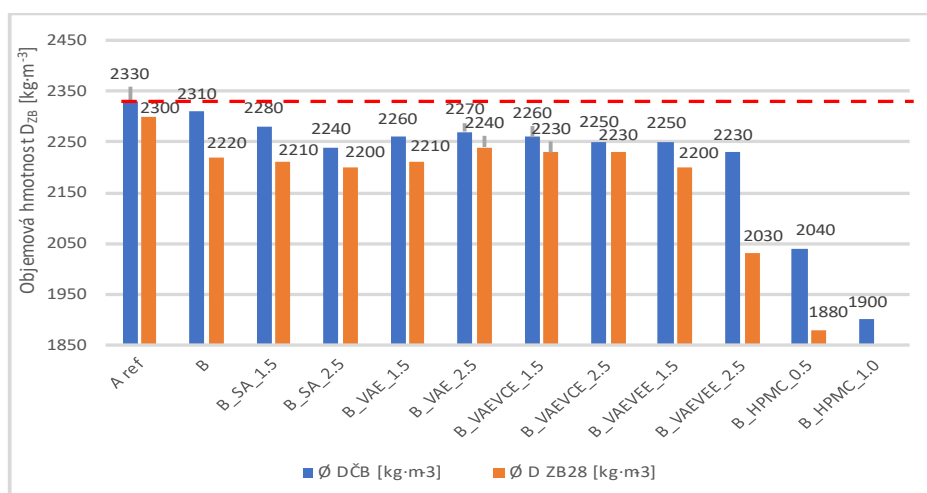
Označení receptury	Použitá polymerní přísada	Dávkování přísady z hmotnosti cementu [hm.%]
B_SA_1.5	STYREN-AKRYLÁT (SA)	1.5
B_SA_2.5		2.5
B_VAE_1.5	KOPOLYMER ETHYLEN VINYLACETÁTU (VAE)	1.5
B_VAE_2.5		2.5
B_VAEVCE_1.5	TERPOLYMER VINYLACETÁTU, VINYLCHLORIDU A ETHYLENU (VAE, VC, E)	1.5
B_VAEVCE_2.5		2.5
B_VAEVEE_1.5	KOPOLYMER VINYLACETÁTU, VINYL ESTERU A ETHYLENU (VAE, VE, E)	1.5
B_VAEVEE_2.5		2.5
B_HPMC_0.5	HYDROXYPROPYL METHYL CELULÓZA (HPMC)	0.5
B_HPMC_1.0		1.0

6.2 TESTOVÁNÍ – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PŘÁŠKŮ

Vlastnosti čerstvých a ztvrdlých směsí byly testovány dle navržené metodiky etapy III. viz Obr. 7. Základní stanovené parametry jsou shrnuty v a. V následujících grafech na Obr. 54 až Obr. 66 jsou znázorněny výsledky testování základních fyzikálně-mechanických parametrů vzorků připravených podle základní **receptury B** s obsahem polymerních redispergovatelných přísad (RDP).

6.2.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY

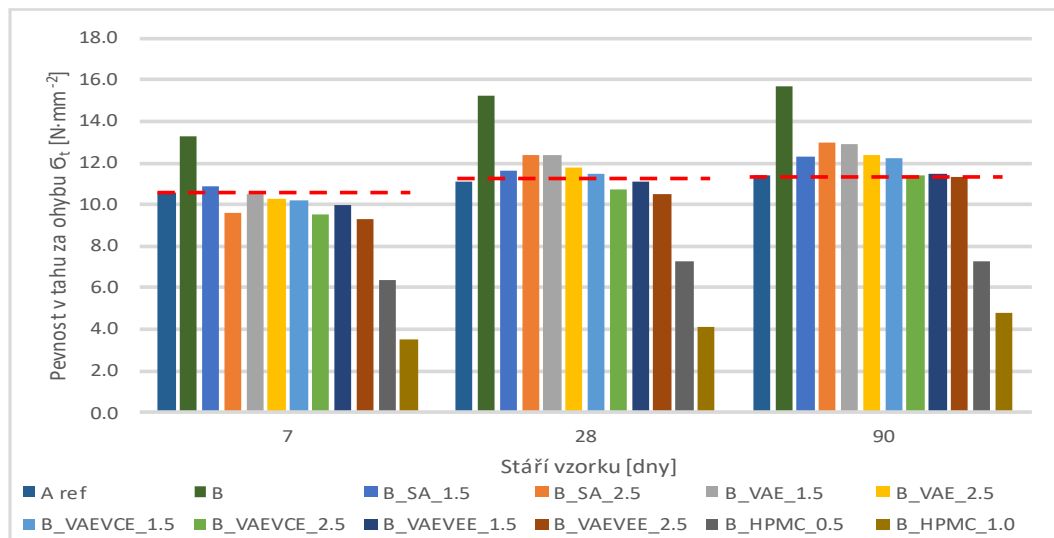
Na následujícím Obr. 54 je znázorněna objemová hmotnost vzorků s obsahem RDP v čerstvém a ztvrdlém stavu



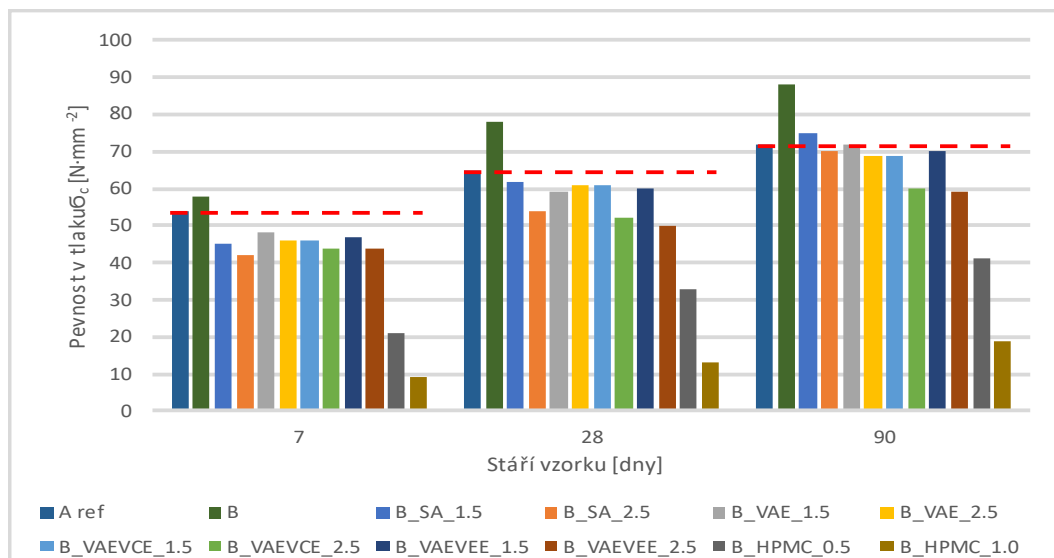
Obr. 54 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s obsahem RDP

Z výše uvedeného je patrné, že přidavek RDP vedl ke snížení objemové hmotnosti v čerstvém, ale také ve ztvrdlém stavu. Toto se nejvíce projevilo u vzorků obsahujících HPMC, kdy bylo nutno přidat významně větší množství záměsové vody pro udržení zpracovatelnosti směsi, což se projevilo významným snížením objemové hmotnosti.

V následujícím grafu na Obr. 55 jsou znázorněny pevnosti v tahu za ohybu vzorků s obsahem RDP a na Obr. 56 jsou znázorněny pevnosti v tlaku vzorků s obsahem RDP.



Obr. 55 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s obsahem RDP

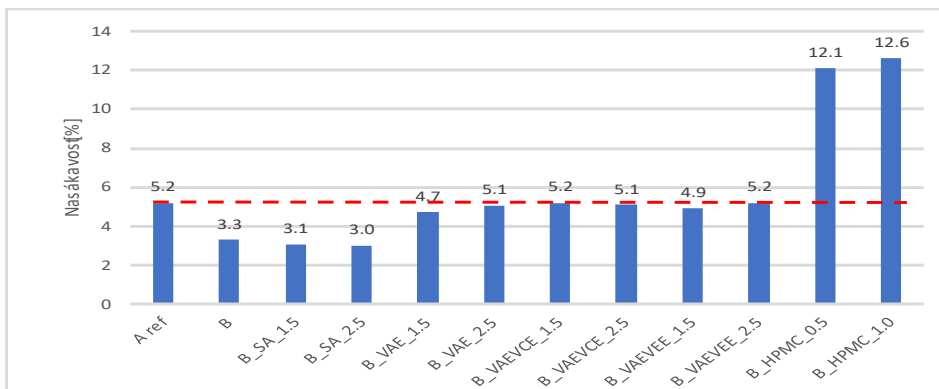


Obr. 56 Pevnost v tlaku vzorků s obsahem RDP

Z výše uvedených grafů na Obr. 55 a Obr. 56 vyplývá, že přidavek jakéhokoliv množství RDP měl za následek snížení pevnosti v tahu za ohybu, ale také pevnosti

v tlaku vzorků. Nejmenší vliv na snížení vlastností ztvrdlých hmot měl přídavek styren-akrylátové přísady, a naopak nejvyšší vliv měl přídavek přísad na bázi HPMC.

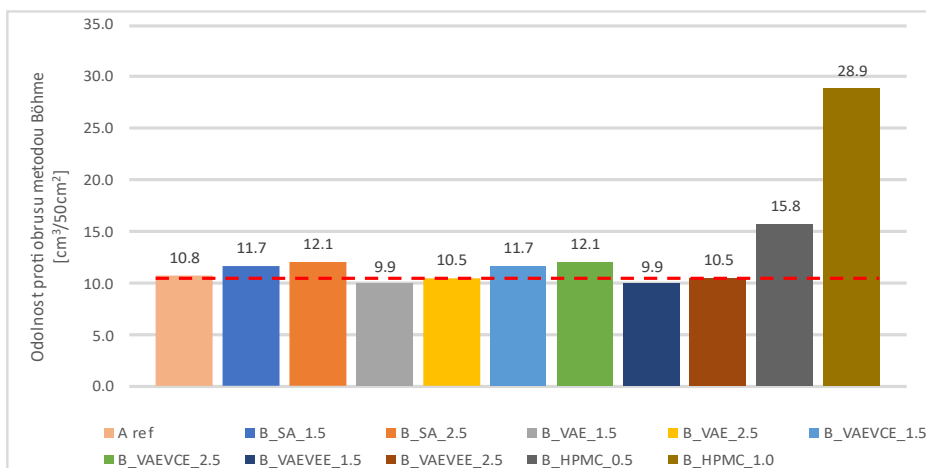
V následujícím grafu na Obr. 57 jsou znázorněny nasákavosti po 28 dnech zrání vzorků s obsahem RDP.



Obr. 57 Nasákavost vzorků s obsahem RDP

Přísady na bázi styren-akrylátů měly za následek snížení nasákavosti vzorků, a dá se předpokládat, že došlo k většímu uzavření struktury. Ostatní polymerní přísady vedly k mírnému či dramatickému zvýšení nasákavosti po 28 dnech zrání.

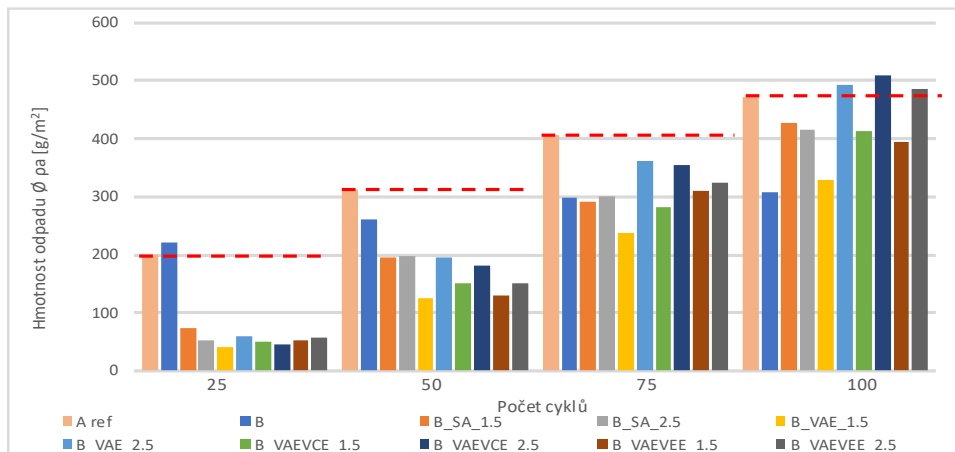
V následujícím grafu na Obr. 58 jsou znázorněny odolnosti proti obrušování po 28 dnech zrání vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad.



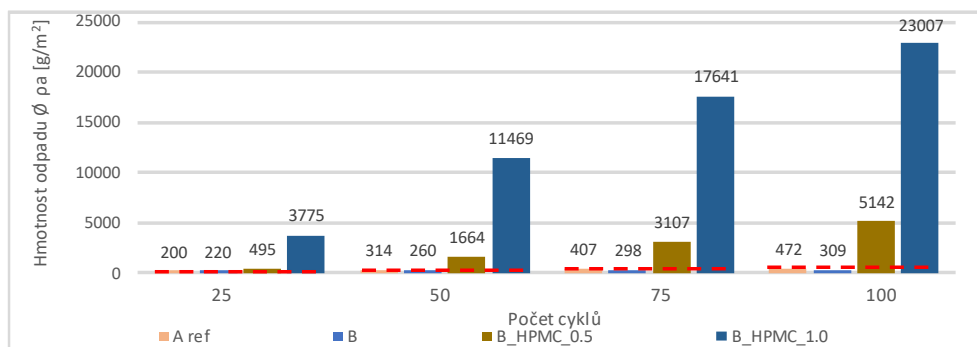
Obr. 58 Odolnost proti obrušování vzorků s obsahem RDP

Z výsledků je zřejmé, že přídavek polymerních přísad měl za následek zvýšení odolnosti vzorků proti obrušování metodou Böhme. Předpokladem je, že díky provázání matrice cementových a polymerních vazeb dochází k vyššímu zakotvení jednotlivých cementových zrn, ale také zrn příměsí a plniv v hmotě.

V následujících grafech na a jsou znázorněny hodnoty odolnosti proti působení CHRL vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad.



Obr. 59 Odolnost proti působení CHRL vzorků s obsahem RDP



Obr. 60 Odolnost proti působení CHRL vzorků s obsahem HPMC

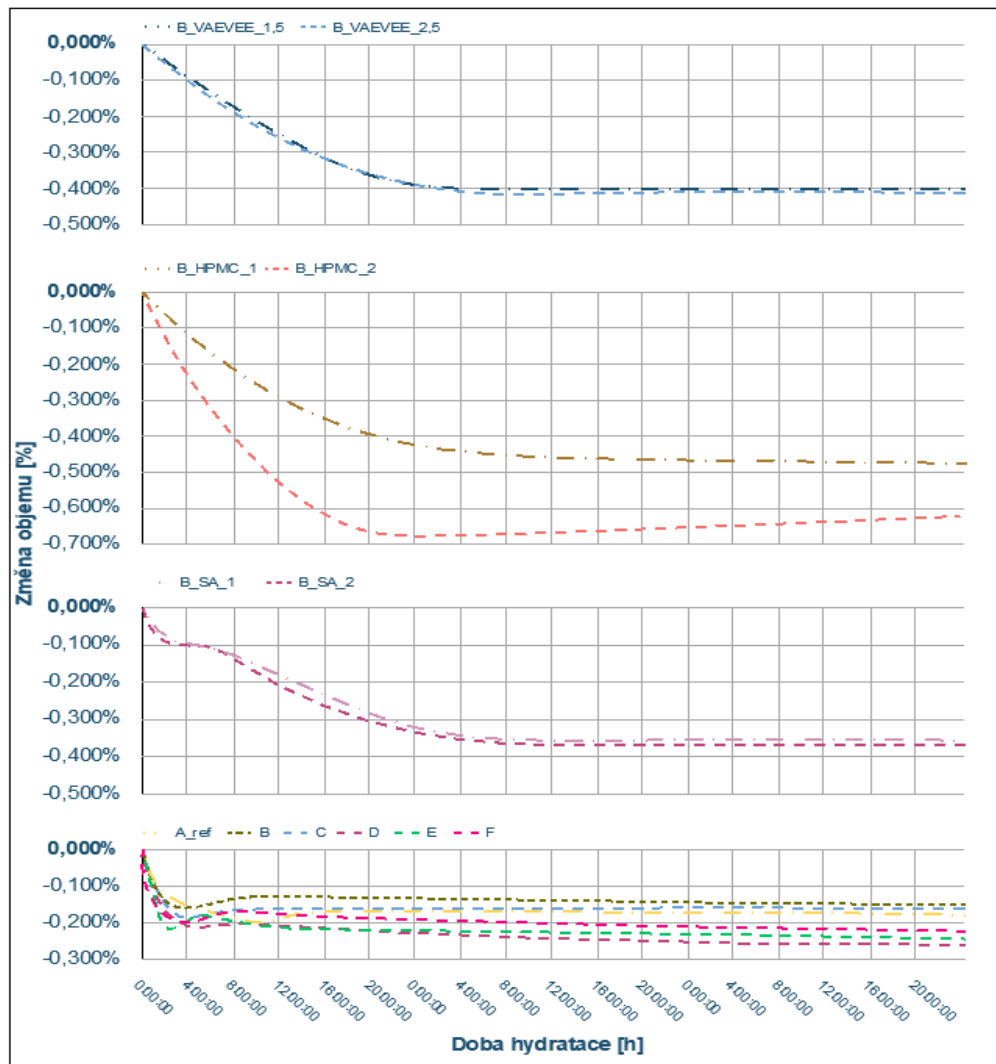
Z uvedeného vyplývá, že přidavek většiny polymerních přísad zásadním způsobem zvýšil odolnost proti působení CHRL, kromě vzorků s obsahem HPMC. Na následujícím jsou znázorněny vzorky s obsahem 1,0 hm.% z cementu HPMC po stanovení odolnosti proti působení CHRL po 100 cyklech zatížení. U vzorků došlo k výraznému rozpadu. Toto je dáno především velmi vysokou pórovitostí a nasákavostí těchto vzorků.



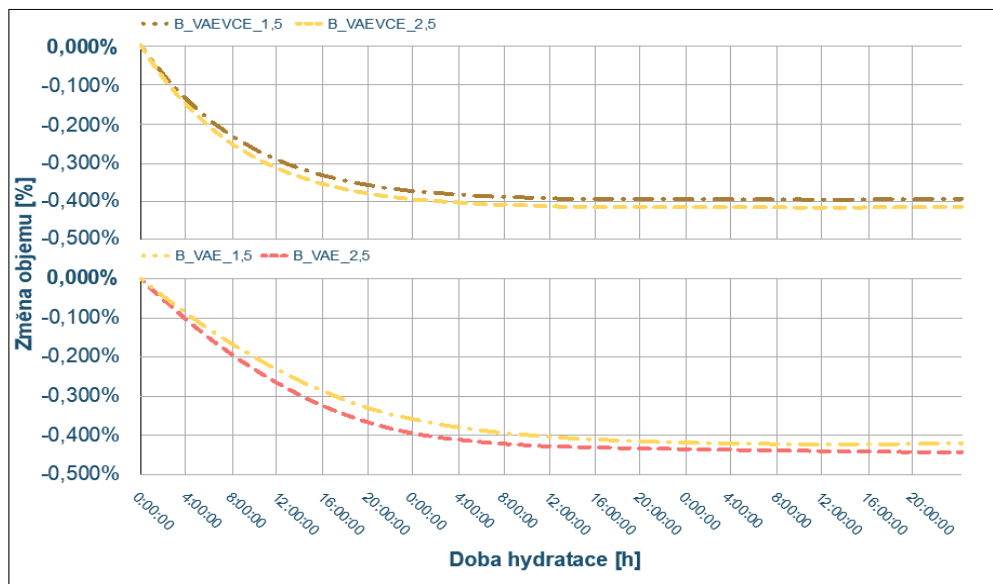
Obr. 61 Stanovení odolnosti proti CHRL u vzorků s obsahem HPMC

6.2.2 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY A PŘÍDRŽNOST K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM

V následujících grafech na Obr. 62 jsou znázorněny hodnoty chemického smrštění po 72 hodinách zrání vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad měřené metodou kontinuálního hydrostatického vážení.



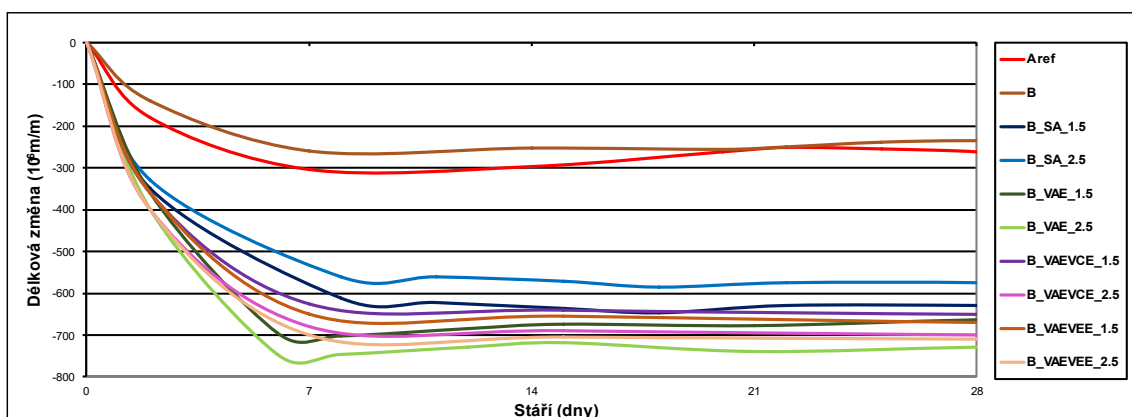
Obr. 62 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s obsahem RDP



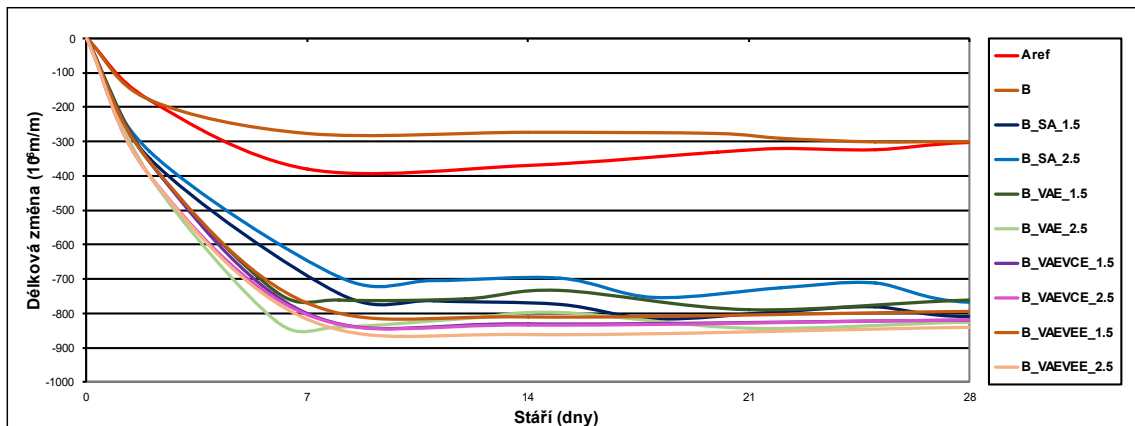
Obr. 63 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s obsahem RDP

Z výše uvedených grafů vyplývá, že přidavek polymerních přísad má zásadní vliv na objemové změny během prvních 72 hodin hydratace. Tyto výsledky částečně korespondují s výzkumem M. Lenart [86], kterým bylo zjištěno, že přidavek polymerních přísad na bázi SBR vede ke zvýšení smrštění. Předpokladem je, že kromě objemových změn cementu prochází hmota také smrštěním způsobeným tvorbou polymerních vazeb, které zaujímají výrazně větší prostor v čerstvém stavu než ve stavu po hydrataci kompozitu.

V následujících grafech na Obr. 64 a Obr. 65 jsou znázorněny hodnoty chemického smrštění trámečkovou metodou během 28 dnů zrání vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad uložených ve vodním a vlhkém prostředí.



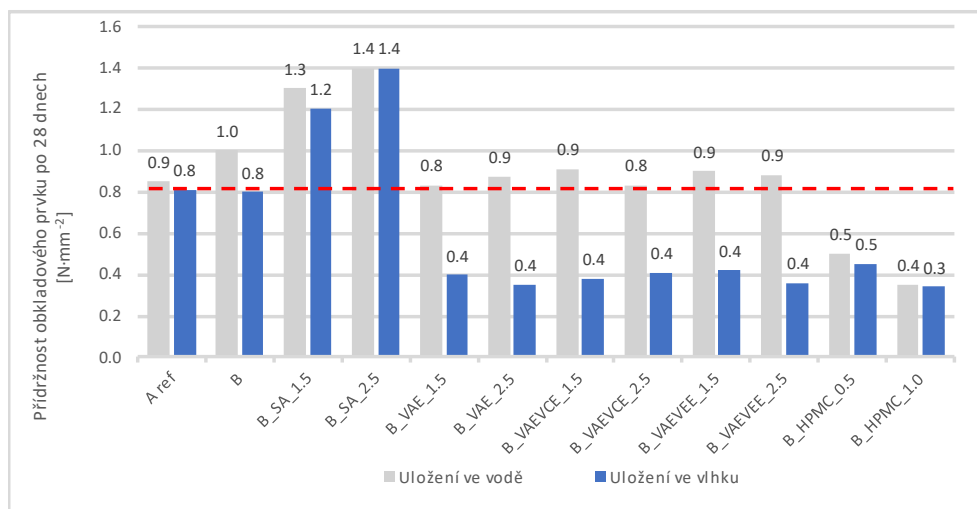
Obr. 64 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s obsahem RDP uložených ve vodě



Obr. 65 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s obsahem RDP uložených ve vlhku

Z výše uvedených grafů je patrné, že přidavek polymerních přísad vede ke zvýšení smrštění oproti referenční **A ref** a základní receptuře **B**. K těmto změnám dochází celkem zásadním způsobem. Z původního smrštění po 7 dnech zrání o hodnotě $300 \cdot 10^{-6}$ - $400 \cdot 10^{-6}$ m/m u receptury **A ref** a **B** ve vlhkém uložení došlo ke zvětšení smrštění na hodnoty $700 \cdot 10^{-6}$ - $870 \cdot 10^{-6}$ m/m.

V následujícím grafu na Obr. 66 jsou znázorněny přídržnosti k hladkým nenasákavým obkládovým prvkům po 28 dnech zrání vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad.



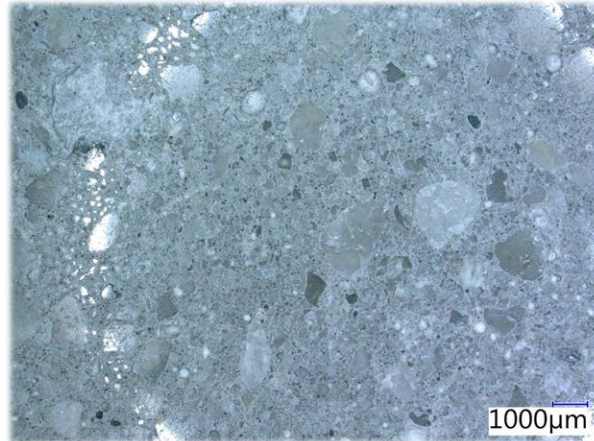
Obr. 66 Přídržnost k hladkým nenasákavým obkládovým prvkům vzorků s obsahem RDP

Z výše uvedeného vyplývá, že zvýšením přídržnosti při uložení vzorků ve vodě se projeví téměř všechny polymerní přísady, kromě HPMC. Nejvyššího zvýšení přídržnosti dosáhly vzorky s obsahem styren-akrylátové polymerní přísady. Předpokladem bylo vyšší zvýšení přídržnosti podobně jako je tomu u běžných stavebních lepidel, jak je v této práci však ověřováno, je předpoklad, že díky velkým

hydratačním objemovým změnám došlo k usmýknutí plochy vzorků od obkladových prvků. Z tohoto důvodu je také vyšší přídržnost u vzorků ve vodním uložení, které dosáhly nižšího hydratačního smrštění než vzorky uložené ve vlhku.

6.2.3 MIKROSTRUKTURA A XRD

Na následujících Obr. 67 a Obr. 70 jsou znázorněny snímky vzorků s obsahem RDP při 20násobném zvětšení.



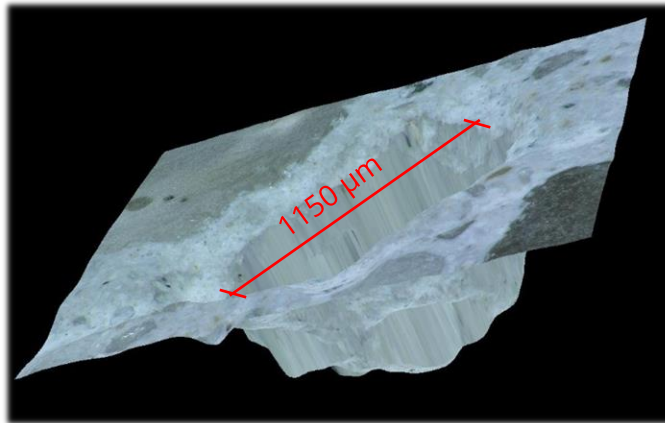
Obr. 67 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_SA_2.5 při zvětšení 20x

Na výše uvedeném snímku vzorku **B_SA_2.5** s obsahem 2,5 hm.% SA RDP z množství cementu je viditelná rovnoměrná distribuce zrn křemenného stavebního písku, ale zároveň velké množství pórů. Předpoklad je, že díky obsahu RDP dochází ke zvýšení povrchového napětí ve hmotě a k výrazně větší náchylnosti k tvorbě pórů ve struktuře.

Na následujících snímcích na Obr. 68 a Obr. 69 je znázorněn detail póru ve vzorku B_SA_2.5 2D a 3D zobrazení.

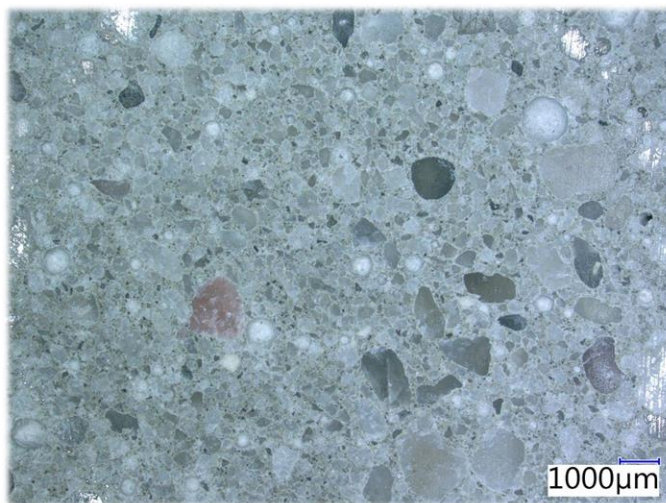


Obr. 68 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B_SA_2.5 při zvětšení 200x



Obr. 69 Detail póru ve vzorku dle receptury B_SA_2.5 při zvětšení 200x

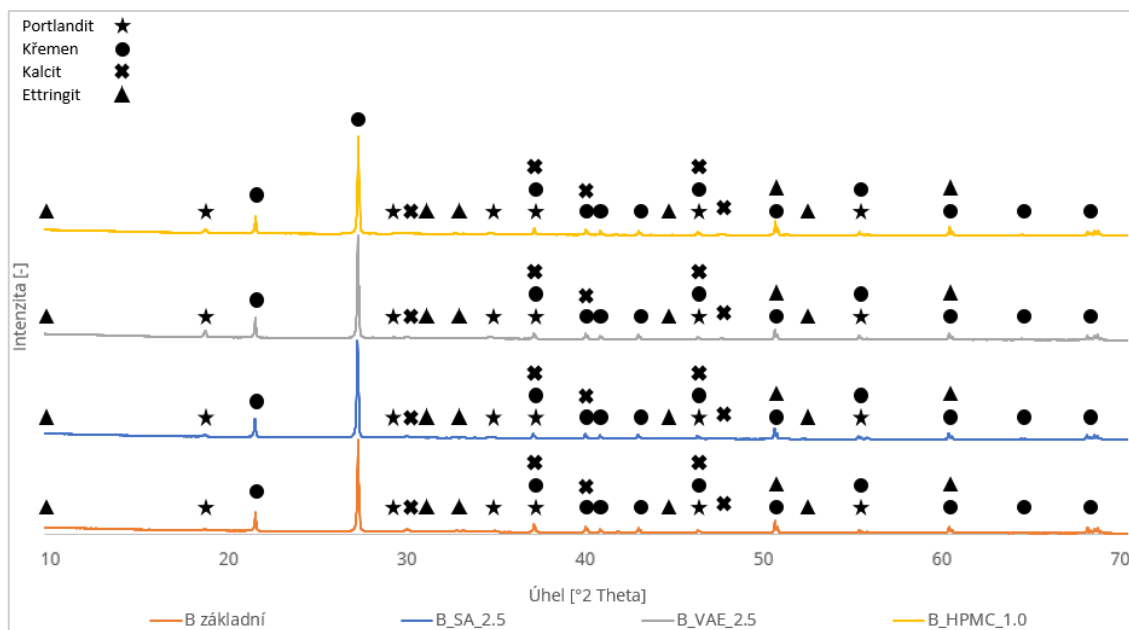
Ve hmotách s obsahem RDP se vyskytovaly póry o velikosti 600-1300 μm. Množství těchto pórů rostlo s množstvím dávky RDP. Toto potvrzuje výsledky výzkumů pod vedením Ru Wang a spol. či Joachima Schulze, kteří ověřovali chování RDP v cementových kompozitech. Z výsledků vyplývá, že jakákoliv dávka RDP vede ve vzorcích k výraznému zvýšení obsahu vzduchu v čerstvé směsi a zároveň k jistému snížení fyzikálně-mechanických vlastností, především pevnosti v tahu a ohybu a pevnosti v tlaku [87; 88].



Obr. 70 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_VAE_2.5 při zvětšení 20x

Na výše uvedeném obrázku je vzorek s obsahem 2,5 hm.% VAE RDP z dávky cementu. Na snímku je patrné, že podobně jako v případě dávky SA RDP dochází ke zvýšení pórovitosti. Z výsledků výše uvedených však vyplývá, že nedochází k zásadnímu ovlivnění pevnostních charakteristik hmoty. Dochází však ke zvýšení nasákavosti a ke snížení odolnosti proti působení CHRL po více než 50 cyklech.

Na následujícím Obr. 71 je znázorněno porovnání záznamů z XRD analýzy jednotlivých vzorků s obsahem RDP.



Obr. 71 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků z III. etapy

Z výše uvedeného vyplývá, že:

- přídavek RDP neměl zásadní vliv na obsah minerálů ve vzorcích,
- přídavek RDP na bázi styren-akrylátu – ozn. receptury **B_SA** – neměl téměř žádný vliv na množství vzniku jednotlivých minerálů.
- Přídavek RDP na bázi vinyl-acetátů (**B_VAE**, **B_VAEVEE**, **B_VAEVCE**) se vyznačoval zvýšením obsahu portlanditu ve vzorcích. Toto je nejspíše způsobeno zabráněním polymerního filmu okolo zrn cementu v reakci s příměsemi a vzniku dalších hydratačních produktů.
- Přídavek na bázi HPMC, **B_HPMC** se choval podobně jako vzorek **B_základní**, či **B_SA**, došlo tedy ke standardnímu hydratačnímu procesu a zreagování části portlanditu s příměsemi.

6.3 OPTIMALIZACE – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ

Optimalizační proces úpravy složení receptur s obsahem druhotných či odpadních surovin a následná volba optimalizovaných variant byla provedena pomocí optimalizačních metod, které jsou popsány v této kapitole.

V následujících tabulkách a jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a parametry vzorků s obsahem polymerních redispergovatelných přísad.

Tab. 65 Přehled parametrů vzorků obsahem RDP

Označení	w/c	Konz.	OH		Nasáka- vost	CHRL 100	Obrus
	[-]	Ø [mm]	Ø D _{čB} [kg·m ⁻³]	Ø DZB ₂₈ [kg·m ⁻³]	Ø NV ₂₈ [%]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]
A ref	0.34	135	2330	2300	5.2	472	10.8
B	0.34	130	2310	2270	3.3	309	8.9
B_SA_1.5	0.37	135	2280	2220	3.1	428	11.7
B_SA_2.5	0.37	135	2240	2210	3	416	12.1
B_VAE_1.5	0.36	130	2260	2200	4.71	329	9.9
B_VAE_2.5	0.36	135	2270	2210	5.05	492	10.5
B_VAEVCE_1.5	0.36	130	2260	2240	5.2	412	11.7
B_VAEVCE_2.5	0.36	135	2250	2230	5.1	510	12.1
B_VAEVEE_1.5	0.37	135	2250	2230	4.9	395	9.9
B_VAEVEE_2.5	0.38	130	2230	2200	5.2	485	10.5
B_HPMC_0.5	0.56	130	2040	2030	12.1	5142	15.8
B_HPMC_1.0	0.78	135	1900	1880	12.6	23007	28.9

Tab. 66 Přehled pevnostních charakteristik vzorků obsahem RDP

Označení	Ø Pevnost v tahu za ohybu			Ø Pevnost v tlaku			Přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům	
	[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]	
	7	28	90	7	28	90	Voda	Vlhko
A ref	10.6	11.1	11.4	54	65	72	0.9	0.8
B	13.3	15.2	15.7	58	78	88	1.0	0.8
B_SA_1.5	10.9	11.6	12.3	45	62	75	1.3	1.2
B_SA_2.5	9.6	12.4	13	42	54	70	1.4	1.4
B_VAE_1.5	10.5	12.4	12.9	48	59	72	0.8	0.4
B_VAE_2.5	10.3	11.8	12.4	46	61	69	0.9	0.4
B_VAEVCE_1.5	10.2	11.5	12.2	46	61	69	0.9	0.4
B_VAEVCE_2.5	9.5	10.7	11.4	44	52	60	0.8	0.4
B_VAEVEE_1.5	10	11.1	11.5	47	60	70	0.9	0.4
B_VAEVEE_2.5	9.3	10.5	11.3	44	50	59	0.9	0.4
B_HPMC_0.5	6.4	7.3	7.3	21	33	41	0.5	0.5
B_HPMC_1.0	3.5	4.1	4.8	9	13	19	0.4	0.3

Jako rozhodující vlastnosti pro volbu optimalizované varianty byly zvoleny tyto klíčové vlastnosti:

- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu za ohybu
- Nasákavost
- Přídržnost
- Odolnost proti působení CHRL
- Odolnost proti obrusu
- Chemické smrštění po 72 h hydratace

- Smrštění během prvních 28 dní hydratace – trámečkovou metodou

Vyhodnocení bylo provedeno metodou multikriteriálního srovnání. Váhy jednotlivých kritérií $f_i [-]$ byly stanoveny metodou párového srovnání. Následně byla provedena volba požadavku pro dané kritérium, viz následující Tab. 67, ve které je uvedeno, zda je u daného kritéria požadavek na maximalizaci, či minimalizaci dané hodnoty [84; 85].

Tab. 67 Volba kritérií - vlastností vzorků s obsahem RDP

Pořadí	Kritérium - Parametr	Jednotka	Optimum
1	Pevnost v tlaku	MPa	MAX
2	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	MAX
3	Nasákavost	hm. %.	MIN
4	Přídržnost	MPa	MAX
5	Odolnost proti působení CHRL	g/m ²	MIN
6	Odolnost proti obrusu	cm ³ /50cm ²	MIN
7	Chemické smrštění po 72 h hydratace	%	MIN
8	Smrštění trámečkovou metodou	·10 ⁻⁶ m/m	MIN

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny rozhodné parametry. Dle výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matrice A_{ij} , která obsahuje jednotlivé fyzikálně-mechanické parametry vzorků vyrobených dle receptur s obsahem RDP, viz Tab. 64.

Tab. 68 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s obsahem RDP

Ozn. Receptury	Parametr							
	Tlak	Tah	Nasáka- vost	Přídržnost ve vlhku	CHRL	Obrus	Chem. smrštění	Smrštění ve vlhku
	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	NV ₂₈ [%]	σ_f [MPa]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]	[%]	[·10 ⁻⁶ m/m]
B_SA_1.5	75	12.3	3.1	1.2	428	11.7	-0.36	-809
B_SA_2.5	70	13.0	3.0	1.4	416	12.1	-0.38	-769
B_VAE_1.5	72	12.9	4.7	0.4	329	9.9	-0.41	-762
B_VAE_2.5	69	12.4	5.1	0.4	492	10.5	-0.43	-825
B_VAEVCE_1.5	69	12.2	5.2	0.4	412	11.7	-0.40	-820
B_VAEVCE_2.5	60	11.4	5.1	0.4	510	12.1	-0.41	-820
B_VAEVEE_1.5	70	11.5	4.9	0.4	395	9.9	-0.40	-795
B_VAEVEE_2.5	59	11.3	5.2	0.4	485	10.5	-0.41	-840
B_HPMC_0.5	41	7.3	12.1	0.5	5142	15.8	-0.70	-997
B_HPMC_1.0	19	4.8	12.6	0.3	23007	28.9	-0.85	-1000

Rozhodovací matice A_{ij} byla následně transformována pomocí následujících vzorců na rovnici B_{ij} [84; 85]:

- Výpočet MINima:
$$b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$

- Výpočet MAXima:
$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \text{MIN}(a_{ij})}{\text{MAX}(a_{ij}) - \text{MIN}(a_{ij})}$$

Transformace výše uvedené matice proběhla na základě stanovení kritérií vlastností uvedených v Tab. 67, které byly určeny jako rozhodné pro polymer-cementové kompozity. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v Tab. 69.

Tab. 69 Transformovaná matice B_{ij} pro vzorky s obsahem RDP

Ozn. Receptury	Kritérium - Parametr							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B_SA_1.5	1.00	0.91	0.99	0.81	1.00	0.91	1.00	0.80
B_SA_2.5	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	0.96	0.97
B_VAE_1.5	0.95	0.99	0.82	0.05	1.00	1.00	0.90	1.00
B_VAE_2.5	0.89	0.93	0.79	0.01	0.99	0.97	0.86	0.74
B_VAEVCE_1.5	0.89	0.90	0.77	0.04	1.00	0.91	0.92	0.76
B_VAEVCE_2.5	0.73	0.80	0.78	0.07	0.99	0.88	0.90	0.76
B_VAEVEE_1.5	0.91	0.82	0.80	0.08	1.00	1.00	0.92	0.86
B_VAEVEE_2.5	0.71	0.79	0.77	0.02	0.99	0.97	0.90	0.67
B_HPMC_0.5	0.39	0.30	0.05	0.10	0.79	0.69	0.31	0.01
B_HPMC_1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

V následující Tab. 70 je vysvětlení jednotlivých vah, které jsou následně přiřazeny jednotlivým kritériím v Tab. 71.

Tab. 70 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku

Číslo	Porovnání kritérií
1	Rovnocenná kritéria
3	Slabě preferované kritérium
5	Silně preferované kritérium
7	Velmi silně preferované kritérium
9	Absolutní preference kritéria

Dle metody kvantitativního párového srovnání byla stanovena váha jednotlivých kritérií. Následně byla pro výpočet použita Saatyho matice viz Tab. 71. V této tabulce je výpočtem stanovena váha i -tého kritéria f_i [-] z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kritérií s_{ij} [-] pomocí následujících vzorců [84; 85]:

- $S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij}$
- $R_{ij} = (s_{ij})^n$
- $f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$

Tab. 71 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s obsahem RDP

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
1	1	1	1	2	1	1	1.5	1.5	
2	1	1	1.2	2	1	1	1.5	1.5	
3	1	0.83	1	3	1.2	1.1	1.5	1.5	
4	0.50	0.50	0.33	1	0.5	0.8	1	1	
5	1.00	1.00	0.83	2.00	1	1	1.5	1.5	
6	1.00	1.00	0.91	1.25	1	1	1.5	1.5	
7	0.67	0.67	0.67	1.00	0.67	0.67	1	1	
8	0.67	0.67	0.67	1.00	0.67	0.67	1.00	1	
S_i	0.22	0.19	0.13	30.00	0.27	0.39	7.59	7.59	
R_i	0.03	0.02	0.02	3.75	0.03	0.05	0.95	0.95	5.798
f_i	0.00	0.00	0.00	0.65	0.01	0.01	0.16	0.16	1.000

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejdůležitějším kritériem s nejvyšší vahou je hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a následně se stejnou vahou chemické smrštění a nejvyšší hodnota smrštění stanovená trámečkovou metodou. Posledním krokem výpočtu je sestavení výpočtové matice C_{ij} uvedené v Tab. 72, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} a váhami jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 72 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s obsahem RDP

	Kritérium - Parametr									%
	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	
B_SA_1.5	0.005	0.004	0.003	0.525	0.006	0.008	0.164	0.132	0.845	84.47
B_SA_2.5	0.004	0.004	0.003	0.647	0.006	0.007	0.157	0.159	0.987	98.73
B_VAE_1.5	0.005	0.004	0.002	0.035	0.006	0.008	0.147	0.164	0.371	37.11
B_VAE_2.5	0.004	0.004	0.002	0.006	0.006	0.008	0.140	0.121	0.291	29.13
B_VAEVCE_1.5	0.004	0.004	0.002	0.024	0.006	0.008	0.150	0.124	0.322	32.21
B_VAEVCE_2.5	0.004	0.003	0.002	0.043	0.006	0.007	0.147	0.124	0.336	33.57
B_VAEVEE_1.5	0.004	0.003	0.002	0.049	0.006	0.008	0.150	0.141	0.364	36.43
B_VAEVEE_2.5	0.003	0.003	0.002	0.012	0.006	0.008	0.147	0.110	0.292	29.20
B_HPMC_0.5	0.002	0.001	0.000	0.067	0.005	0.006	0.050	0.002	0.133	13.29
B_HPMC_1.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00

Z výše uvedené výpočtové matice v Tab. 72 je patrné, že nejvyšších užitných parametrů dosáhla receptura:

- **B_SA_2.5**

Tato receptura obsahovala dávku 2,5 hm.% z množství cementu RDP na bázi styren-akrylátu. Vzorky dle této receptury dosahovaly nejvyšších hodnot přídržností k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a zároveň vykazovaly jedny z nejnižších objemových změn.

Složení výše uvedených receptur je uvedeno v Tab. 64 tohoto dokumentu.

6.4 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ – VLIV POLYMERNÍCH REDISPERGOVATELNÝCH PRÁŠKŮ

V rámci III. etapy byl proveden návrh modifikace základní receptury B, která byla výstupem II. etapy této práce. Tato receptura byla modifikována pěti druhy polymerních redispergovatelných prášků v dávkování 0,5-2,5 hm.% z hmotnosti cementu, viz Tab. 64.

Cílem třetí etapy bylo provést volbu vhodné receptury, či receptur, které při modifikaci polymerními redispergovatelnými surovinami dosahovaly nejvyšších užitných parametrů. Nejdůležitější z těchto parametrů jsou shrnuty v Tab. 67. Důležitost těchto parametrů byla stanovena metodou multikriteriálního srovnání. Mezi nejdůležitější rozhodné parametry patřila přídržnost a smrštění během hydratačního procesu.

Přídavek polymerních přísad vedl ke snížení objemových hmotností v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu a zároveň také ke snížení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

Při uložení ve vlhkém prostředí došlo ke snížení přídržností k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům u téměř všech polymerních přísad, kromě vzorků s obsahem styren-akrylátové přísady. Toto je dáno především velmi vysokým smrštěním těchto kompozitů, kdy je předpoklad, že smykové napětí vyvolané smrštěním je vyšší než maximální napětí přídržnosti kompozitu k hladkému obkladovému prvku. Z tohoto důvodu dojde během zrání k usmýknutí kompozitu od daného obkladového prvku.

Přídavek polymerních přísad vedl ke zvýšení odolnosti proti CHRL, a to zásadním způsobem. To bylo nejspíše způsobeno především vyšším propojením polymer-cementové matrice a vyšší houževnatostí celého kompozitu, který byl schopný odolat zmrazovacím cyklům a tlakům vznikajícím ve struktuře kompozitu. Vzorky s obsahem HPMC vykazovaly velmi nízkou odolnost proti působení CHRL. Toto bylo možné předpokládat již především díky velmi vysoké nasákavosti a nízkým hodnotám všech zkoumaných parametrů kompozitu.

Nejvyšších užitných parametrů dosáhla a na základě multikriteriálního srovnání byla zvolena jako nejvhodnější pro vstup do etapy V. této práce receptura **B_SA_2.5** s obsahem 2,5 hm.% SA RDP z množství cementu.

7 ETAPA IV. - NÁVRH A TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT – VLIV PŘÍRAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

Předmětem čtvrté etapy je ověření vlivu přísad pro kompenzaci, či regulaci hydratačních objemových změn cementových a polymer-cementových kompozitů. V rámci etapy je ověřováno 6 druhů přísad, mezi které patří chemické sloučeniny upravující povrchové napětí hmoty, či specializované druhy cementů.

Výstupem etapy je objemově kompenzovaná hmota u které je kladen důraz na velmi vysoké fyzikálně-mechanické parametry, jako je pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, nízká nasákavost, či vysoká přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

7.1 NÁVRH RECEPTUR – VLIV PŘÍRAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

Na základě výsledků z první části II. etapy byly v rámci čtvrté etapy testovány přísady pro kompenzaci objemových změn, kterými byla modifikována základní **receptura B**, jež obsahovala kromě portlandského cementu, také sráženou nehydnou mikrosiliku a metakaolin.

V rámci čtvrté etapy byly zvoleny redispergovatelné přísady pro kompenzaci objemových změn, které jsou popsány výše v kapitole 4.6.4 Přísady pro kompenzaci objemových změn.

Přísady pro kompenzaci objemových změn tohoto dokumentu.

Jedná se o průřez dostupnými výrobky a způsoby, které se v dnešní době pro kompenzaci objemových změn silikátových kompozitů používají.

Navržené receptury jsou uvedeny v následující Tab. 73. Dávkování jednotlivých přísad bylo provedeno dle doporučení výrobce, případně dle vědeckých článků a prací prováděných s přísadami obdobného typu.

Tab. 73 Receptury PMCC s přísadami pro regulaci objemových změn

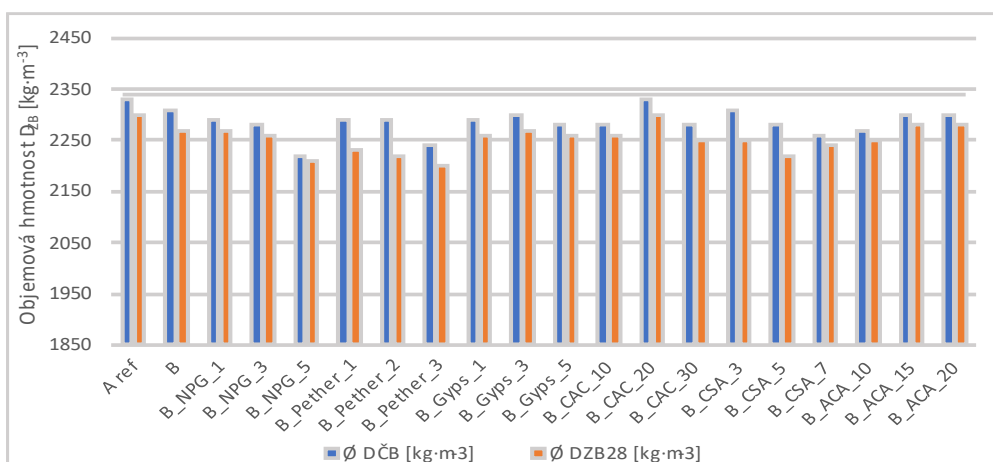
Označení receptury	Použitá přísada pro kompenzaci objemových změn	Dávkování přísady z hmotnosti cementu [hm.%]
B_NPG_1	Neopentyl glycol	1
B_NPG_3		3
B_NPG_5		5
B_Pether_1	Polyether	1
B_Pether_2		2
B_Pether_3		3
B_Gyps_1	Sádra	1
B_Gyps_3		3
B_Gyps_5		5
B_CAC_10	CAC Cement	10
B_CAC_20		20
B_CAC_30		30
B_CSA_3	CSA Cement	3
B_CSA_5		5
B_CSA_7		7
B_ACA_10	ACA Cement	10
B_ACA_15		15
B_ACA_20		20

7.2 TESTOVÁNÍ – VLIV PŘÍRAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

Na základě schéma ETAPY IV. v Obr. 8 byly ověřeny fyzikálně-mechanické parametry. Ty jsou shrnuty v a . V následujících grafech na Obr. 72 až jsou znázorněny všechny stanovené parametry vzorků s obsahem přísad pro regulaci objemových změn.

7.2.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY

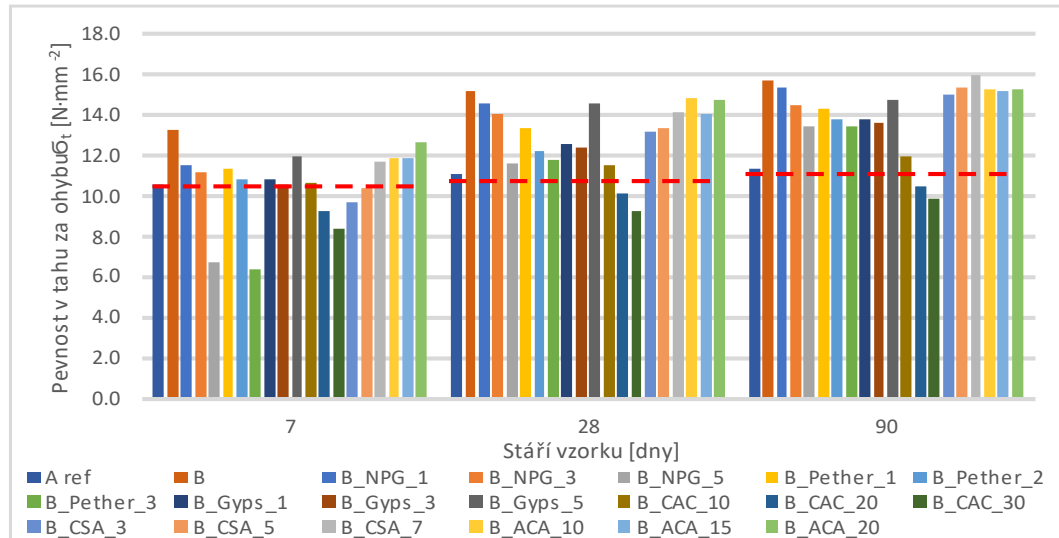
V následujícím grafu na Obr. 72 jsou pak znázorněny objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.



Obr. 72 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že přísady pro regulaci objemových změn nemají zásadní vliv na změnu objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu.

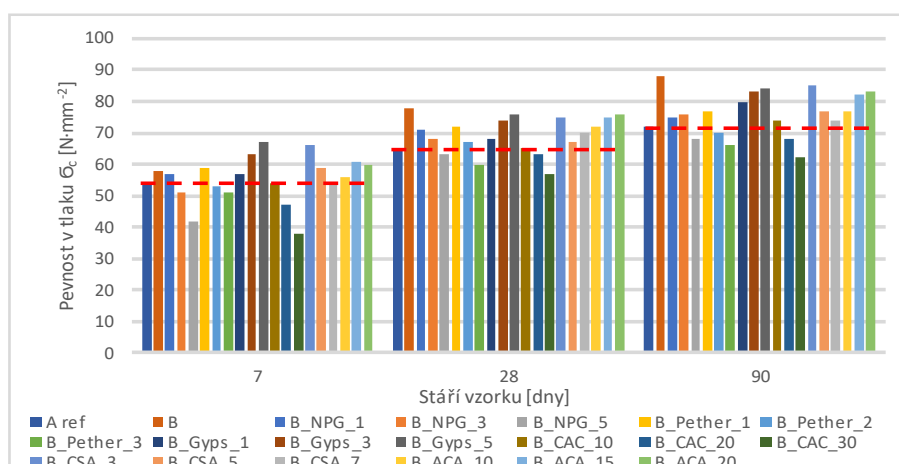
V následujícím grafu na Obr. 73 jsou znázorněny pevnosti v tahu za ohybu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.



Obr. 73 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného je patrné, že přísady pro regulaci objemových změn snižují pevnost v tahu za ohybu během prvních fází hydratace. Zásadní vliv po 28 a 90 zrání se projevil pouze u vzorků s obsahem CAC, tedy hlinitanového cementu. U těchto vzorků došlo ke snížení pevností v tahu za ohybu o více než 30 %.

V následujícím grafu na Obr. 74 jsou znázorněny pevnosti v tlaku vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.

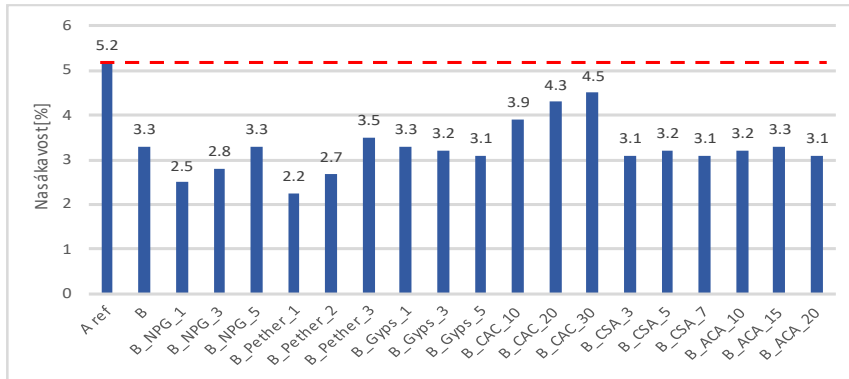


Obr. 74 Pevnost v tlaku vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že přísady pro regulaci objemových změn ovlivňují velmi různorodě pevnosti v tlaku. Nejvyššího nárůstu pevnosti v tlaku dosáhly

vzorky s obsahem 5 hm.% sádry z dávky pojiva a vzorky s obsahem 3 hm.% CSA cementu z dávky pojiva. Naopak snížením pevností v tlaku se projeví vzorky s obsahem CAC a vyšších dávek přísad na bázi NPG a Polyetheru.

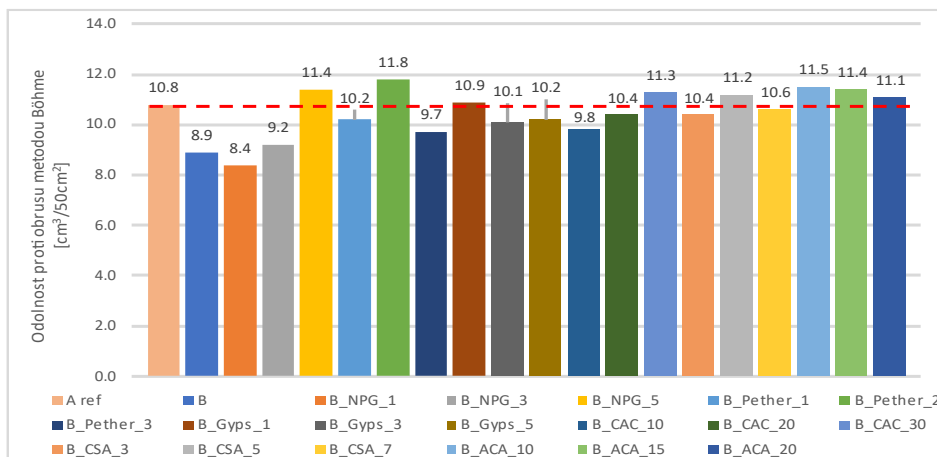
V následujícím grafu na Obr. 75 jsou znázorněny nasákavosti po 28 dnech zrání vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.



Obr. 75 Nasákavost vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného je zřejmé, že přídavky přísad pro regulaci objemových změn neměly zásadní vliv na nasákavost vzorků. Výrazné zvýšení nasákavosti však bylo zaznamenáno u vzorků s obsahem CAC, hlinitanového cementu.

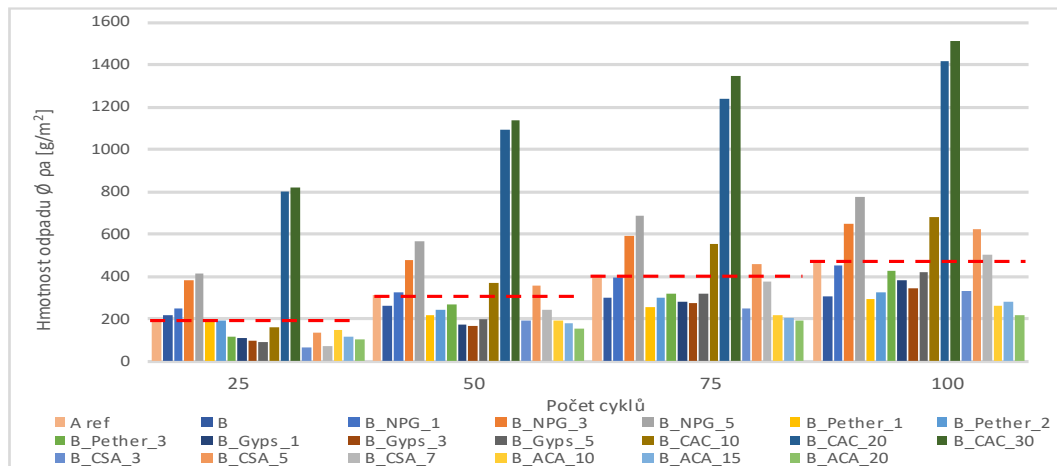
V následujícím grafu na Obr. 76 jsou znázorněny odolnosti proti obrusu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.



Obr. 76 Odolnost proti obrusu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výsledků vyplývá, že přídavek přísad pro regulaci objemových změn měl za následek snížení odolnosti proti obrusu. Nejvyšší snížení odolnosti vykazovaly vzorky s obsahem 5 % NPG a 2 % Polyetheru, nejvyšších odolností pak dosáhly vzorky s obsahem 1 % NPG.

V následujícím grafu na jsou znázorněny hodnoty odolnosti proti CHRL vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn trámečkovou metodou.

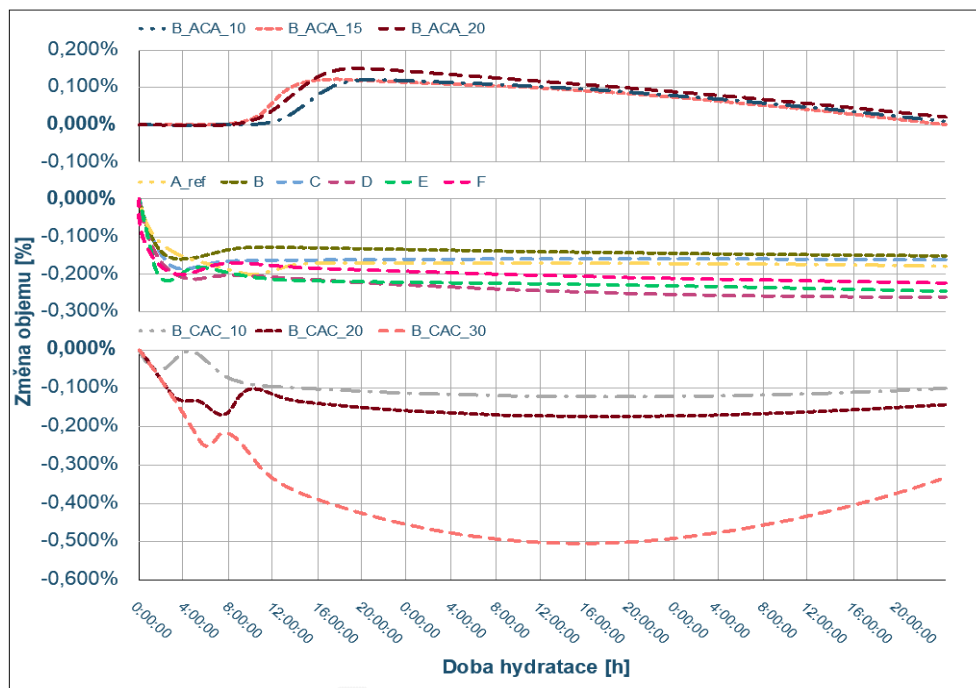


Obr. 77 Odolnost proti působení CHRL vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

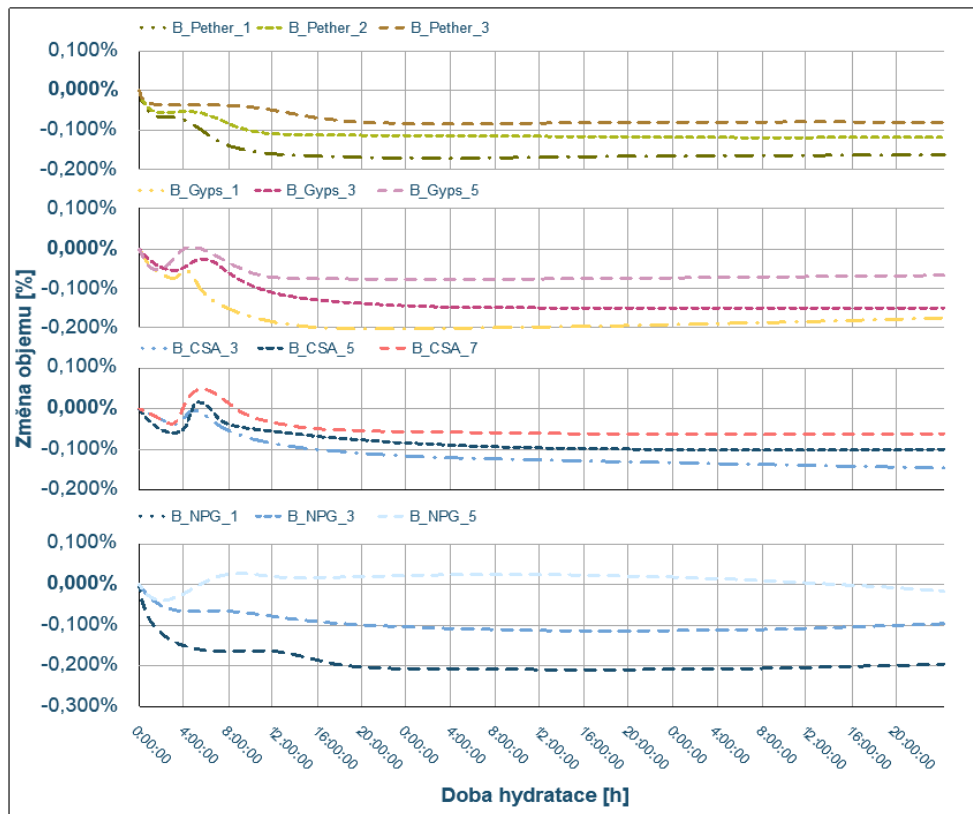
Z toho vyplývá, že přísady na bázi polyetheru, sádry a ACA cementu vedou ke zvýšení odolnosti proti působení CHRL. Naopak přísady na bázi NPG, CSA cementu či CAC cementu vedou ke snížení odolnosti proti působení CHRL.

7.2.2 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY A PŘÍDRŽNOSTI K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM

V následujících grafech na Obr. 78 jsou znázorněny hodnoty chemického smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.



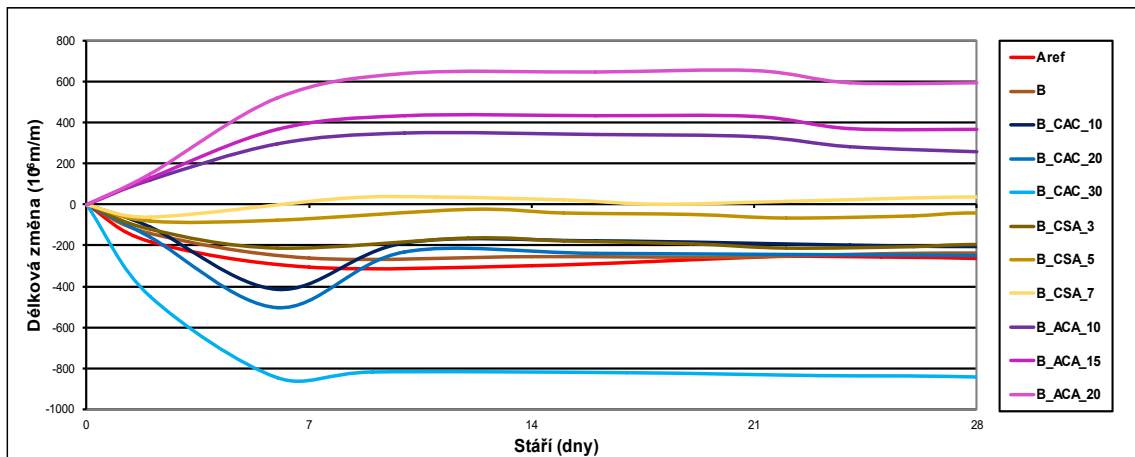
Obr. 78 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn



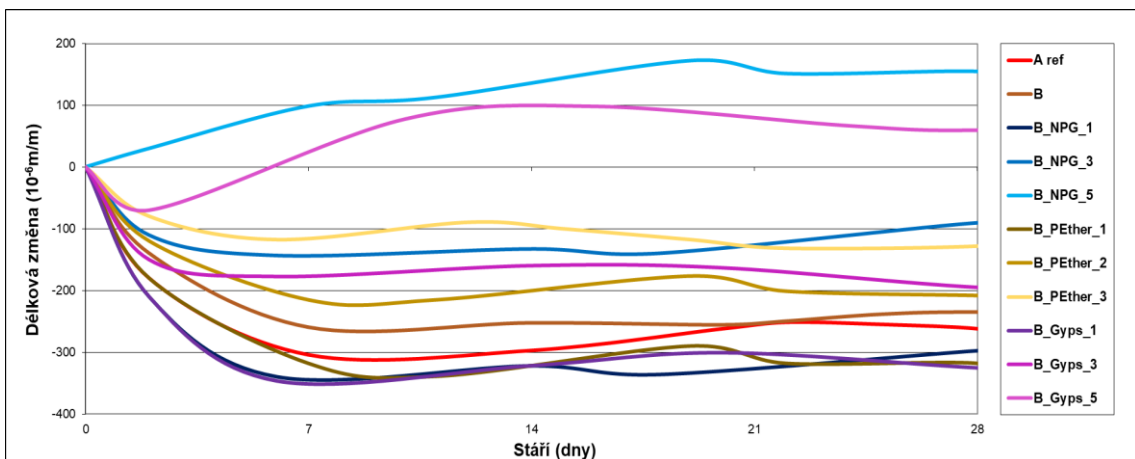
Obr. 79 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z uvedeného vyplývá, že použité přísady pro regulaci objemových změn mají zásadní vliv na smrštění, či rozpínání, ke kterému dochází během hydratačního procesu cementových a polymer-cementových kompozitů. Z grafů je patrné, že nejvyšších expanzivních účinků dosáhly přísady na bázi ACA cementu, CSA cementu a sádry. Naopak výrazného zvýšení smrštění dosáhly vzorky s obsahem vyšších dávek CAC cementu. Toto částečně potvrzuje výzkum J. Nehringa, kdy byly testovány kombinace OPC/CAC a OPC/CAC/CaSO₄ V případě kombinace OPC/CAC docházelo k urychlení tuhnutí, ale nedocházelo k expanzním účinkům [89]. Zároveň hydratační objemové změny CAC jsou vyšší než v případě OPC. V případě kombinace OPC/CAC tedy sice došlo k tvorbě velkého množství primárního ettringitu, který v počáteční fázi vykazuje v materiálu expanzi, což je z grafů na Obr. 78 viditelné, ale procesem další hydratace došlo k výraznému zhutnění celé struktury a k výraznému smrštění [90].

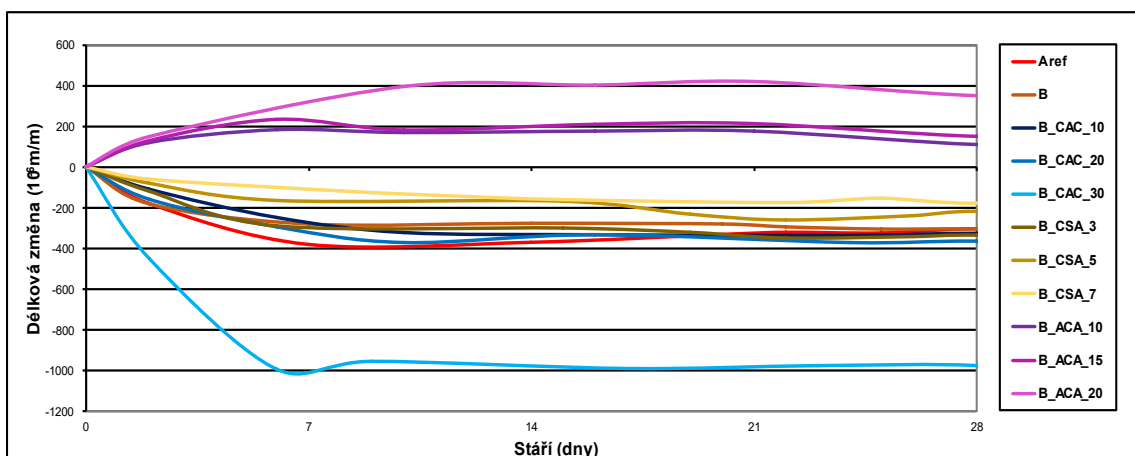
V následujících grafech na Obr. 80 až Obr. 84 jsou znázorněny hodnoty smrštění vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn trámečkovou metodou.



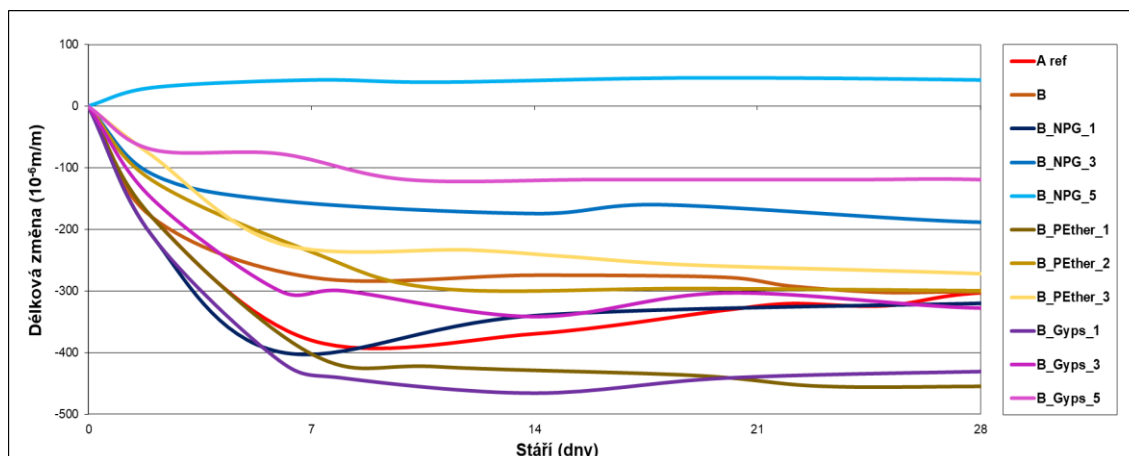
Obr. 80 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vodě



Obr. 81 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vodě



Obr. 82 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vlhku



Obr. 83 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vlhku

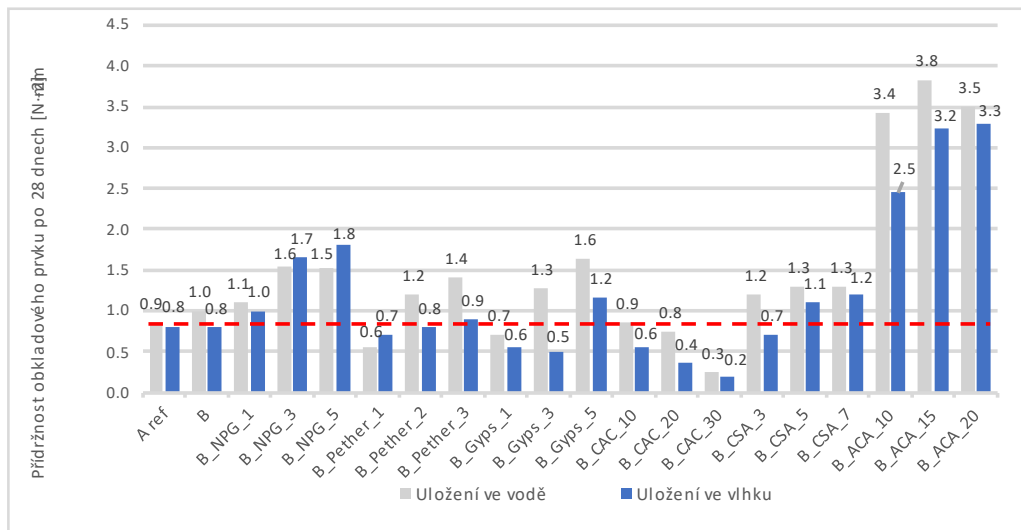
Z výše uvedeného je patrné, že smrštění bylo nižší u vzorků uložených ve vodě. Toto koresponduje s chováním cementových kompozitů. Zároveň u vzorků s obsahem ACA v množství 10, 20 a 30 % z hm. cementu, a u vzorků s obsahem CSA v množství 5 a 7 % z hm. cementu, byly při uložení ve vodě zaznamenány pouze kladné hodnoty smrštění, tedy expanze během celé sledované doby měření objemových změn trámečkovou metodou.

Vzorky obsahující ACA vykazovaly expanzi během celého sledovaného období také při uložení ve vlhkém prostředí, avšak hodnoty byly nižší než v případě uložení ve vodě.

Naopak nejvyššího smrštění dosahovaly vzorky s obsahem CAC v množství 30 % z hm. cementu. Hodnoty dosahovaly v případě vlhkého uložení smrštění okolo $1000 \cdot 10^{-6}$ m/m.

V následujícím grafu na Obr. 84 jsou znázorněny hodnoty přídržnosti k hladkým nenasákvým obkladovým prvkům vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn. V grafu je provedeno porovnání hodnot uložení vzorků ve vodním a vlhkém uložení. Podobně jako v předchozích etapách došlo téměř u všech sledovaných vzorků k vyšší přídržnosti k hladkým nenasákvým obkladovým prvkům při uložení ve vodním uložení. Toto opět koresponduje s trendem hodnot objemových změn, které jsou uvedeny výše v této kapitole. Obecně lze tedy pozorovat, že čím nižších hodnot smrštění (či vyšších hodnot expanze) cementová, či polymer-cementová hmota dosahovala, viz Obr. 78 - Obr. 83, tím vyšších hodnot přídržnosti k hladkým nenasákvým obkladovým prvkům hmota dosahovala, viz Obr. 84. Výše uvedený trend neplatí pro přísady na bázi NPG. Předpokladem je, že

NPG vykazuje podobné vlastnosti jako RDP, které jsou testovány v etapě III. této práce a že kromě regulace objemových změn v matici kompozitu vytváří také ve struktuře a směrem k obkladovým prvkům polymerní vazby.



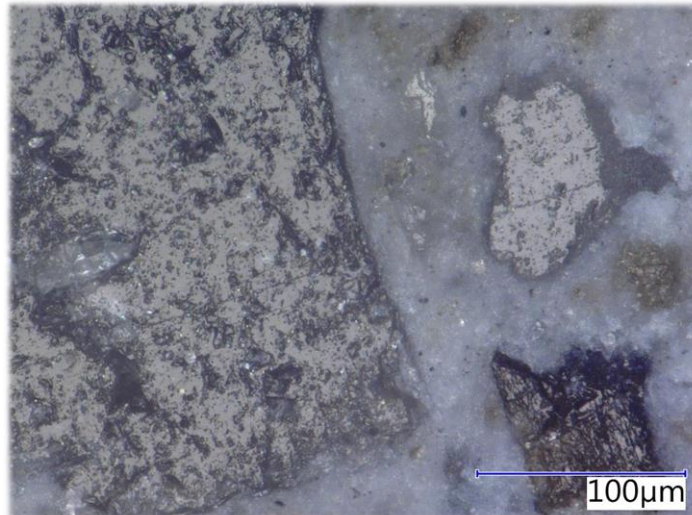
Obr. 84 Přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že přísady na bázi NPG vedou ke zvýšení přídržnosti u vzorků uložených ve vodním, ale také ve vlhkém uložení. Podobný trend je patrný také u vzorků s obsahem CSA a nejvýrazněji pak u vzorků s obsahem ACA.

Naopak u vzorků s CAC došlo ke snížení hodnot přídržností ve vodním i vlhkém uložení. V případě vzorků obsahujících přísady na bázi Poly-etheru, Sádry, CAC, CSA a ACA korespondují velmi úzce trendy hodnot přídržnosti s trendy hodnot objemových změn. V případě vzorků s obsahem NPG je závislost odlišná.

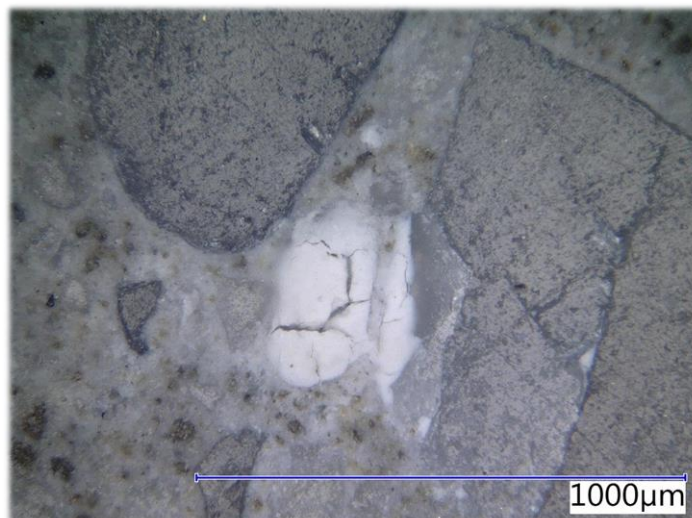
7.2.3 MIKROSTRUKTURA A XRD

Na následujících Obr. 85 až Obr. 87 jsou znázorněny snímky vzorků s obsahem přísad pro regulaci objemových změn. Zobrazeny jsou především detaily na tranzitní zóny okolo zrn kameniva, případně detaily poruch, či struktury cementového tmelu.



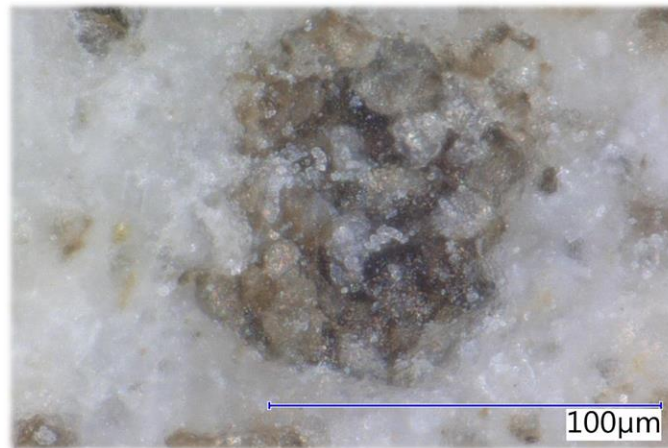
Obr. 85 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_ACA_20 při zvětšení 1000x

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že tranzitní zóna okolo jednotlivých zrn kameniva není narušena při použití přísady pro regulaci objemových změn na bázi ACA cementu a hmota dosahuje vysoké hutnosti. Jedná se o vzorky, které dosahovaly expanze, při měření hydratačních objemových změn trámečkovou metodou, více než 600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Z pozorování na optickém mikroskopu nebyly patrné trhliny ani jiné deformity ani při zvětšení 2500x.



Obr. 86 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Gyps_5 při zvětšení 250x

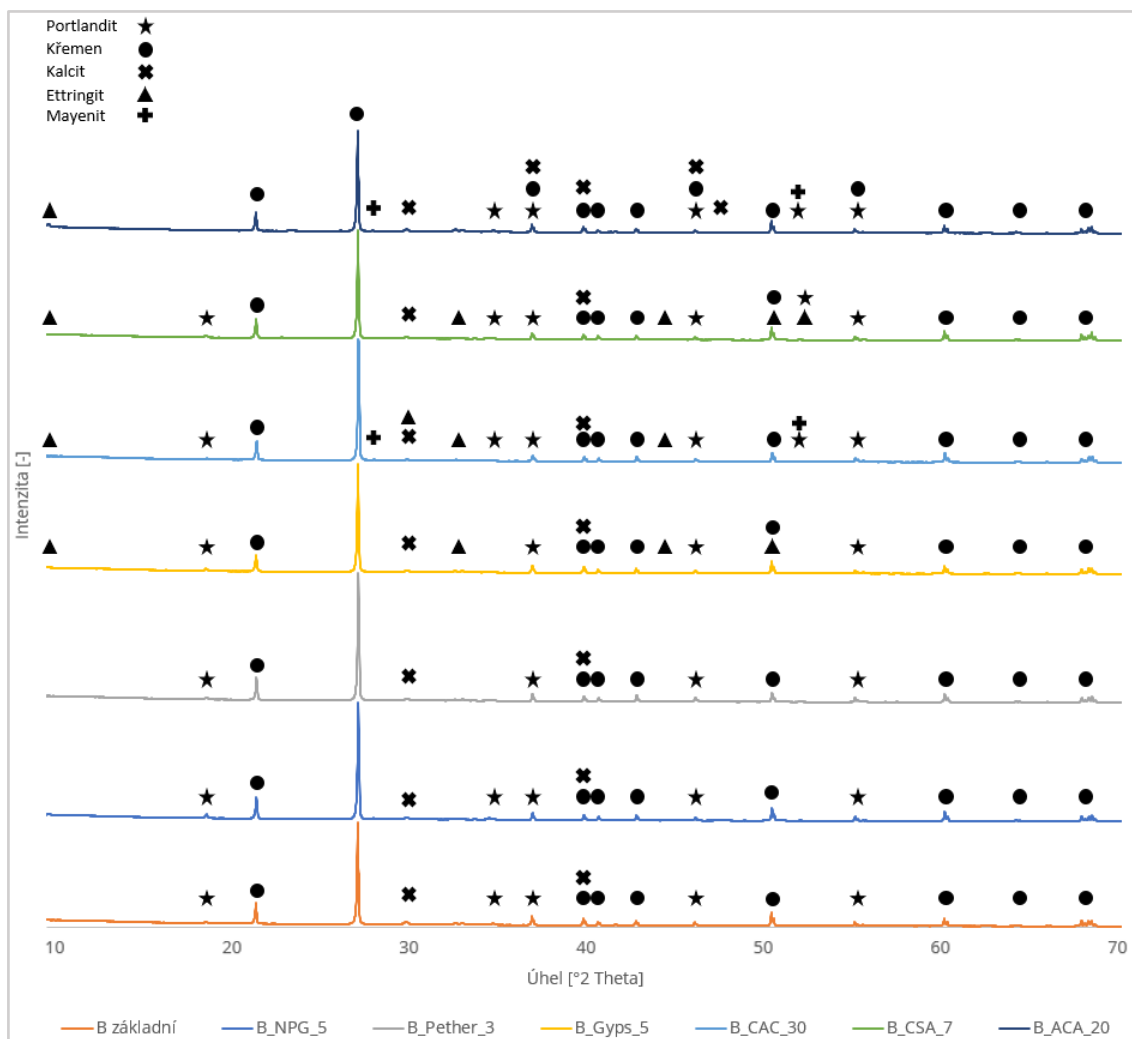
Na výše uvedeném obrázku je patrný shluk sádry o velikosti cca 250 μm ve vzorku s obsahem 5 % hm. přísady pro regulaci objemových změn na bázi sádry z hmotnosti cementu. Na snímku lze pozorovat, že okolní cementová matrice odňala vodu a v póru zůstalo popraskané zrno sádrového shluku.



Obr. 87 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_CSA_7 při zvětšení 2500x

Na výše uvedeném obrázku je patrný detail zrněk kameniva, které je velmi dobře zakotveno ve struktuře cementového tmele.

Na následujícím Obr. 88 je znázorněno porovnání záznamů z XRD jednotlivých vzorků ze IV. etapy.



Obr. 88 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků ze IV. etapy

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že jednotlivé přísady pro regulaci objemových změn mají rozdílný vliv na mineralogické složení vzorků. Toto je dáno především samotným mineralogickým složením použitých přísad.

Z výše uvedeného vyplývá, že:

- Vzorky B_NPG obsahující přísadu na bázi NPG, vykazují nižší intenzitu peaků portlanditu. Toto je dáno především zpomalením hydratační reakce a vyššího zreagování jednotlivých složek s příměsemi [91]. Ve vzorcích je také patrný obsah kalcitu. Tento se však vyskytuje ve všech vzorcích a je způsobený nejspíše částečnou karbonatací vzorků.
- Vzorky B_Pether obsahující přísadu na bázi Poly-etheru, jehož hlavní účinek je především v úpravě povrchového napětí cementového tmele se projevil nižšími peaky portlanditu, což opět signalizuje vyšší stupeň zreagování Ca(OH)_2 s příměsemi.
- Vzorky B_Gyps obsahující sádro vykazují kromě portlanditu také obsah ettringitu, je předpoklad, že tento vznikl právě z přídavku sádry do vzorků. Vznik ettringitu během hydratačního procesu se projevil expanzními vlastnostmi této směsi. Výsledky korespondují s výzkumem K. Kovlera, který testoval expanzní účinky kombinací portlandského cementu a sádry [92].
- Vzorky B_CAC obsahující kombinaci OPC a hlinitanového cementu (CAC) vykazují v XRD analýze obsah ettringitu a mayenitu, který se v CAC může vyskytovat a napomáhá krátkodobým pevnostem [18].
- Vzorky B_CSA obsahující kalcium-sulfo-aluminátový cement (CSA) vykazují obsah ettringitu, tento je jedním z produktů reakce CSA a OPC a napomáhá expanzním účinkům během hydratačního procesu.
- Vzorky B_ACA obsahující amorfní kalcium-aluminátový cement (ACA) obsahují kromě jiného, ettringit a mayenit. Mayenit je opět hojně zastoupen ve složení ACA. Zároveň ve vzorků není téměř patrný obsah portlanditu. Tento díky složení ACA zreagoval ve velké míře na odlišné minerály. Toto je potvrzeno také například ve výzkumu G. Le Saoût [93].

7.3 OPTIMALIZACE – VLIV PŘÍRAD PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

Optimalizační proces úpravy složení receptur s obsahem druhotných či odpadních surovin a následná volba optimalizovaných variant byla provedena pomocí optimalizačních metod, které jsou popsány v této kapitole.

V následujících tabulkách a jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a parametry vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.

Tab. 74 Přehled parametrů vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Označení	w/c	Konz.	OH		Nasáka- vost	CHRL 100	Obrus
	[-]	Ø [mm]	Ø D _{čB} [kg·m ⁻³]	Ø DZB ₂₈ [kg·m ⁻³]	Ø NV ₂₈ [%]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]
A ref	0.34	135	2330	2300	5.2	472	10.8
B	0.34	130	2310	2270	3.3	309	8.9
B_NPG_1	0.34	130	2290	2270	2.5	451	8.4
B_NPG_3	0.34	130	2280	2260	2.8	650	9.2
B_NPG_5	0.36	135	2220	2210	3.3	778	11.4
B_Pether_1	0.36	135	2290	2230	2.24	291	10.2
B_Pether_2	0.36	130	2290	2220	2.68	325	11.8
B_Pether_3	0.37	130	2240	2200	3.5	426	9.7
B_Gyps_1	0.37	130	2290	2260	3.3	384	10.9
B_Gyps_3	0.37	135	2300	2270	3.2	345	10.1
B_Gyps_5	0.38	135	2280	2260	3.1	422	10.2
B_CAC_10	0.37	130	2280	2260	3.9	683	9.8
B_CAC_20	0.38	135	2330	2300	4.3	1416	10.4
B_CAC_30	0.39	130	2280	2250	4.5	1515	11.3
B_CSA_3	0.38	135	2310	2250	3.1	335	10.4
B_CSA_5	0.39	130	2280	2220	3.2	626	11.2
B_CSA_7	0.39	135	2260	2240	3.1	503	10.6
B_ACA_10	0.36	130	2270	2250	3.2	262	11.5
B_ACA_15	0.35	130	2300	2280	3.3	280	11.4
B_ACA_20	0.34	130	2300	2280	3.1	217	11.1

Tab. 75 Přehled pevnostních charakteristik vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Označení	Ø Pevnost v tahu za ohybu			Ø Pevnost v tlaku			Přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům	
	[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]	
	7	28	90	7	28	90	Voda	Vlhko
A ref	10.6	11.1	11.4	54	65	72	0.9	0.8
B	13.3	15.2	15.7	58	78	88	1.0	0.8
B_NPG_1	11.5	14.6	15.4	57	71	75	1.1	1.0
B_NPG_3	11.2	14.1	14.5	51	68	76	1.6	1.7
B_NPG_5	6.7	11.6	13.5	42	63	68	1.5	1.8

B_Pether_1	11.4	13.4	14.3	59	72	77	0.6	0.7
B_Pether_2	10.8	12.2	13.8	53	67	70	1.2	0.8
B_Pether_3	6.4	11.8	13.5	51	60	66	1.4	0.9
B_Gyps_1	10.8	12.6	13.8	57	68	80	0.7	0.6
B_Gyps_3	10.6	12.4	13.6	63	74	83	1.3	0.5
B_Gyps_5	12	14.6	14.8	67	76	84	1.6	1.2
B_CAC_10	10.7	11.5	12	54	65	74	0.9	0.6
B_CAC_20	9.3	10.1	10.5	47	63	68	0.8	0.4
B_CAC_30	8.4	9.3	9.9	38	57	62	0.3	0.2
B_CSA_3	9.7	13.2	15	66	75	85	1.2	0.7
B_CSA_5	10.4	13.4	15.4	59	67	77	1.3	1.1
B_CSA_7	11.7	14.2	16	54	70	74	1.3	1.2
B_ACA_10	11.9	14.9	15.3	56	72	77	3.4	2.5
B_ACA_15	11.9	14.1	15.2	61	75	82	3.8	3.2
B_ACA_20	12.7	14.8	15.3	60	76	83	3.5	3.3

Jako rozhodující vlastnosti pro volbu optimalizované varianty byly zvoleny tyto klíčové vlastnosti:

- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu za ohybu
- Nasákavost
- Přídržnost
- Odolnost proti působení CHRL
- Odolnost proti obruš
- Chemické smrštění po 72 h hydratace
- Smrštění během prvních 28 dní hydratace – trámečkovou metodou

Vyhodnocení bylo provedeno metodou multikriteriálního srovnání. Váhy jednotlivých kritérií $f_i [-]$ byly stanoveny metodou párového srovnání. Následně byla provedena volba požadavku pro dané kritérium, viz následující Tab. 76, ve které je uvedeno, zda je u daného kritéria požadavek na maximalizaci nebo minimalizaci dané hodnoty [84; 85].

Tab. 76 Volba kritérií - vlastností vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Pořadí	Kritérium - Parametr	Jednotka	Optimum
1	Pevnost v tlaku	MPa	MAX
2	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	MAX
3	Nasákavost	hm. %	MIN
4	Přídržnost	MPa	MAX
5	Odolnost proti působení CHRL	g/m ²	MIN
6	Odolnost proti obruš	cm ³ /50cm ²	MIN
7	Chemické smrštění po 72 h hydratace	%	MIN
8	Smrštění trámečkovou metodou	·10 ⁻⁶ m/m	MIN

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny rozhodné parametry. Dle výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matrice A_{ij} , která obsahuje jednotlivé fyzikálně-mechanické parametry vzorků vyrobených dle receptur s přísadami pro regulaci objemových změn, viz Tab. 73.

Tab. 77 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

Ozn. Receptury	Parametr							
	Tlak	Tah	Nasá- kavost	Přídržnost ve vlhku	CHRL	Obrus	Chem. smrštění	Smrštění ve vlhku
	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	NV ₂₈ [%]	σ_f [MPa]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]	[%]	[·10 ⁻⁶ m/m]
B_NPG_1	75	15.4	2.5	1.0	451	8.4	-0.20	-320
B_NPG_3	76	14.5	2.8	1.7	650	9.2	-0.10	-188
B_NPG_5	68	13.5	3.3	1.8	778	11.4	-0.02	42
B_Pether_1	77	14.3	2.2	0.7	291	10.2	-0.18	-455
B_Pether_2	70	13.8	2.7	0.8	325	11.8	-0.11	-300
B_Pether_3	66	13.5	3.5	0.9	426	9.7	-0.08	-272
B_Gyps_1	80	13.8	3.3	0.6	384	10.9	-0.19	-431
B_Gyps_3	83	13.6	3.2	0.5	345	10.1	-0.17	-328
B_Gyps_5	84	14.8	3.1	1.2	422	10.2	-0.08	-119
B_CAC_10	74	12.0	3.9	0.6	683	9.8	-0.11	-325
B_CAC_20	68	10.5	4.3	0.4	1416	10.4	-0.15	-366
B_CAC_30	62	9.9	4.5	0.2	1515	11.3	-0.33	-974
B_CSA_3	85	15.0	3.1	0.7	335	10.4	-0.15	-335
B_CSA_5	77	15.4	3.2	1.1	626	11.2	-0.10	-216
B_CSA_7	74	16.0	3.1	1.2	503	10.6	-0.07	-176
B_ACA_10	77	15.3	3.2	2.5	262	11.5	0.01	110
B_ACA_15	82	15.2	3.3	3.4	280	11.4	0.00	200
B_ACA_20	83	15.3	3.1	3.3	217	11.1	-0.02	280

Rozhodovací matice A_{ij} byla následně transformována pomocí následujících vzorců na rovnici B_{ij} [84; 85]:

- Výpočet MINima:
$$b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$
- Výpočet MAXima:
$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN(a_{ij})}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$

Transformace uvedené matice proběhla na základě stanovení kritérií vlastností uvedených v Tab. 76, které byly určeny jako rozhodné pro polymer-cementové kompozity. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v Tab. 78.

Tab. 78 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

Ozn. Receptury	Kritérium - Parametr							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B_NPG_1	0.57	0.90	0.88	0.26	0.82	1.00	0.38	0.52
B_NPG_3	0.61	0.75	0.75	0.47	0.67	0.76	0.68	0.63
B_NPG_5	0.26	0.59	0.53	0.52	0.57	0.12	0.91	0.81
B_Pether_1	0.65	0.72	1.00	0.16	0.94	0.47	0.44	0.41
B_Pether_2	0.35	0.64	0.81	0.19	0.92	0.00	0.65	0.54
B_Pether_3	0.17	0.59	0.44	0.23	0.84	0.62	0.74	0.56
B_Gyps_1	0.78	0.64	0.53	0.11	0.87	0.26	0.41	0.43
B_Gyps_3	0.91	0.61	0.58	0.10	0.90	0.50	0.47	0.51
B_Gyps_5	0.96	0.80	0.62	0.31	0.84	0.47	0.74	0.68
B_CAC_10	0.52	0.34	0.27	0.11	0.64	0.59	0.65	0.52
B_CAC_20	0.26	0.10	0.09	0.05	0.08	0.41	0.53	0.49
B_CAC_30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
B_CSA_3	1.00	0.84	0.62	0.16	0.91	0.41	0.53	0.51
B_CSA_5	0.65	0.90	0.58	0.29	0.68	0.18	0.68	0.60
B_CSA_7	0.52	1.00	0.62	0.32	0.78	0.35	0.76	0.64
B_ACA_10	0.65	0.89	0.58	0.73	0.97	0.09	1.00	0.86
B_ACA_15	0.87	0.87	0.53	0.98	0.95	0.12	0.97	0.94
B_ACA_20	0.91	0.89	0.62	1.00	1.00	0.21	0.91	1.00

V následující Tab. 79 je vysvětlení jednotlivých vah, které jsou následně přiřazeny jednotlivým kritériím v Tab. 80.

Tab. 79 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku

Číslo	Porovnání kritérií
1	Rovnocenná kritéria
3	Slabě preferované kritérium
5	Silně preferované kritérium
7	Velmi silně preferované kritérium
9	Absolutní preference kritéria

Dle metody kvantitativního párového srovnání byla stanovena váha jednotlivých kritérií. Následně byla pro výpočet použita Saatyho matice viz Tab. 80. V této tabulce je výpočtem určena váha i -tého kritéria f_i [-] z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kritérií s_{ij} [-] pomocí následujících vzorců [84; 85]:

- $S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij}$
- $R_{ij} = (s_{ij})^n$
- $f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$

Tab. 80 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
1	1	1	1	2	1	0.8	1.2	1.2	
2	1	1	1.2	2	1	0.8	1.2	1.2	
3	1	0.83	1	2	1.2	1	1.5	1.5	
4	0.50	0.50	0.50	1	0.5	0.8	1	1	
5	1.00	1.00	0.83	2.00	1	1	1.5	1.5	
6	1.25	1.25	1.00	1.25	1	1	1.5	1.5	
7	0.83	0.83	0.67	1.00	0.67	0.67	1	1	
8	0.83	0.83	0.67	1.00	0.67	0.67	1.00	1	
S_i	0.43	0.36	0.22	20.00	0.27	0.23	4.86	4.86	
R_i	0.05	0.05	0.03	2.50	0.03	0.03	0.61	0.61	3.904
f_i	0.01	0.01	0.01	0.64	0.01	0.01	0.16	0.16	1.000

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejdůležitějším kritériem s nejvyšší vahou je hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům, následně se stejnou vahou chemické smrštění a nejvyšší hodnota smrštění stanovená trámečkovou metodou. Posledním krokem výpočtu je sestavení výpočtové matice C_{ij} uvedené v Tab. 81, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} a váhami jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 81 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

	Kritérium - Parametr									%
	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	
B_NPG_1	0.008	0.010	0.006	0.155	0.007	0.007	0.059	0.077	0.330	33.03
B_NPG_3	0.008	0.009	0.005	0.281	0.006	0.006	0.105	0.092	0.513	51.26
B_NPG_5	0.004	0.007	0.004	0.312	0.005	0.001	0.142	0.119	0.593	59.32
B_Pether_1	0.009	0.008	0.007	0.097	0.008	0.003	0.069	0.061	0.263	26.25
B_Pether_2	0.005	0.007	0.006	0.116	0.008	0.000	0.101	0.079	0.322	32.20
B_Pether_3	0.002	0.007	0.003	0.136	0.007	0.005	0.114	0.082	0.357	35.66
B_Gyps_1	0.011	0.007	0.004	0.068	0.007	0.002	0.064	0.064	0.227	22.71
B_Gyps_3	0.013	0.007	0.004	0.058	0.008	0.004	0.073	0.076	0.242	24.23
B_Gyps_5	0.013	0.009	0.004	0.186	0.007	0.003	0.114	0.100	0.439	43.86
B_CAC_10	0.007	0.004	0.002	0.068	0.005	0.004	0.101	0.076	0.268	26.76
B_CAC_20	0.004	0.001	0.001	0.033	0.001	0.003	0.082	0.071	0.196	19.58
B_CAC_30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.11
B_CSA_3	0.014	0.010	0.004	0.097	0.008	0.003	0.082	0.075	0.293	29.31
B_CSA_5	0.009	0.010	0.004	0.175	0.006	0.001	0.105	0.089	0.400	39.95
B_CSA_7	0.007	0.012	0.004	0.194	0.007	0.003	0.119	0.094	0.439	43.91
B_ACA_10	0.009	0.010	0.004	0.437	0.008	0.001	0.156	0.127	0.752	75.24
B_ACA_15	0.012	0.010	0.004	0.640	0.008	0.001	0.151	0.132	0.958	95.83
B_ACA_20	0.013	0.010	0.004	0.602	0.009	0.002	0.142	0.156	0.936	93.64

Z této výpočtové matice v Tab. 81 je patrné, že nejvyšších užitných parametrů dosáhla receptura:

- **B_ACA_15**

Tato receptura obsahovala dávku 15 % z hmotnosti cementu přísady pro regulaci objemových změn na bázi ACA cementu. Vzorky dle této receptury dosahovaly nejvyšších hodnot přídržností k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a zároveň jedny z nejnižších objemových změn.

Složení výše uvedených receptur je uvedeno v Tab. 73 tohoto dokumentu.

7.4 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ – VLIV PŘÍSAK PRO KOMPENZACI OBJEMOVÝCH ZMĚN

V rámci čtvrté etapy byl proveden návrh modifikace základní receptury B, která byla výstupem ETAPY II. této práce. Receptura byla modifikována šesti druhy přísad pro moderaci objemových změn cementových kompozitů. Zvolené přísady byly dávkovány v množství doporučené výrobcem, či na základě prací zabývajících se podobným tématem. Mezi ně patří například práce K. Harada a spol., zabývající se množstvím autogenního smrštění na základě obsahu sádry ve slínku nebo práce J. Nehring a spol. zabývající se reakcí kombinace OPC a CAC kompozitů. [94; 89] Dávkování jednotlivých přísad bylo v rozmezí 1-30 % z hm. cementu dle druhu přísady. Jednotlivé dávky přísad jsou uvedeny v Tab. 73.

Cílem čtvrté etapy bylo provést volbu vhodné receptury, resp. receptur s obsahem vhodného druhu a množství přísady pro regulaci objemových změn, které dosahovaly nejvyšších užitečných parametrů. Tyto parametry jsou identifikovány a stanoveny metodou multikriteriálního srovnání v předchozí části dokumentu.

Mezi nejdůležitější rozhodné parametry patřila přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění během hydratačního procesu.

V rámci čtvrté etapy byl zkoumán přídavek přísad pro regulaci objemových změn, mezi které patřily běžně využívané přísady na bázi CSA, či neopentyl-glykolu, zároveň však byl ověřován také vliv přísad méně využívaných, mezi něž patří polyethery, sádra, hlinitanový (CAC) cement, či ACA cement.

Přídavek přísad pro regulaci objemových změn se projevil různými způsoby.

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi NPG došlo ke:

- zpomalení hydratačního procesu a snížení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu,
- snížení hodnot smrštění chemického, ale také smrštění měřeného trámečkovou metodou,
- zvýšení přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům,

- zvýšení nasákavosti,
- snížení odolnosti proti působení CHRL a obrusu.

Zjištěné výsledky z velké míry korespondují s informacemi uvedenými v patentu E. Gartnera, týkajícího se NPG přísad pro redukci objemových změn [95].

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi polyetheru došlo ke:

- zpomalení hydratačního procesu a snížení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu,
- snížení hodnot smrštění chemického, ale také smrštění měřeného trámečkovou metodou,
- zvýšení přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům,
- snížení odolnosti proti působení CHRL a obrusu.

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi sádry došlo ke:

- zvýšení raných pevností v tlaku,
- snížení odolnosti proti obrusu,
- poklesu přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům (při dávce 1 % z hm. cementu, hodnoty vyšší o 100 % než v případě reference,
- snížení hodnot smrštění chemického, ale také smrštění měřeného trámečkovou metodou.

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi CAC došlo ke:

- výraznému snížení hodnot pevnosti v tlaku a tahu za ohybu,
- zvýšení nasákavosti,
- snížení přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům,
- výrazné snížení odolnosti proti působení CHRL,
- výraznému zvýšení smrštění.

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi CSA došlo ke:

- zvýšení dlouhodobých pevností v tahu za ohybu,
- snižování přídržnosti, ale všechny přídatky měly za následek vyšší přídržnost, než ref. receptura,
- snížení objemových změn chemických, ale také měřených trámečkovou metodou.

Výše uvedené výsledky částečně korespondují s informacemi uvedenými výrobcem.

Se zvyšující se dávkou přísady na bázi ACA došlo k:

- přidavek jakékoliv dávky měl za následek významné zvýšení hodnot přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům. V případě 15% přídatku z hm. cementu došlo ke zvýšení přídržnosti o více než 300 % oproti ref. receptuře. Zvýšení dávky způsobilo snižování přídržnosti,

ale všechny přísady měly za následek vyšší přídržnost, než ref. receptura,

- mírnému snížení nasákavosti,
- zvýšení odolnosti proti působení CHRL,
- výraznému snížení objemových změn chemických, ale také změn měřených trámečkovou metodou, což mělo za následek expanzivní vlastnosti kompozitu.

Výše uvedené výsledky částečně korespondují s informacemi uvedenými výrobcem.

Nejvyšších užitných parametrů dosáhla a na základě multikriteriálního srovnání byla zvolena jako nejvhodnější pro vstup do etapy V. této práce receptura **B_ACA_15** s obsahem 15 hm.% ACA z množství cementu.

8 ETAPA V. - OPTIMALIZACE VÝSTUPŮ, POKROČILÉ TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH SUROVINOVÝCH VARIANT, ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, SELEKCE OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

Předmětem páté etapy je ověření vlivu kombinace výstupů z předchozích etap. V rámci této etapy je provedena kombinace receptur obsahujících substituci primárních plnivových a pojivových složek druhotnými surovinami, dále receptur obsahujících RDP a receptur obsahujících přísady pro regulaci objemových změn. Jedná se o kombinaci receptur, které byly vybrány v jednotlivých etap na základě optimalizačního výpočtu. Tyto receptury jsou uvedeny v následující části.

Výstupem páté etapy je objemově kompenzovaná polymer-cementová správková a lepicí hmota s vysokým obsahem druhotných surovin a velmi vysokými fyzikálně-mechanickými parametry. Především dosahuje výsledná optimalizovaná hmota vysokých pevností v tahu za ohybu, pevností v tlaku, nízké nasákavosti, vysoké přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a vyšší odolnost proti obrušování.

8.1 NÁVRH RECEPTUR – VÝBĚR OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

Na základě optimalizačních výpočtů v jednotlivých předchozích etapách byly sestaveny receptury kombinující složení receptur dosahujících nejvyšších užitných vlastností. Jedná se o kombinaci následujících receptur:

- **B_basalt_85_glass_30**
- **B_basalt_85_HFA_30**
- **B_SA_2.5**
- **B_ACA_15**

Výsledkem jsou dvě upravené receptury, jejichž složení je uvedeno v následující Tab. 82.

Konkrétně se jedná o následující receptury:

- **B_basalt_85_glass_30** obsahující 85% substituci primární plnivové složky, stavebního písku, drceným odpadem z výroby obkladů z taveného čediče. Zbylých 15 hm.% plnivové složky je primární plnivo, křemenná moučka. Receptura dále obsahuje 30% substituci primární pojivové složky, portlandského cementu, jemně mletým odpadním obalovým sklem,

- **B_basalt_85_HFA_30** obsahující 85% substituci primární plnivové složky, stavebního písku, drceným odpadem z výroby obkladů z taveného čediče. Zbylých 15 hm.% plnivové složky je primární plnivo, křemenná moučka. Receptura dále obsahuje 30% substituci primární pojivové složky, portlandského cementu, vysokoteplotním popílkem,
- **B_SA_2.5** obsahující 2,5% přídavek RDP z hmotnosti pojiva,
- **B_ACA_15** obsahující 15% substituci zbývajících pojivové složky (portlandského cementu) ACA cementem (přísadou pro regulaci objemových změn).

Kombinací receptur **B_basalt_85_glass_30**, **B_SA_2.5** a **B_ACA_15** vznikla receptura **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** se složením viz následující Tab. 82.

Kombinací receptur **B_basalt_85_HFA_30**, **B_SA_2.5** a **B_ACA_15** vznikla receptura **B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15** se složením viz následující Tab. 82.

Tab. 82 Receptury PMCC s kombinací výstupů z předchozích etap

Složka	A ref	B	B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15	B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15	A ref + příměsí/přísky
OPC 42.5 R	350.0	290.0	172.5	172.5	254.2
HFA - Vysokoteplotní popílek	0.0	0.0	0.0	87.0	0.0
Glass - Odpadní obalové sklo	0.0	0.0	87.0	0.0	0.0
PR 30/31	148.0	148.9	0.0	0.0	148.0
PR 35	271.0	264.3	0.0	0.0	271.0
PR 1-2	227.7	233.5	0.0	0.0	227.7
Mikrosilika	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Metakaolin	0.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Suchý odpěňovač	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Suchý plastifikátor	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Odpad z výroby taveného čediče	0.0	0.0	548.0	548.0	0.0
Křemenná moučka	0.0	0.0	90.1	90.1	0.0
SA - styren-akrylát	0.0	0.0	8.8	8.8	8.8
ACA - ACA cement	0.0	0.0	30.5	30.5	30.5
Cena/kg	2.90 Kč	3.60 Kč	3.50 Kč	3.50 Kč	4.70 Kč
Cena/ref s přísadami	64 %	80 %	78 %	78 %	100 %

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny také ceny jednotlivých receptur za 1 kg směsi. Ceny byly vypočteny z velkoobchodních cen dodaných výrobcí jednotlivých materiálů. Cena předúpravy odpadu z výroby taveného čediče byla stanovena

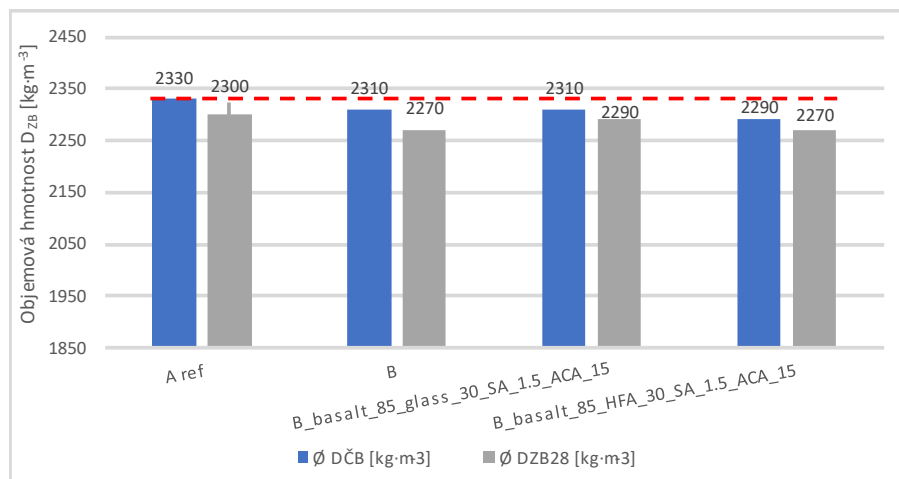
na 500,- Kč bez DPH za tunu. V případě, že by byla referenční směs, **A ref**, upravena pomocí primárních příměsí a přísad pro regulaci objemových změn a RDP, byla by cena této receptury cca 4,70,- Kč bez DPH za kilogram. Výsledná cena upravených receptur je tedy o 25 % nižší.

8.2 TESTOVÁNÍ – VÝBĚR OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

Vlastnosti čerstvých a ztvrdlých směsí byly testovány dle navržené metodiky etapy V. viz Obr. 9. Základní stanovené parametry jsou shrnuty v a . Následující grafy na Obr. 89 až Obr. 98 znázorňují výsledky testování základních fyzikálně-mechanických parametrů vzorků připravených dle základní **receptury B** s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.

8.2.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY

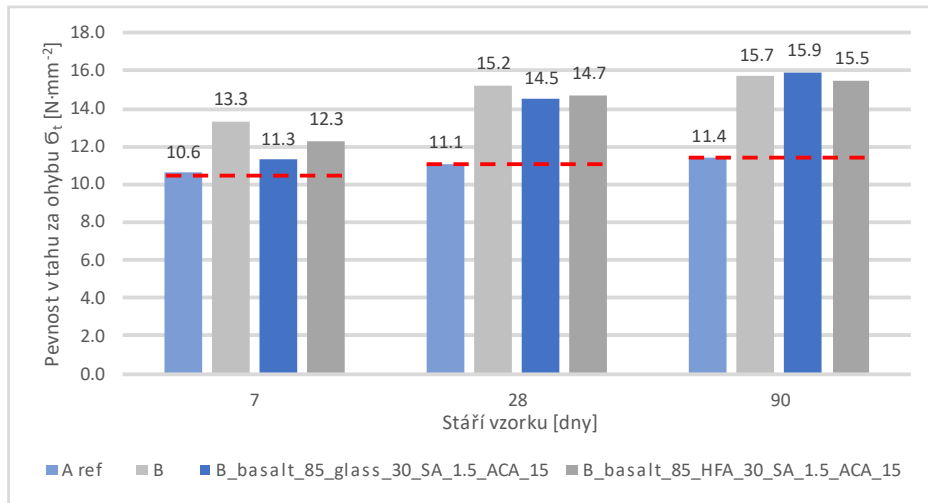
V následujícím grafu na Obr. 89 jsou znázorněny objemové hmotnosti vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.



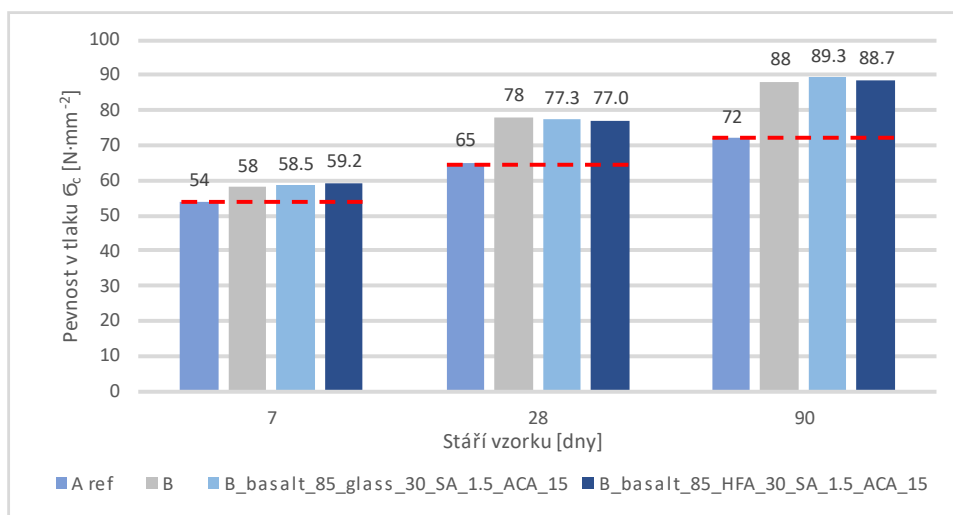
Obr. 89 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že vzorky dle receptury s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn dosahují řádově o několik procent nižších hodnot objemových hmotností v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu než receptura referenční **A ref**.

V následujících grafech na Obr. 90 a Obr. 91 jsou znázorněny hodnoty pevnosti v tahu za ohybu po 7, 28 a 90 dnech zrání a pevnosti v tlaku po 7, 28 a 90 dnech zrání.



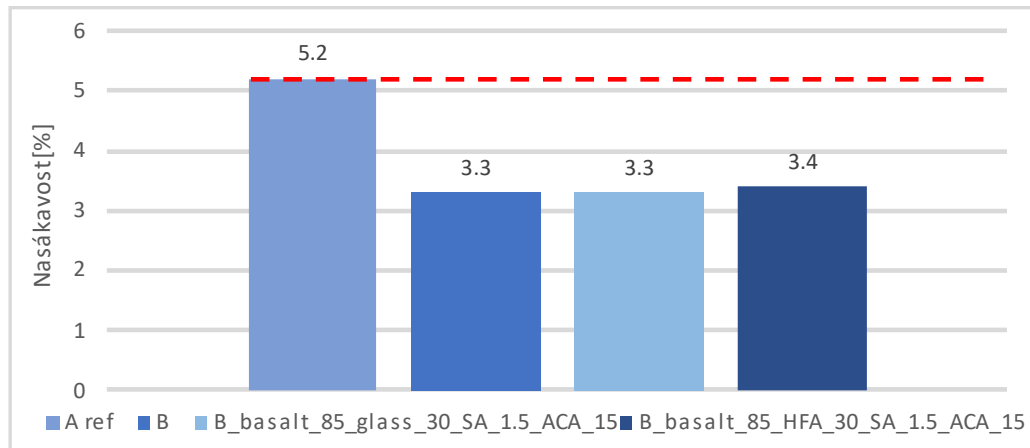
Obr. 90 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn



Obr. 91 Pevnost v tlaku vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že vzorky s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn dosahují vyšších užitných parametrů, než receptura referenční **A ref** a základní **receptura B**. Pozitivní přínos je pozorován především po 28 a 90 dnech zrání. Receptura s obsahem odpadního obalového skla dosahovala zanedbatelně vyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

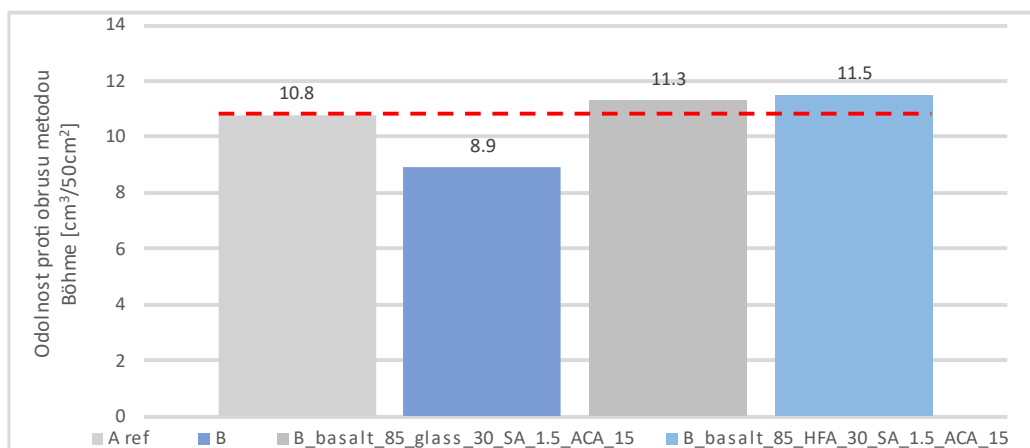
Na následujícím grafu na Obr. 92 jsou znázorněny hodnoty nasákavosti po 28 dnech zrání.



Obr. 92 Nasákavost vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že kombinace výstupů z předchozích etap nevedla k zásadnímu zvýšení nasákavosti oproti základní **receptuře B**.

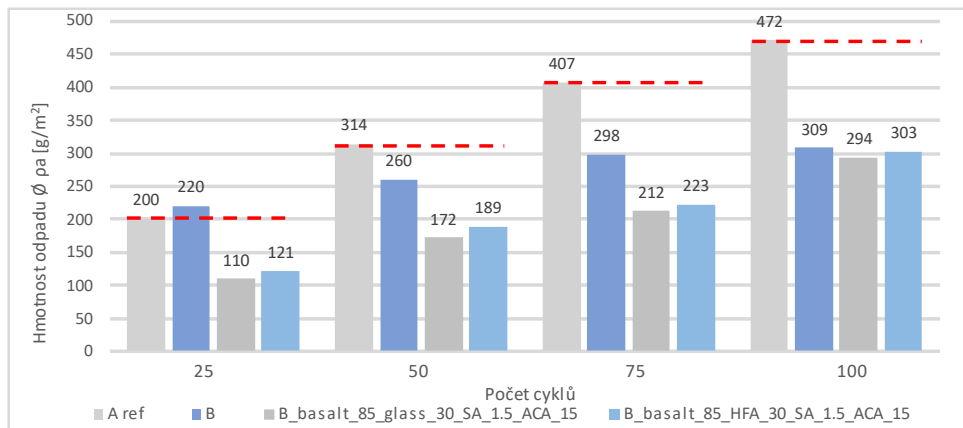
V následujícím grafu na Obr. 93 je znázorněna odolnost proti obrušování vzorků po 28 dnech zrání.



Obr. 93 Odolnost proti obrušování vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že kombinace výstupů z předchozích etap vedla k jistému snížení odolnosti proti obrušování metodou Böhme po 28 dnech zrání. Tyto výsledky korespondují s nižšími hodnotami odolnosti proti obrušování, které byly pozorovány u vzorků s obsahem ACA cementu jako přísady pro regulaci objemových změn.

V následujícím grafu jsou znázorněny hodnoty odolnosti proti CHRL po 25 až 100 cyklech.

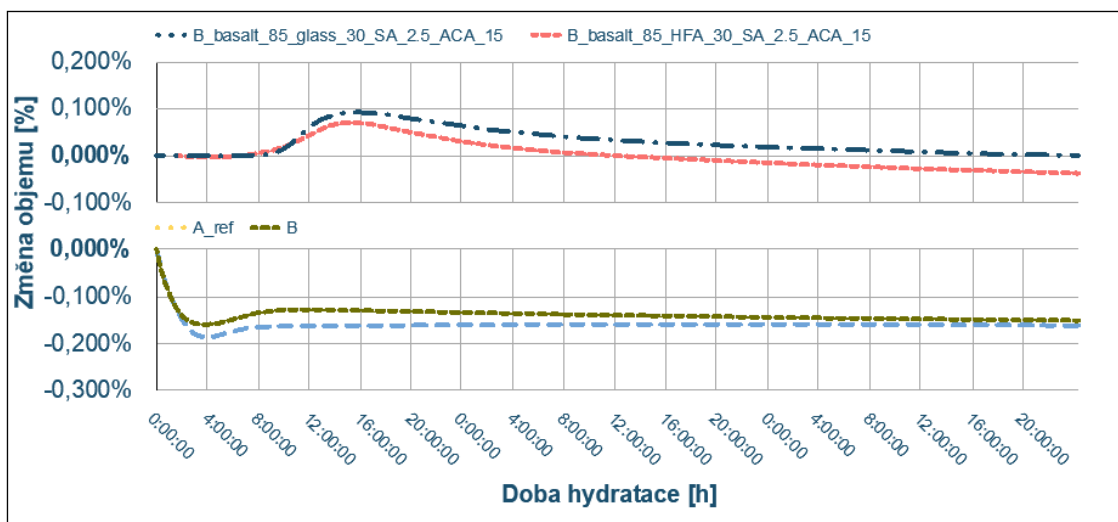


Obr. 94 Odolnost proti působení CHRL vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

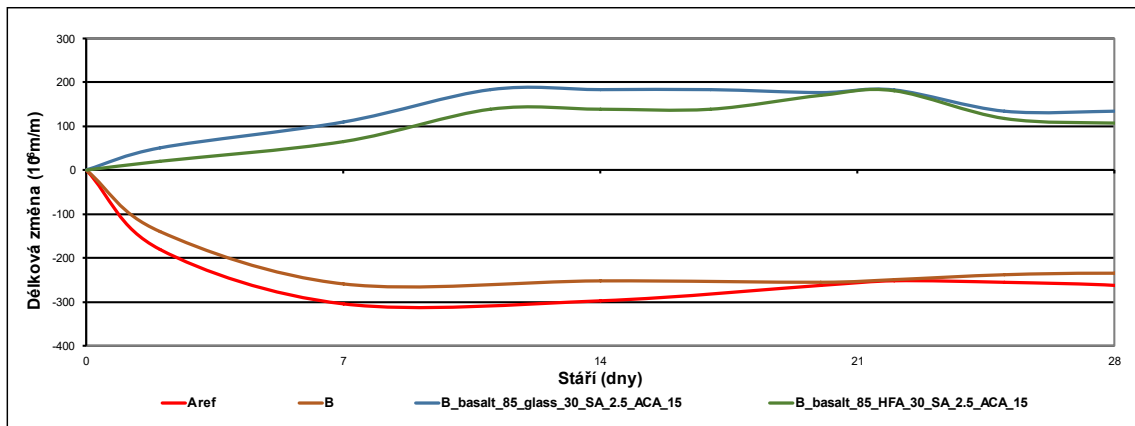
Z výše uvedeného vyplývá, že i po zkombinování výstupů z předchozích etap, dosahují receptury vyšších odolností proti působení CHRL, než receptura A referenční.

8.2.2 HYDRATAČNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY A PŘÍDRŽNOSTI K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM

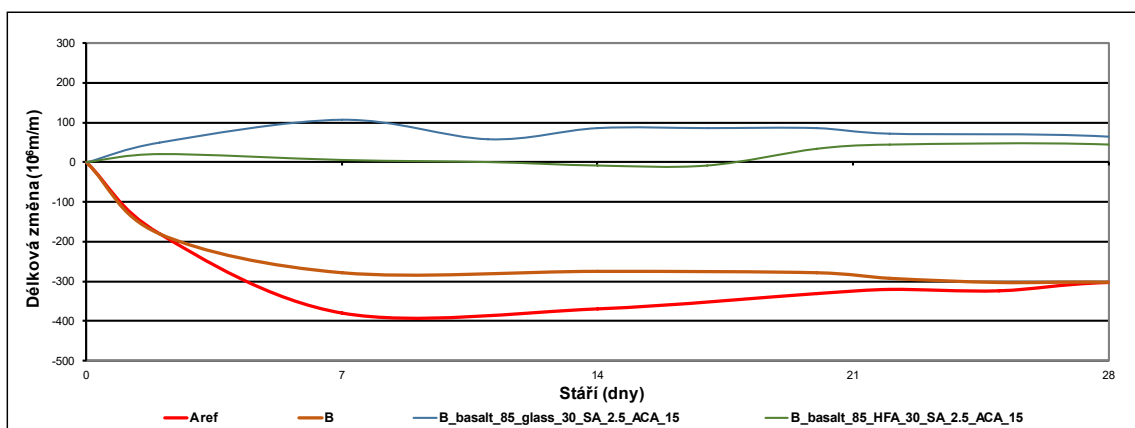
V následujících grafech na Obr. 95, Obr. 96 a Obr. 97 jsou znázorněny objemové změny vzorků s kombinací výstupů z předchozích etap.



Obr. 95 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn



Obr. 96 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn ve vodním uložení

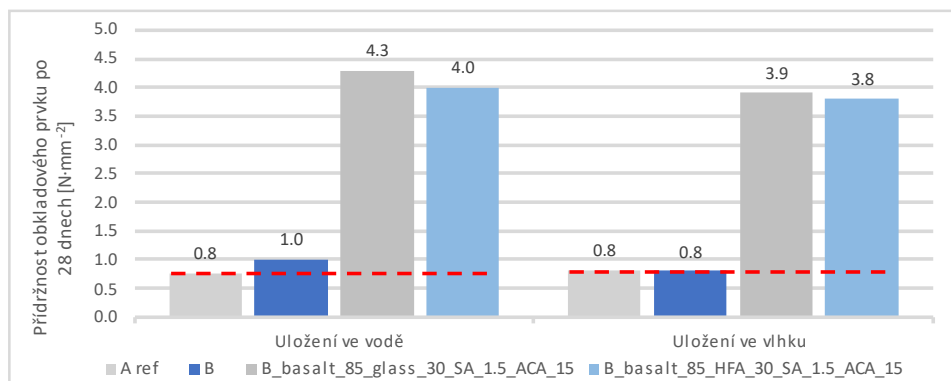


Obr. 97 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn ve vlhkém uložení

Ze zjištěných údajů je zřejmé, že kombinace druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn vedla k mírnému zvýšení hodnot smrštění, oproti vzorků pouze s obsahem ACA cementu. V případě chemického smrštění po 72 hodinách došlo v případě vzorků s obsahem HFA k expanzi a následnému smrštění k hodnotám cca 0,04 %, v případě vzorků s obsahem odpadního obalového skla došlo k expanzi a následnému smrštění na hodnotu 0,00 %.

V případě objemových změn měřených trámečkovou metodou, došlo v případě obou výše zmíněných receptur k expanzi. V případě receptury s obsahem odpadního obalového skla byla expanze vyšší.

V následujícím grafu na Obr. 98 jsou uvedeny hodnoty přídržnosti k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům.

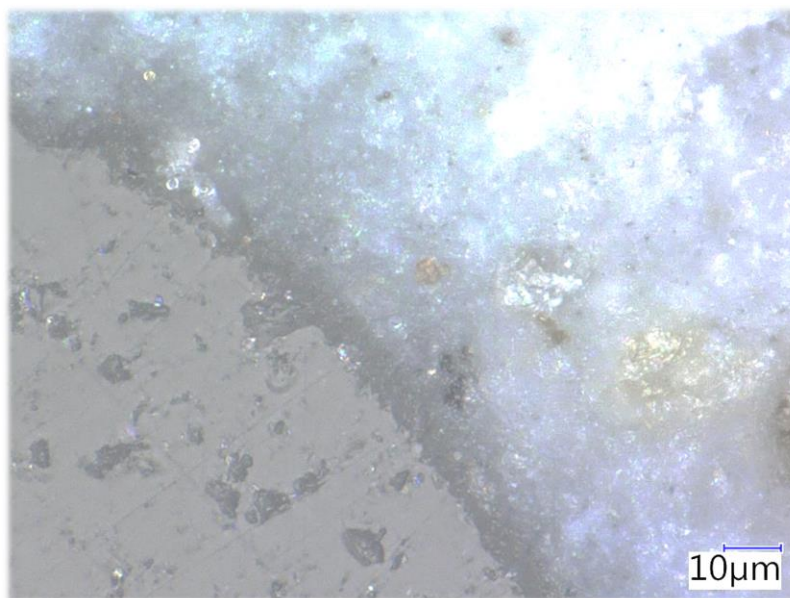


Obr. 98 Přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Z výše uvedeného vyplývá, že došlo k synergii polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn a upravené receptury dosahovaly velmi vysokých parametrů přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

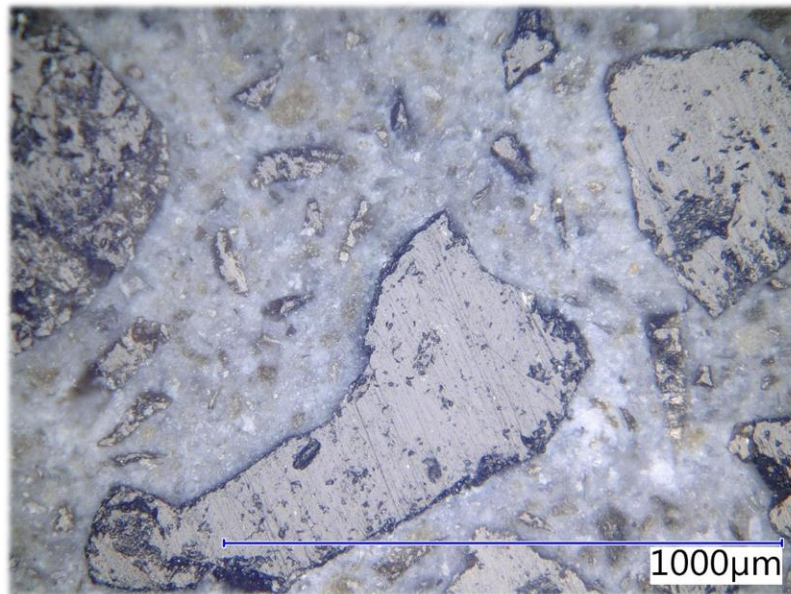
8.2.3 MIKROSTRUKTURA

Na následujících Obr. 99 až Obr. 101 jsou znázorněny snímky vzorků dle receptur kombinujících výstupy z předchozích etap. Vzorků dle receptur **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** a **B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15**.



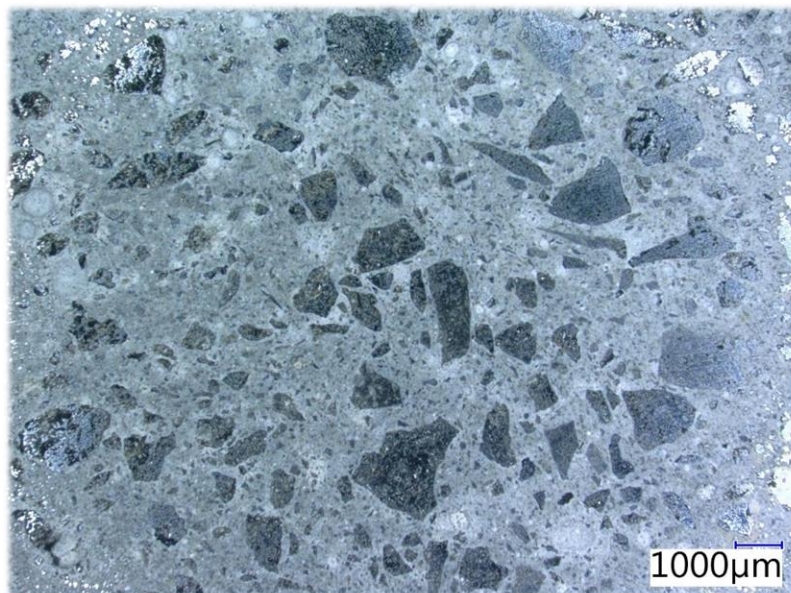
Obr. 99 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** při zvětšení 2500x

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že tranzitní zóna okolo jednotlivých zrn kameniva je velmi kvalitně spojena s okolní cementovou matricí, ve které jsou patrné jemné podíly čedičového kameniva a křemenné moučky v cementovém tmelu.



Obr. 100 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15 při zvětšení 200x

Na výše uvedeném obrázku jsou znázorněna jednotlivá zrna drceného čedičového kameniva včetně jemných podílů. Dále jsou viditelná zrna jemných podílů primárního plniva – křemenné moučky obalená velmi světlým cementovým tmelem, což je způsobeno především obsahem jemně mletého odpadního skla.



Obr. 101 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15 při zvětšení 20x

Na výše uvedeném obrázku je patrná struktura vzorku s obsahem čedičového kameniva a substitucí primárního pojiva vysokoteplotním popílkem. Na snímku je patrná distribuce ostrohranného drceného čedičového kameniva které je pevně

spojeno s okolní matricí. Na vzorek na snímku byla aplikována zinečnatá pasta pro zvýraznění pórové struktury. Tato je velmi jemná a nejsou na snímku patrné velké póry, což svědčí také o vysoké hutnosti daného vzorku a nízké pórovitosti.

8.3 OPTIMALIZACE – VÝBĚR OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

Optimalizační proces úpravy složení receptur s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn a následná volba optimalizovaných variant byla provedena pomocí optimalizačních metod, které jsou popsány v této kapitole.

V následujících tabulkách jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a parametry vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.

Tab. 83 Přehled parametrů vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Označení	w/c	Konz.	OH		Nasáka- vost	CHRL 100	Obrus
	[-]	Ø [mm]	Ø D _{CB} [kg·m ⁻³]	Ø DZB ₂₈ [kg·m ⁻³]	Ø NV ₂₈ [%]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]
A ref	0.34	135	2330	2300	5.2	472	10.8
B	0.34	130	2310	2270	3.3	309	8.9
B_basalt_85_glass_30_ SA_2.5_ACA_15	0.37	135	2310	2290	3.3	294	11.3
B_basalt_85_HFA_30_ SA_2.5_ACA_15	0.37	135	2290	2270	3.4	303	11.5

Tab. 84 Přehled pevnostních charakteristik vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Označení	Ø Pevnost v tahu za ohybu			Ø Pevnost v tlaku			Přídržnost k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům	
	[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]			[N·mm ⁻²]	
	7	28	90	7	28	90	Voda	Vlhko
A ref	10.6	11.1	11.4	54	65	72	0.8	0.8
B	13.3	15.2	15.7	58	78	88	1.0	0.8
B_basalt_85_glass_30_ SA_2.5_ACA_15	11.3	14.5	15.9	58.5	77.3	89.3	4.3	3.9
B_basalt_85_HFA_30_ SA_2.5_ACA_15	12.3	14.7	15.5	59.2	77.0	88.7	4.0	3.8

Jako rozhodující vlastnosti pro volbu optimalizované varianty byly zvoleny tyto klíčové vlastnosti:

- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu za ohybu
- Nasákavost
- Přídržnost
- Odolnost proti působení CHRL
- Odolnost proti ohrusu
- Chemické smrštění po 72 h hydratace
- Smrštění během prvních 28 dní hydratace – trámečkovou metodou

Vyhodnocení bylo provedeno metodou multikriteriálního srovnání. Váhy jednotlivých kritérií $f_i [-]$ byly stanoveny metodou párového srovnání. Následně byla provedena volba požadavku pro dané kritérium, viz následující Tab. 85, ve které je uvedeno, zda je u daného kritéria požadavek na maximalizaci nebo na minimalizaci dané hodnoty [84; 85].

Tab. 85 Volba kritérií - vlastností vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn

Pořadí	Kritérium – Parametr	Jednotka	Optimum
1	Pevnost v tlaku	MPa	MAX
2	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	MAX
3	Nasákavost	hm. %	MIN
4	Přídržnost	MPa	MAX
5	Odolnost proti působení CHRL	g/m ²	MIN
6	Odolnost proti ohrusu	cm ³ /50cm ²	MIN
7	Chemické smrštění po 72 h hydratace	%	MIN
8	Smrštění trámečkovou metodou	·10 ⁻⁶ m/m	MIN

V této tabulce jsou uvedeny rozhodné parametry. Dle výše uvedených kritérií byla sestavena rozhodovací matrice A_{ij} , která obsahuje jednotlivé fyzikálně-mechanické parametry vzorků vyrobených dle receptur s přísadami pro regulaci objemových změn, viz Tab. 82.

Tab. 86 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn

Ozn. Receptury	Parametr							
	Tlak	Tah	Nasá- kavost	Přídržnost ve vlhku	CHRL	Obrus	Chem. smrštění	Smrštění ve vlhku
	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	NV ₂₈ [%]	σ_f [MPa]	[g/m ²]	[cm ³ / 50cm ²]	[%]	[·10 ⁻⁶ m/m]
A ref	72	11.4	5.2	0.8	472	10.8	-0.15	-303
B	88	15.7	3.3	0.8	309	8.9	-0.14	-302
B_basalt_85_glass 30_SA_2.5_ACA_15	89	15.9	3.3	3.9	294	11.3	0.00	161
B_basalt_85_HFA 30_SA_2.5_ACA_15	89	15.5	3.4	3.8	303	11.5	-0.04	112

Rozhodovací matice A_{ij} byla poté transformována pomocí následujících vzorců na rovnici B_{ij} [84; 85]:

- Výpočet MINima:
$$b_{ij} = \frac{MAX(a_{ij}) - a_{ij}}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$
- Výpočet MAXima:
$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN(a_{ij})}{MAX(a_{ij}) - MIN(a_{ij})}$$

Transformace předmětné matice proběhla na základě stanovení kritérií vlastností uvedených v Tab. 85, které byly určeny jako rozhodné pro polymer-cementové kompozity. Transformovaná matice B_{ij} je uvedena v Tab. 87.

Tab. 87 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

Ozn. Receptury	Kritérium - Parametr							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A ref	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
B	0.92	0.96	1.00	0.00	0.92	1.00	0.07	0.00
B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.08	1.00	1.00
B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15	0.96	0.91	0.95	0.97	0.95	0.00	0.73	0.89

Následující Tab. 88 obsahuje vysvětlení jednotlivých vah, které jsou následně přiřazeny jednotlivým kritériím v Tab. 89.

Tab. 88 Popis vah při hodnocení multikritériální analýzy pro následující tabulku

Číslo	Porovnání kritérií
1	Rovnocenná kritéria
3	Slabě preferované kritérium
5	Silně preferované kritérium
7	Velmi silně preferované kritérium
9	Absolutní preference kritéria

Dle metody kvantitativního párového srovnání byla stanovena váha jednotlivých kritérií. Následně byla pro výpočet použita Saatyho matice viz Tab. 89.

V této tabulce je výpočtem stanovena váha i -tého kritéria f_i [-] z hodnot bodového hodnocení jednotlivých kritérií s_{ij} [-] pomocí následujících vzorců [84; 85]:

- $S_{ij} = \prod_{j=1}^n s_{ij}$
- $R_{ij} = (s_{ij})^n$
- $f_i = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^n R_{ij}}$

Tab. 89 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

j/i	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
1	1	1	1	2	1	0.8	1.2	1.2	
2	1	1	1.2	2	1	0.8	1.2	1.2	
3	1	0.83	1	2	1.2	1	1.5	1.5	
4	0.50	0.50	0.50	1	0.5	0.8	1	1	
5	1.00	1.00	0.83	2.00	1	1	1.5	1.5	
6	1.25	1.25	1.00	1.25	1	1	1.5	1.5	
7	0.83	0.83	0.67	1.00	0.67	0.67	1	1	
8	0.83	0.83	0.67	1.00	0.67	0.67	1.00	1	
S_i	0.43	0.36	0.22	20.00	0.27	0.23	4.86	4.86	
R_i	0.05	0.05	0.03	2.50	0.03	0.03	0.61	0.61	3.904
f_i	0.01	0.01	0.01	0.64	0.01	0.01	0.16	0.16	1.000

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejdůležitějším kritériem s nejvyšší vahou je hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a následně se stejnou vahou chemické smrštění a nejvyšší hodnota smrštění stanovená trámečkovou metodou. Posledním krokem výpočtu je sestavení výpočtové matice C_{ij} uvedené v Tab. 90, která byla získána součinem transformované matice B_{ij} a váhami jednotlivých kritérií f_i .

Tab. 90 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn

	Kritérium - Parametr									%
	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	
A ref	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.004	0.40
B	0.013	0.011	0.007	0.000	0.008	0.007	0.010	0.000	0.057	5.69
B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15	0.014	0.012	0.007	0.640	0.009	0.001	0.156	0.156	0.993	99.33
B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15	0.013	0.011	0.007	0.620	0.008	0.000	0.114	0.139	0.912	91.18

Z výsledné výpočtové matice v Tab. 90 je patrné, že nejvyšších užitných parametrů dosáhla receptura:

- **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15**

Složení výše uvedených receptur je uvedeno v Tab. 82 tohoto dokumentu.

8.4 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ – VÝBĚR OPTIMALIZOVANÉHO ŘEŠENÍ

V rámci páté etapy byl proveden návrh a testování receptur, které kombinovaly výstupy etap předchozích. Tyto spočívaly v kombinaci optimalizací referenční receptury, která obsahovala primární pojivové a plnivé složky. Optimalizované receptury v rámci páté etapy zahrnovaly kombinaci substituce primárních pojiv pomocí: primárních příměsí (metakaolin, neuhněná mikrosilika) a druhotných surovin (vysokoteplotní popílek, jemně mleté odpadní obalové sklo). Dále substituci primárních plniv pomocí odpadu z výroby taveného čediče. A také substituci primární pojivové složky přísadou pro regulaci objemových změn, ACA cementem a přídavek polymerního redispergovatelného prášku (RDP) na bázi styren-akrylátu (SA).

V rámci páté etapy byly navrženy dvě receptury, které se lišily v druhu použité druhotné suroviny pro substituci primární pojivové složky. Použit byl vysokoteplotní popílek a odpadní obalové sklo v dávce 30 hm.% z dávky portlandského cementu v základní receptuře B (tato obsahovala metakaolin a mikrosiliku).

Receptury, které byly testovány v rámci páté etapy jsou uvedeny v Tab. 82. Po ověření fyzikálně-mechanických vlastností receptur proběhl optimalizační výpočet metodou párového srovnání, viz kapitola 8.3 Optimalizace.

Mezi nejdůležitější rozhodné parametry patřila přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění během hydratačního procesu.

Nejvyšších užitných parametrů dosáhly vzorky dle receptury **B_basalt_85_glass_30_SA_1.5_ACA_15**. Tato receptura obsahovala oproti receptuře referenční – A ref:

- 85% substituci primárních kameniv plnivem na bázi odpadu z výroby taveného čediče,
- 8,5% substituci primárního pojiva a portlandského cementu, metakaolinem,
- 8,5% substituci primárního pojiva a portlandského cementu, sráženou neuhněnou mikrosilikou,
- 8,7% substituci primárního pojiva a portlandského cementu ACA cementem,
- 25% substituci primárního pojiva a portlandského cementu, jemně mletým odpadním sklem z výroby obalového skla,

- přídavek 2,5 hm.% z hmotnosti RDP na bázi styren-akrylátu.

Celkově tedy receptura B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15 (1 OPTIMUM) obsahuje 50,7 hm.% substituci primárního pojiva a portlandského cementu, primárními, či druhotnými příměsemi. Zároveň obsahuje 85 hm.% substituci primárního plniva, tříděných křemenných písků, odpadem z výroby taveného čediče.

Vzorky dle této receptury dosahovaly nejvyšších hodnot přídržností k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a zároveň jedny z nejnižších objemových změn.

Receptura tedy dosahuje výrazně vyšších užitných parametrů, než receptura referenční, a to při celkové substituci primárních pojivových složek o 25 hm.% a primárních plnivových složek o 85 hm.%.

9 ETAPA VI. - ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI KOMPOZITŮ K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM NA JEJICH HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH

V rámci výzkumu a vývoje polymer-cementových kompozitů v rámci předchozích etap tohoto dokumentu bylo zjištěno, že existuje závislost mezi hodnotami objemových změn měřených trámečkovou metodou, potažmo metodou kontinuálního hydrostatického vážení a hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

V následujících odstavcích je popsán vliv a závislost hydratačních objemových změn u vysoce-pevnostních cementových kompozitů na přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

Předpokladem je, že tato závislost platí především pro vysokopevnostní cementové kompozity, které jsou v rámci této práce řešeny, nikoliv pro klasická cementová a polymer-cementová lepidla, která jsou běžně využívána v občanské výstavbě a vyznačují nízkým modulem pružnosti a nízkými pevnostními charakteristikami.

V rámci práce bylo zjištěno, že tato závislost platí pro cementové kompozity, které nejsou modifikovány polymerními redispergovatelnými prášky (RDP), či přísadou na bázi neopentyl-glykolu (NPG). Závislost tedy platí pro kompozity vyznačujícími se hydraulickými vazbami, nikoli vazbami polymerními.

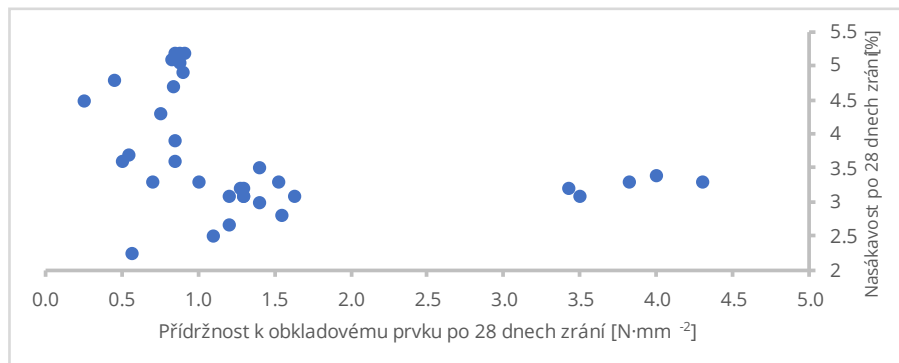
9.1 TESTOVÁNÍ – ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI KOMPOZITŮ K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM NA JEJICH HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH

V rámci výzkumu byla ověřována závislost jednotlivých fyzikálně-mechanických parametrů na hydratačních objemových změnách vzorků připravených podle receptur v rámci předchozích etap práce.

Jednotlivé výsledky byly vyneseny do grafů a následně byla za pomoci regresních metod stanovena optimální regresní funkce, její rovnice a také hodnota indexu determinace, resp. index korelace pro ověření, zda jsou hodnoty na sobě skutečně závislé a zda jejich závislost lze statisticky dokázat.

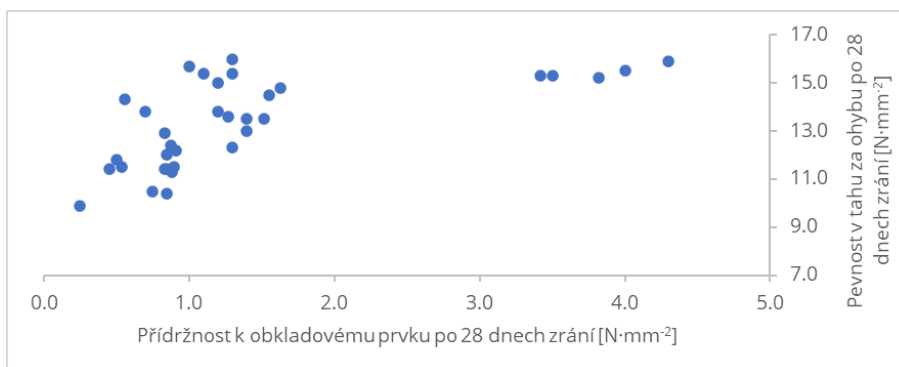
Grafy s vnesenými hodnotami jednotlivých fyzikálně-mechanických parametrů ve vztahu k přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům jsou

vedeny na následujících Obr. 102 až Obr. 107. Tyto grafy jsou v práci uvedeny pro porovnání možné závislosti jednotlivých sledovaných fyzikálně-mechanických parametrů na přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.



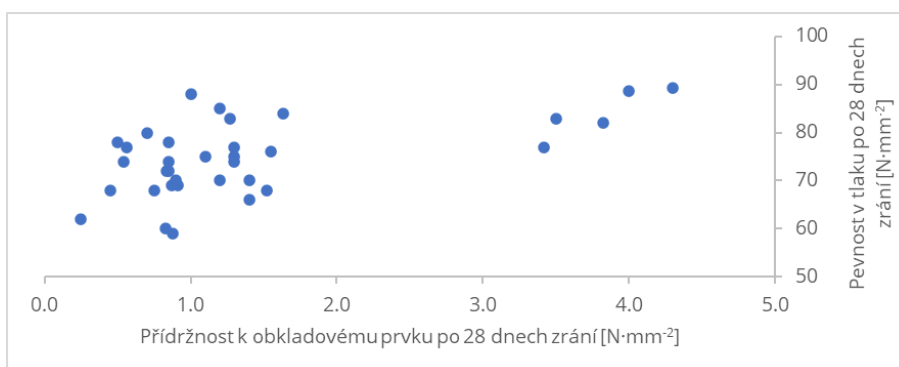
Obr. 102 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a nasákavosti po 28 dnech zrání

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že mezi hodnotami není patrná statistická závislost.



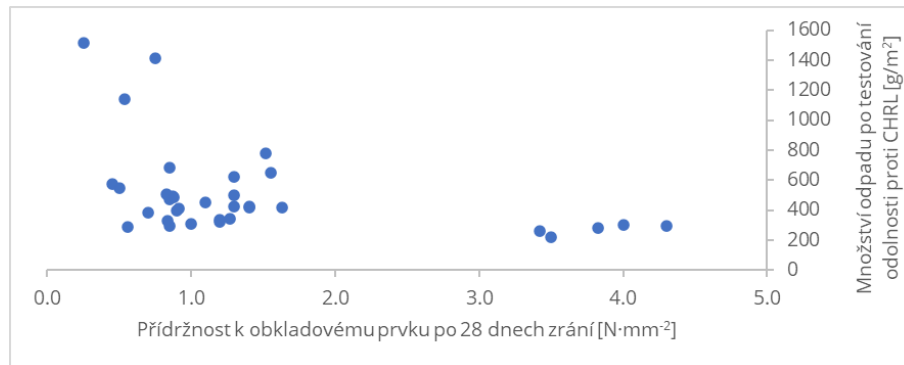
Obr. 103 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že mezi hodnotami není patrná statistická závislost.



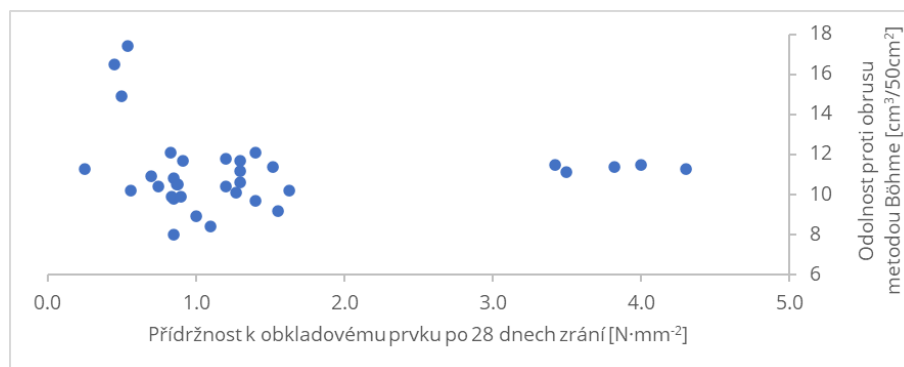
Obr. 104 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že mezi hodnotami není patrná statistická závislost.



Obr. 105 Graf s vynesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a odolnosti proti CHRL po 28 dnech zrání

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že mezi hodnotami není patrná statistická závislost.

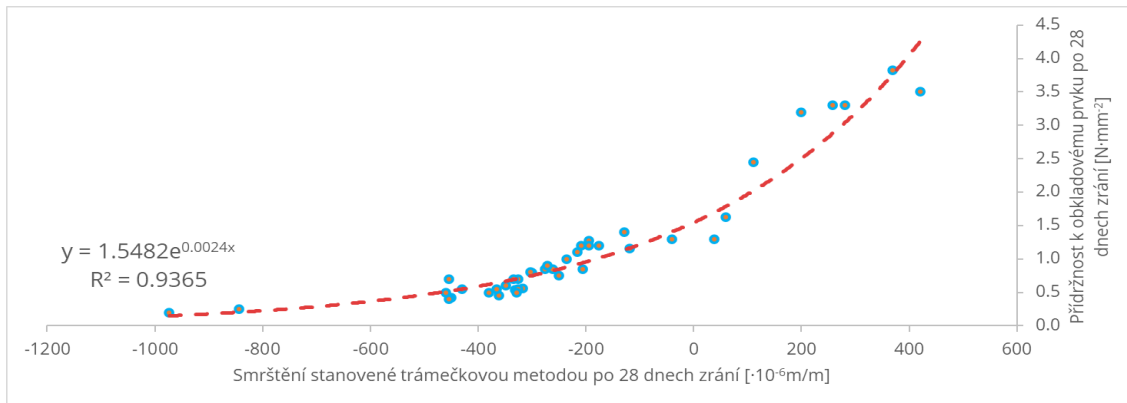


Obr. 106 Graf s vynesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a odolnosti proti obrušování metodou Böhme po 28 dnech zrání

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že mezi hodnotami není patrná statistická závislost.

Následně bylo provedeno vynesení hodnot:

- přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vlhku vzhledem k objemovým změnám vzorků uložených ve vlhku měřených trámečkovou metodou,
- přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vodním uložení vzhledem k objemovým změnám vzorků uložených ve vodním uložení měřených trámečkovou metodou,
- přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vzhledem k chemickým objemovým změnám vzorků měřených kontinuálním hydrostatickým vážením během prvních 72 hodin hydratace.



Obr. 107 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění trámečkovou metodou po 28 dnech zrání

Z tohoto grafu vyplývá, že je patrná vzájemná závislost těchto fyzikálních veličin u testovaných vzorků. Tato závislost lze popsat následující Rovnice 1:

$$y = 1.5482e^{0.0024x}$$

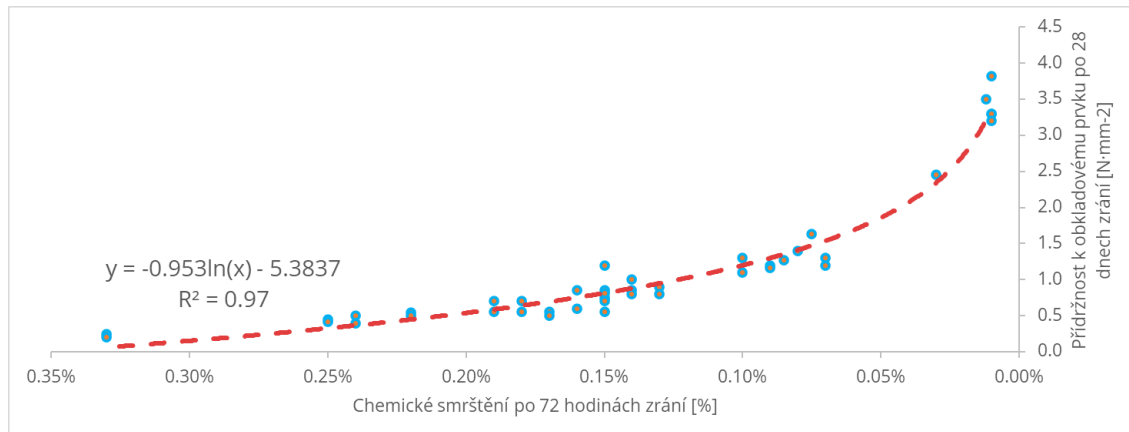
Rovnice 1 Závislost přídržnosti hladkých nenasákavých obkladových prvků na smrštění trámečkovou metodou (dále jen **Rovnice 1**)

Kde:

- y je hodnota přídržnosti k hladkému nenasákavému obkladovému prvku po 28 dnech zrání [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$],
- x je hodnota hydratačních objemových změn stanovená trámečkovou metodou [$\cdot 10^{-6} \text{ m/m}$].

Výše uvedená závislost platí pro sledované hodnoty a vyplývá z ní, že v případě, že je smrštění během hydratačního procesu cementové malty, měřeného trámečkovou metodou během 28 dní hydratace, vyšší než $-1000 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$, bude se hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům blížit nule.

Zároveň z tohoto vyplývá, že při snižujícím se smrštění hmoty a případné částečné expanzi během hydratačního procesu dochází k růstu přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům. Z výsledků vyplývá, že nejvyšších hodnot přídržností dosahují vzorky o expanzi okolo $370 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ po 28 dnech zrání. V případech, kdy je expanze vyšší, než $400 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$, může docházet k opětovnému snižování hodnot přídržností. Na tyto případy se již výpočtová rovnice nevztahuje.



Obr. 108 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění kontinuálním hydrostatickým vážením po prvních 72 hodin hydratace

Z grafu vyplývá, že je patrná vzájemná závislost těchto fyzikálních veličin u testovaných vzorků. Tato závislost lze popsat následující rovnicí:

$$y = -0.953\ln(x) - 5.3837$$

Rovnice 2 Závislost přídržnosti hladkých nenasákavých obkladových prvků na chemickém smrštění (dále jen **Rovnice 2**)

Kde:

- y je hodnota přídržnosti k hladkému nenasákavému obkladovému prvku po 28 dnech zrání [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$],
- x je hodnota hydratačních objemových změn stanovená metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu [%].

Je z něj také zřejmé, že čím je nižší hodnota chemického smrštění, tím lze předpokládat vyšší hodnotu přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům. Výše uvedená závislost však platí pouze pro hodnoty smrštění, které je větší než 0. Nejvyšších hodnot přídržností dosahovaly vzorky, jejichž chemické smrštění po 72 hodinách bylo velmi blízké nulovým hodnotám.

9.2 INFORMATIVNÍ OVĚŘENÍ KVALITY MODELŮ

Vztah závislosti přídržnosti vzorků k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a objemových změn měřených trámečkovou metodou, či metodou kontinuálního hydrostatického vážení, které jsou znázorněny v grafech na Obr. 107 a Obr. 108 je vyjádřen spojnicí trendu a příslušnou rovnicí regresní funkce dané křivky.

9.2.1 ČÁST 1. ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI OBKLADOVÝCH PRVKŮ NA OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH MĚŘENÝCH TRÁMEČKOVOU METODOU

V případě závislosti přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených trámečkovou metodou se závislost blíží exponenciální funkci, kterou lze vyjádřit **Rovnicí 1**.

V rámci ověření kvality tohoto modelu a skutečnosti, zda tato rovnice reálně/fakticky popisuje zmíněný děj závislosti, jsou v následujících tabulkách provedeny výpočty ověření kvality [96].

Tab. 91 Výpočet kvality modelu závislosti přídržnosti obkladových prvků a objemových změn měřených trámečkovou metodou dle stanovené rovnice

Regresní statistika							
Násobné R	0.967783						
Hodnota spolehlivosti R	0.936604						
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0.935019						
Chyba stř. hodnoty	0.230164						
Pozorování	42						

ANOVA					
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	1	31.30619	31.30619	590.9561	1.42E-25
Rezidua	40	2.11902	0.052975		
Celkem	41	33.42521			

	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95.0%	Horní 95.0%
Hranice	0.05839	0.056704	1.029723	0.309326	-0.05621	0.172993	-0.05621	0.172993
Soubor X 1	0.928342	0.038188	24.30959	1.42E-25	0.85116	1.005523	0.85116	1.005523

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům po 28 dnech zrání velmi významně závisí na objemových změnách vzorků měřených trámečkovou metodou po 28 dnech zrání. Tuto závislost lze charakterizovat číslem 0,928. Což znamená, že jsou tyto hodnoty vzájemně spjaty dle výše uvedené rovnice na 92,8 %.

Hodnoty neplatí pro vzorky, které obsahují přísadu pro regulaci objemových změn na bázi NPG, či polymerní redispergovatelné prášky. U těchto vzorků dochází ke kombinaci cementových a polymerních vazeb a výše zmíněné závislosti neodpovídají.

9.2.2 ČÁST 2. ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI OBKLADOVÝCH PRVKŮ NA OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH MĚŘENÝCH METODOU KONTINUÁLNÍHO HYDROSTATICKÉHO VÁŽENÍ BĚHEM PRVNÍCH 72 HODIN HYDRATAČNÍHO PROCESU

V případě závislosti přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu se závislost blíží logaritmické funkci, kterou lze vyjádřit

Rovnicí 2.

V rámci ověření kvality tohoto modelu a skutečnosti, zda tato rovnice reálně/fakticky popisuje zmíněný děj závislosti, jsou v následujících tabulkách provedeny výpočty ověření kvality [96].

Tab. 92 Výpočet kvality modelu závislosti přídržnosti obkladových prvků a objemových změn měřených pomocí metody kontinuálního hydrostatického vážení dle stanovené rovnice

Regresní statistika	
Násobné R	0.984884
Hodnota spolehlivosti R	0.969997
Nastavená hodnota	0.969247
Chyba stř. hodnoty	0.162572
Pozorování	42

ANOVA					
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	1	34.1788	34.1788	1293.193	4.44E-32
Rezidua	40	1.057191	0.02643		
Celkem	41	35.23599			

	Koeficienty	Chyba	t Stat	Hodnota	Dolní	Horní	Dolní	Horní
Hranice	0.03474	0.040052	0.867368	0.390914	-0.04621	0.115688	-0.04621	0.115688
Soubor X 1	0.969999	0.026974	35.96099	4.44E-32	0.915483	1.024514	0.915483	1.024514

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že hodnota přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům po 28 dnech zrání velmi významně závisí na objemových změnách vzorků měřených metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu. Tuto závislost lze charakterizovat číslem 0,970. Tedy že jsou tyto hodnoty vzájemně spjaty dle výše uvedené rovnice na 97,0 %.

Hodnoty neplatí pro vzorky, které obsahují přísadu pro regulaci objemových změn na bázi NPG, či polymerní redispergovatelné prášky. U těchto vzorků dochází ke kombinaci cementových a polymerních vazeb a neodpovídají výše zmíněné závislosti.

9.3 SHRUTÍ A VYHODNOCENÍ – ZÁVISLOST PŘÍDRŽNOSTI KOMPOZITŮ K HLADKÝM NENASÁKAVÝM OBKLADOVÝM PRVKŮM NA JEJICH HYDRATAČNÍCH OBJEMOVÝCH ZMĚNÁCH

V rámci šesté etapy bylo provedeno ověření a testování závislosti fyzikálně-mechanických parametrů vzorků na jejich objemových změnách, které byly stanoveny pomocí chemického smrštění měřeného metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu a pomocí trámečkové metody při uložení ve vlhkém a vodním prostředí během prvních 28 dní hydratačního procesu.

Podle výsledků vyplývajících z šesté etapy, existuje velmi vysoká míra závislosti přídržnosti vzorků vyvíjených cementových kompozitů na objemových změnách, ke kterým dochází během hydratačního procesu.

Závislost přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených trámečkovou metodou se blíží exponenciální funkci, kterou lze vyjádřit jako

Rovnice 2.

Z výpočtu vyplývá, že je tato závislost velmi významná.

Závislost přídržnosti obkladových prvků na objemových změnách měřených metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu lze nejlépe vyjádřit logaritmickou funkcí jako **Rovnice 1.**

Z výpočtu vyplývá, že je tato závislost velmi významná.

V rámci šesté etapy byly výše zmíněné rovnice ověřeny statistickými funkcemi.

Výše uvedené výpočtové vztahy závislosti mezi přídržností k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a hydratačními objemovými změnami stanovenými trámečkovou metodou během prvních 28 dní hydratačního procesu, či hydratačními objemovými změnami stanovenými metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratačního procesu, platí pro vysokopevnostní cementové kompozity, které byly zkoumány v rámci této práce a mohou obsahovat:

- portlandský cement,
- stavební křemenný písek (frakce 0-2 mm),
- křemennou moučku,
- vysokoteplotní popílek,
- jemně mleté obalové sklo,

- drčený odpad z výroby obkladových prvků z taveného čediče (frakce 0-2 mm),
- suchou plastifikační přísadu na bázi PCE)
- suchý odpěňovač (na bázi minerálních olejů a neiontových povrchově aktivních látek vázaných na inertním nosiči).

Výše uvedené výpočetní vztahy stanoveny rovnicemi neplatí pro vzorky, které obsahují přísadu pro regulaci objemových změn na bázi NPG, či polymerní redispergovatelné prášky (RDP – na bázi SA, VAE, VAVEE, VAEVCE, nebo HPMC). U těchto vzorků dochází ke kombinaci cementových a polymerních vazeb a neodpovídají výše zmíněným závislostem.

Z tohoto vyplývá, že výpočetní vztahy jsou pravděpodobně použitelné také pro další cementové kompozity které neobsahují přísady vytvářející polymerní vazby, jako jsou RDP, či tekuté polymerní přísady, které ovlivňují přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům.

10 SHRNU TÍ

V disertační práci bylo řešeno studium a vývoj polymer-cementových kompozitů s důrazem na vysoký obsah druhotných surovin a kompenzaci objemových změn. Tohoto bylo dosaženo prostřednictvím několika dílčích cílů a celkem šesti etap řešení.

Náplní první etapy bylo provedení charakterizace expozičního prostředí, do kterého jsou vyvíjené kompozity navrhovány, dále výběr vstupních surovin a návrh metod laboratorního testování, které byly využity v během následujících etap řešení disertační práce.

V rámci druhé až páté etapy probíhal samotný vývoj cementových a polymer-cementových kompozitů, ověření, optimalizace a výběr nejvhodnějších receptur.

V první části druhé etapy bylo nejprve provedeno sestavení referenční receptury – **A ref** a následně úprava jejího složení pomocí primárních příměsí (srážené neuhněné mikrosiliky a metakaolinu pro použití v betonu). Z této etapy byla vybrána na základě multikriteriálního párového srovnání základní **receptura B**, která obsahovala substituci pojivové složky metakaolinem v množství 8,5hm.% z dávky cementu a mikrosilikou v množství 8,5hm.% z dávky cementu. Vzhledem k referenční receptuře, **A ref**, dosáhly vzorky dle základní receptury **B**:

- srovnatelných hodnot objemové hmotnosti v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu,
- o 37 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání a o 38 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech zrání,
- o 20 % vyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání a o 29 % vyšší pevnosti v tlaku po 90 dnech zrání,
- o 36 % nižší nasákavosti po 28 dnech zrání,
- o 35 % nižšího odpadu při stanovení odolnosti proti působení CHRL po 100 zatěžovacích cyklech,
- o 18 % vyšší odolnosti proti obrusu metodou Böhme,
- o 11 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vodě,
- srovnatelných hodnot přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vlhku,
- o 7 % nižšího chemického smrštění po prvních 72 hodinách hydratace.

V druhé části druhé etapy bylo složení této zvolené základní receptury **B** upravováno pomocí druhotných surovin. Byla substituována pojivová, ale také plnivová složka. Na základě testování a pomocí multikriteriálního párového srovnání

byly následně vybrány dvě receptury, označené **B_basalt_85_glass_30** a **B_basalt_85_HFA_30**, které shodně obsahovaly 85% substituci celkové plnivové složky odpadem z výroby taveného čediče a 30% substituci celkové pojivové složky odpadním obalovým sklem (v případě **B_basalt_85_glass_30**), či vysokoteplotním elektrárenským popílkem (v případě **B_basalt_85_HFA_30**).

V rámci třetí etapy bylo složení základní receptury B modifikováno pomocí různých druhů polymerních redispergovatelných prášků. Tato modifikace byla provedena za účelem zvýšení užitečných vlastností cementového kompozitu. Především pro zvýšení přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům, snížení nasákavosti, či zvýšení odolnosti proti CHRL. Na základě testování a pomocí multikriteriálního párového srovnání byla následně zvolena receptura **B_SA_2.5** s obsahem 2,5 % z hmotnosti cementu polymerního redispergovatelného prášku na bázi styren-akrylátu. Vzhledem k referenční receptuře, **A ref**, dosáhly vzorky dle receptury **B_SA_2.5**:

- srovnatelných hodnot objemové hmotnosti v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu,
- o 12 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání a o 14 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech zrání,
- o 17 % nižší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání a o 3 % nižší pevnosti v tlaku po 90 dnech zrání,
- o 42 % nižší nasákavosti po 28 dnech zrání,
- o 12 % nižšího odpadu při stanovení odolnosti proti působení CHRL po 100 zatěžovacích cyklech,
- o 12 % nižší odolnosti proti ohrusu metodou Böhme,
- o 55 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vodě,
- o 75 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vlhku,
- o 253 % vyššího chemického smrštění po prvních 72 hodinách hydratace.

V rámci čtvrté etapy bylo složení základní receptury B dále modifikováno pomocí přísad pro regulaci hydratačních objemových změn. Na základě testování a pomocí následného multikriteriálního párového srovnání byla následně zvolena receptura **B_ACA_15** s obsahem 15% dávky přísady pro regulaci objemových změn na bázi ACA cementu. Vzhledem k referenční receptuře, **A ref**, dosáhly vzorky dle receptury **B_ACA_15**:

- podobných hodnot objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu,
- o 27 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání a o 33 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech zrání,
- o 15 % vyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání a o 14 % vyšší pevnosti v tlaku po 90 dnech zrání,
- o 37 % nižší nasákavosti po 28 dnech zrání,
- o 41 % nižšího odpadu při stanovení odolnosti proti působení CHRL po 100 zatěžovacích cyklech,
- o 5 % vyšší odolnosti proti obrusu metodou Böhme,
- o 420 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vodě,
- o 400 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vlhku,
- o 100 % nižšího chemického smrštění po prvních 72 hodinách hydratace.

V rámci páté etapy byl proveden návrh receptur kombinující složení vybraných receptur z předchozích etap. Na základě optimalizačního výpočtu, který byl proveden v rámci každé etapy řešení práce byly vybrány receptury:

- **B_basalt_85_glass_30**
- **B_basalt_85_HFA_30**
- **B_SA_2.5**
- **B_ACA_15**

Na základě testování a pomocí multikriteriálního párového srovnání byla následně vybrána receptura **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15**. Složení této receptury v porovnání s recepturou referenční **A ref** je uvedeno v následujících Tab. 93 a Tab. 94 receptura obsahovala celkově:

Tab. 93 Obsah pojivových složek v optimalizované receptuře z V. etapy

Receptura	OPC 42.5 R	Metaka- olin	Mikrosi- lika	Jemně mleté obalové sklo	ACA cement
A ref	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15	49,3 %	8,5 %	8,5 %	25 %	8,7 %

Tab. 94 Obsah plnivových složek v optimalizované receptuře z V. etapy

Receptura	Křemenný stavební písek (frakce 0-2 mm)	Křemenná moučka	Odpad z výroby taveného čediče
A ref	100 %	0 %	0 %
B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15	0 %	15 %	85 %

Z výše uvedených tabulek vyplývá, že výsledný kompozit **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** obsahuje z původního množství pojiva (OPC)

obsaženého v základní receptuře **A ref**, pouze 49,3 hm%. Zbylých 50,7 hm.% původního pojiva je nahrazeno v dávce 8,7 hm.% ACA cementem (přísadou pro regulaci objemových změn), v dávce 8,5 hm.% metakaolinem, v dávce 8,5 hm.% sráženou neuhněnou mikrosilikou a v dávce 25 hm.% je nahrazeno jemně mletým odpadním obalovým sklem.

Zároveň z tabulek vyplývá, že výsledný kompozit **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** obsahuje 85% substituci primárního plniva (křemenného stavebního písku), drceným odpadem z výroby obkladových prvků z taveného čediče. Zbylých 15 hm.% je zastoupeno primární křemennou moučkou.

Ve vztahu k referenční receptuře **A ref** dosáhly vzorky dle receptury **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15**:

- srovnatelných hodnot objemové hmotnosti v čerstvém, ale také ztvrdlém stavu,
- o 31 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání a o 39 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech zrání,
- o 19 % vyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání a o 24 % vyšší pevnosti v tlaku po 90 dnech zrání,
- o 38 % nižšího odpadu při stanovení odolnosti proti působení CHRL po 100 zatěžovacích cyklech,
- o 5% nižší odolnosti proti obrusu metodou Böhme,
- o 480 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vodě,
- o 480 % vyšší přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům při uložení ve vlhku,
- o 100 % nižší chemické smrštění během prvních 72 hodinách hydratace,
- expanzivních vlastnosti při stanovení objemových změn trámečkovou metodou,
- oproti referenční receptuře lze při dosažení výše uvedených parametrů snížit vstupní materiálové náklady o více než 25 %.

V rámci poslední, šesté, etapy bylo provedeno ověření závislosti testovaných fyzikálně-mechanických vlastností cementových a polymer-cementových kompozitů na hodnotách objemových hydratačních změn vzorků. V rámci této etapy bylo provedeno ověření na základě výsledků z předchozích etap disertační práce. Následně bylo provedeno vytvoření 2 rovnic popisující závislost přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům na hydratačních objemových změnách cementových kompozitů stanovených metodou kontinuálního hydrostatického vážení, případně stanovených trámečkovou metodou.

11 ZÁVĚR

Tématem a cílem disertační práce bylo studium a vývoj polymer-cementových kompozitů s důrazem na vysoký obsah druhotných surovin a kompenzaci objemových změn.

V rámci disertační práce byl jednoznačně vyvinut nový objemově kompenzovaný polymer-cementový kompozit označený jako **B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15** obsahující 85% substituci primárních plnivových složek (kameniva) druhotným drceným odpadním kamenivem z výroby obkladových prvků z taveného čediče. Zároveň vyvinutý kompozit obsahuje 50,7% substituci primární pojivové složky (portlandského cementu - OPC) příměsemi, druhotnými surovinami, či ACA cementem. Konkrétně je 50,7 hm.% primárního pojiva nahrazeno v dávce 8,7 hm.% ACA cementem (přísadou pro regulaci objemových změn), v dávce 8,5 hm.% metakaolinem, v dávce 8,5 hm.% sráženou neuhněnou mikrosilikou a v dávce 25 hm.% je nahrazeno jemně mletým odpadním obalovým sklem.

V rámci práce bylo tedy dokázáno, že vhodnou kombinací substituce primární pojivové složky (OPC) je možné za pomoci primárních příměsí (substituce 17 hm.% ref. dávky OPC) a druhotných surovin (substituce 25 hm.% ref. dávky OPC) zachovat, a dokonce zvýšit většinu sledovaných užitných fyzikálně-mechanických parametrů polymer-cementových kompozitů. Mezi ně patří například pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům, či odolnost proti působení CHRL.

V disertační práci bylo také zjištěno, že vhodnou kombinací výše uvedených vstupů lze snížit materiálové náklady jednotlivých výrobků, a to při zachování, či zvýšení užitných parametrů o více než 25 %.

Prováděným vývojem a testováním bylo dále unikátně nově dokázáno, že přídržnost cementových a polymer-cementových kompozitů k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům závisí na hydratačních objemových změnách těchto kompozitů. V závěru práce byly výsledné závislosti stanoveny, matematicky ověřeny a následně vyjádřeny pomocí logaritmických a exponenciálních křivek, jejichž vyjádření v rovnicích je popsáno v etapě VI. tohoto dokumentu. V průběhu disertační práce také bylo zjištěno, že tato závislost je platná pro cementové

kompozity, které mohou obsahovat druhotné suroviny použité v rámci této práce a přísady pro regulaci objemových změn použité v rámci této práce.

Zároveň bylo touto prací zjištěno, že uvedené/ověřené/použité výpočetní vztahy nejsou přímo použitelné pro receptury obsahující přísadu na bázi NPG (neopentyl-glycolu) či RDP (polymerních redispergovatelných prášků). Vzorky s obsahem NPG či RDP obsahují kombinaci polymerních a cementových vazeb a z jejich vztahu nevyplývá matematicky vyjádřitelná závislost žádného z testovaných parametrů.

Cíl disertační práce byl zcela splněn a v některých aspektech byl naplněn nad původní rámec. Nad původní očekávání byla například zjištěna závislost přídržnosti cementových a polymer-cementových kompozitů k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům na hodnotě hydratačních objemových změn těchto kompozitů.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv I*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0224-3.
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [3] HABERT, Guillaume, Catherine DE WOLF, K SCHRIVENER a A FAVIER. *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. Zürich, Switzerland: ETH Zurich, 2018.
- [4] SKJÆRSETH, Jon a Per EIKELAND. *Corporate Responses to EU Emissions Trading: Resistance, Innovation or Responsibility?*. London, 2013. Dostupné z: doi:10.4324/9781315574301
- [5] LEMOUGNA, Patrick, Kai-tuo WANG, Qing TANG, A.N. NZEUKOU, N. BILLONG, U. MELO a Xue-min CUI. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018, **137**, 177-190. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2018.05.031
- [6] JAIN, Mohit, Kai-tuo WANG, Qing TANG, A.N. NZEUKOU, N. BILLONG, U. MELO a Xue-min CUI. Use and Properties of Blast Furnace Slag as a Building Material- A Review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014, **2**(4), 54-60. ISSN 2197-8581. Dostupné z: doi:10.3991/ijes.v2i4.4211
- [7] GIERGICZNY, Zbigniew. Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. 2019, **124**. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.105826
- [8] WANG, Dehui, Caijun SHI, Nima FARZADNIA, Zhenguo SHI, Huangfei JIA a Zhihua OU. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*. 2018, **181**, 659-672. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075
- [9] JUENGER, M.C.G., F. WINNEFELD, J.L. PROVIS a J.H. IDEKER. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. 2011, **41**(12), 1232-1243. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.012
- [10] LI, Qiong, Hongxia QIAO, Aoyang LI a Guanjun LI. Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2022, **324**. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.126531
- [11] ŁAGOSZ, Artur, Daniel OLSZOWSKI, Waldemar PICHÓR a Łukasz KOTWICA. Quantitative determination of processed waste expanded perlite performance as a supplementary cementitious material in low emission blended cement composites. *Journal of Building Engineering*. 2021, **40**. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2021.102335

- [12] WINNEFELD, Frank a Barbara LOTHENBACH. Hydration of calcium sulfoaluminate cements — Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*. 2010, **40**(8), 1239-1247. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.014
- [13] MILLER, Sabbie, Arpad HORVATH a Paulo MONTEIRO. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*. 2016, **11**(7). ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/11/7/074029
- [14] CHEN, Irvin, Craig HARGIS a Maria JUENGER. Understanding expansion in calcium sulfoaluminate–belite cements. *Cement and Concrete Research*. 2012, **42**(1), 51-60. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.07.010
- [15] CHAUNSALI, Piyush, Paramita MONDAL a J. BULLARD. Influence of Calcium Sulfoaluminate (CSA) Cement Content on Expansion and Hydration Behavior of Various Ordinary Portland Cement-CSA Blends. *Journal of the American Ceramic Society*. 2015, **98**(8), 2617-2624. ISSN 0002-7820. Dostupné z: doi:10.1111/jace.13645
- [16] WU, Linping, Guangping HUANG a Wei LIU. Effects of calcium aluminate cement on the acid resistance of metakaolin-based geopolymer. *Advances in Cement Research*. 2021, **33**(10), 423-435. ISSN 0951-7197. Dostupné z: doi:10.1680/jadcr.20.00049
- [17] TAYLOR, H.F.W. 10 Calcium aluminate, expansive and other cements. *Cement chemistry*. Thomas Telford Publishing, 1997, 295-322. ISBN 0-7277-3945-X. Dostupné z: doi:10.1680/cc.25929.0010
- [18] ZHANG, Qi, Shilang XU a Qiang ZENG. Residual compressive strength of hardened OPC/CAC paste after fire exposure. *Magazine of Concrete Research*. 2019, **71**(10), 548-556. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/jmacr.17.00446
- [19] BAALBAKI, M. a P. AITCIN. Cement/Superplasticizer/Air-Entraining Agent Compatibility. *The 4th CANMETIACJ International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*,. 1994, (148), 47-62.
- [20] MOSQUET, Martin. Domieszki nowej generacji. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 2003, 21-23. ISSN 1644-745X.
- [21] WU, Hui, Huiling GUO, Jiaheng LEI, Rongguo ZHANG a Yong LIU. Research on synthesis and action mechanism of polycarboxylate superplasticizer. *Frontiers of Chemistry in China*. 2007, **2**(3), 322-325. ISSN 1673-3495. Dostupné z: doi:10.1007/s11458-007-0060-2
- [22] AGUADO, Antonio a Ravindra GETTU. *Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications: Proceedings of the International RILEM workshop*. 1. New York: Taylor & Francis Ltd, 1995. ISBN 9780419201502.
- [23] PAILLIERE, A. M., ed. *Application of Admixtures in Concrete*. 1. New York: Taylor&Francis, 1995. ISBN 0-203-62639-7.
- [24] RAMAMURTHY, K. a N. NARAYANAN. Factors influencing the density and compressive strength of aerated concrete. *Magazine of Concrete Research*.

- 2000, **52**(3), 163-168. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/mac.2000.52.3.163
- [25] TUNSTALL, Lori, M. LEY a George SCHERER. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research*. 2021, **150**. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2021.106557
- [26] NEVILLE, Adam M. *Properties of concrete*. 5th ed. New York: Pearson, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [27] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, Beata. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TYPE, AMOUNT AND WAY OF INTRODUCTION OF ANTI-FOAMING ADMIXTURE (AFA) ON THE PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIX. *Brittle Matrix Composites 9*. Elsevier, 2009, 265-274. ISBN 9781845697754. Dostupné z: doi:10.1533/9781845697754.265
- [28] ŁAZNIEWSKA-PIEKARCZYK, Beata a Janusz SZWABOWSKI. THE INFLUENCE OF THE TYPE OF ANTI-FOAMING ADMIXTURE AND SUPERPLASTICIZER ON THE PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTAR AND CONCRETE. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012, **18**(3), 408-415. ISSN 1392-3730. Dostupné z: doi:10.3846/13923730.2012.698908
- [29] CHANDRA, Satish a Yoshihiko OHAMA. *Polymers in concrete*. Boca Raton: CRC Press, 1994. ISBN 978-084-9348-150.
- [30] KARDON, Joshua B. Polymer-Modified Concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1997, **9**(2), 85-92. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:2(85)
- [31] OHAMA, Yoshihiko. Polymer-based admixtures. *Cement and Concrete Composites*. 1998, **20**(2-3), 189-212. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(97)00065-6
- [32] WALTERS, D.G. Compounding Materials for the Polymer Industries. In: DICK, John S. *Compounding Materials for the Polymer Industries: Concise Guide to Polymers, Rubbers, Adhesives and Coatings*. 1. New York: Noyes Publications, 1987, s. 44-53. ISBN 978-0815511359.
- [33] LAVELLE, J. A. Acrylic Latex-Modified Portland Cement. *ACI Materials Journal*. 1988, **85**(1). ISSN 0889-325X. Dostupné z: doi:10.14359/2495
- [34] PINDADO, M. A. Laboratory Study of Fatigue of Polymer-Modified Porous Concrete for its Use as Top Layer of Concrete Pavements. *SP-166: Properties and Uses of Polymers in Concrete*. American Concrete Institute, 1996, -. ISBN 9780870316654. Dostupné z: doi:10.14359/1352
- [35] SCHMIDT, D. A. Long-Term Durability Studies of Acrylic Polymer Modified Cement. *SP-214: Polymers in Concrete: The First Thirty Years*. American Concrete Institute, 2003, -. ISBN 9780870311154. Dostupné z: doi:10.14359/12767
- [36] SILFWERBRAND, Johan. Polymer-Modified Concrete Overlays on Industrial Asphalt Floors. *ACI Symposium Publication*. 1996, (166), 165-176. Dostupné z: doi:10.14359/1402
- [37] IRVIN, Brian D. Application of Styrene-Butadiene Latex Modified Portland Cement Concrete Overlays in Parking Structure repair and Rehabilitation. *SP-*

- 116: *Polymers in Concrete: Advances and Applications*. American Concrete Institute, 1989, -. ISBN 9780870316142. Dostupné z: doi:10.14359/2249
- [38] MARUSIN, S. *Microstructure, Pore Characteristics, and Chloride-Ion Penetration in Conventional concrete and concrete containing polymer emulsions*. American Concrete Institute, 1987, (99), 135-150. Dostupné z: doi:10.14359/2416
- [39] RAMACHANDRAN, V.S. Accelerators. In: *Concrete Admixtures Handbook*. Elsevier, 1996, s. 185-285. ISBN 9780815513735. Dostupné z: doi:10.1016/B978-081551373-5.50009-X
- [40] BENDAOU, Seif-Eddine, Mokhtar BOUNAZEF a Ali DJEFFAL. The effect of sintering temperature on the porosity and compressive strength of corundum. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2018, **27**(3-4). ISSN 2191-0243. Dostupné z: doi:10.1515/jmbm-2018-0018
- [41] LESOVIK, V, R FEDIUK, E GLAGOLEV, I LASHINA, A MOCHALOV a R TIMOKHIN. Features of building composites designing for their exploitation in extreme conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, **456**. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/456/1/012054
- [42] MARUTHI, Baddi. *Compressive strength of stone – for various stones* [online]. In: . [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://civillerners.com/2019/11/30/compressive-strength-of-stone-for-various-stones/>
- [43] ČSN EN 12620+A1 - *Kamenivo do betonu*. Praha, 2008.
- [44] ADDIS, Jeffrey a Gill OWENS. *Fulton's Concrete Technology*. 8. Cement & Concrete Institute, 2001. ISBN 06-200-9988-7.
- [45] CHANDRA, Satish a Leif BERNTSSON. *LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE*. 1. New York: Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2002. ISBN 0-8155-1486-7.
- [46] WYPYCH, George. *Handbook of Fillers*. 4th ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2016. ISBN 978-1895198911.
- [47] OHAMA, Yoshihiko. *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology*. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, 1995. ISBN 08-155-1358-5.
- [48] WAGNER, Herman B. a Dallas G. GRENLEY. *Interphase effects in polymer-modified hydraulic cements*. 1978, **22**(3). Dostupné z: doi:10.1002/app.1978.070220318
- [49] SCHWIETE, H.E., U. LUDWIG a G.S. AACHEN. The Influence of Plastics Dispersions on the properties of cement mortars. *Betonstein Zeitung*. 1969, **35**(1).
- [50] OHAMA, Y. Study on properties and mix proportioning of polymer-modified mortars for buildings. *Report of the Building research institute* 65. **1973**, 100-104.
- [51] ČSN EN 1504-1: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 1: Definice*. Český normalizační institut, 2006.

- [52] ČSN EN 1504-3: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce*. 8/06. 2006.
- [53] ACI 548.1R-09: *Guide For The Use Of Polymer In Concrete, Chapter 4 - Polymer Concrete*. ACI Committee, 2009.
- [54] ČSN 73 1201: *Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb*. 2010.
- [55] TAZAWA, E. a S. MIYAZAWA. Influence of cement composition on autogenous shrinkage. *CAJ Proceedings of Cement and Concrete*. Semento Kyokai, 1993, **47**. ISSN 0916-3182.
- [56] TAZAWA, Eiichi. *Autogenous shrinkage of concrete: proceedings of the international workshop, organized by JCI (Japan Concrete Institute), Hiroshima, June 13-14, 1998*. New York: Routledge, 1999. ISBN 978-0419238904.
- [57] WITTMANN, F. Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste. *Matériaux et Constructions*. 1968, **1**(6), 547-552. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02473643
- [58] ACI 223R-10: *Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete*. ACI Committee, 2010.
- [59] RIXOM, Roger a Noel MAILVAGANAM. *Chemical Admixtures for Concrete*. 3th ed. London: E & FN Spon, 1999. ISBN 0-203-13711-6.
- [60] DU, Hongjian a Kiang Hwee TAN. Waste Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014, **12**(11), 468-477. ISSN 1346-8014. Dostupné z: doi:10.3151/jact.12.468
- [61] BÍLEK, Vlastimil. *Možnosti využití odpadních písků z výroby vodního skla ve stavebnictví* [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/21374>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Tomáš Opravil.
- [62] BARKSDALE, Richard D. *The Aggregate handbook*. Washington, D.C. (1415 Elliot Pl., N.W., Washington 20007): National Stone Association, 1991.
- [63] ČSN EN 933-1 (721193): *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Praha, 2012.
- [64] ISO 13320:2009. *Particle size analysis - Laser diffraction methods*. 2009.
- [65] Laser Diffraction (LD). In: *Malvern Panalytical* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>
- [66] ČSN EN 196-6. *Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí*. 2010.
- [67] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha, 2000.
- [68] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 2009.
- [69] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2009.

- [70] ČSN EN 1542: *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-off*. Prague: Český normalizační institut, 1999. ČSN EN 1542.
- [71] ČSN EN 12004-2: *Lepidla pro keramické obkladové prvky - Část 2: Zkušební metody*. Praha, 2018.
- [72] ČSN EN 1015-12: *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 12: Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu*. Praha, 2017.
- [73] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2009.
- [74] ČSN EN 12390-4: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. 2001.
- [75] ČSN EN 13892-3: *Methods of test for screed materials - Part 3: Determination of wear resistance - Böhme*. 2014. Prague: Český normalizační institut, 2015.
- [76] ASTM C490/C490M-17: *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. 2017.
- [77] HERMANN, R, R DROCHYTKA, V CERNY a P FIGALA. Utilization of continuous hydrostatic weighing for monitoring of volume changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, **1039**. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1039/1/012019
- [78] Shrinkage-Cone. In: *Schleibinger* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Shrinkage-Cone>
- [79] WASEDA, Yoshio, Eiichiro MATSUBARA a Kozo SHINODA. *X-ray diffraction crystallography: introduction, examples and solved problems*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-16634-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-16635-8
- [80] *Statistika kvality cementu - chemické a mechanické vlastnosti* [online]. 2022 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [81] *Provodínské písky a.s.* [online]. [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.pisky.cz/>
- [82] *Sklopísek Střeleč, a.s.* [online]. [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://glassand.eu/celkova-produkce/podle-druhu/mikromlete-pisky>
- [83] *LB CEMIX, s.r.o. - Mikromletý vápenec VBS 40* [online]. [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.cemix.cz/kotouc/cz/produkty-kotouc/mlety-vapenec-vbs-40>
- [84] SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 1977, **15**(3), 234-281. ISSN 00222496. Dostupné z: doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5
- [85] SAATY, R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*. 1987, **9**(3-5), 161-176. ISSN 02700255. Dostupné z: doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8
- [86] LENART, Małgorzata. Assessment of Mortar Shrinkage in Aspect of Organic and Inorganic Modifiers Use. *Procedia Engineering*. 2015, **108**, 309-315. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.06.152

- [87] HARADA, Katsuki, Hiromichi MATSUSHITA a 博通 松下. *Effect of Gypsum Content in Cement on the Autogenous Shrinkage of Low-Heat Portland Blast-Furnace Slag Cement Concrete*. 2003, **63**.
- [88] NEHRING, J., J. NEUBAUER, S. BERGER a F. GOETZ-NEUNHOEFFER. Acceleration of OPC by CAC in binary and ternary systems: The role of pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*. 2018, **107**, 264-274. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.02.012
- [89] GARTNER, Ellis. *Cement shrinkage reducing agent and method for obtaining cement based articles having reduced shrinkage*. European Patent Office. EP1911731B1. Uděleno 18.4.2012.
- [90] ŠPALEK, Jiří. *Aplikovaná statistika: distanční studijní opora*. Brno: Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta, 2004. ISBN 80-210-3412-2.
- [91] SHUI, Liangliang, Zhenping SUN, Haijing YANG, Xu YANG, Yanliang JI a Qiong LUO. Experimental evidence for a possible dispersion mechanism of polycarboxylate-type superplasticisers. *Advances in Cement Research* [online]. 2016, **28**(5), 287-297 [cit. 2017-03-28]. ISSN 0951-7197. Dostupné z: doi:10.1680/jadcr.15.00070
- [92] MIYAKE, N., T. ANDO a E. SAKAI. Superplasticized concrete using refined lignosulfonate and its action mechanism. *Cement and Concrete Research*. 1985, **15**(2), 295-302. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(85)90041-9
- [93] YILMAZ, V. a F. GLASSER. Influence of sulphonated melamine formaldehyde superplasticizer on cement hydration and microstructure. *Advances in Cement Research* [online]. 1989, **2**(7), 111-119 [cit. 2017-04-06]. ISSN 0951-7197. Dostupné z: doi:10.1680/adcr.1989.2.7.111

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Proces hydratačního procesu za přítomnosti polymerních částic [47; 48; 49; 50]	32
Obr. 2 Hydratační délkové změny v suchém prostředí bez přídavku a s přídavkem SRA	45
Obr. 3 Seznam etap metodiky disertační práce	50
Obr. 4 Charakterizace prostředí a metody laboratorního testování surovin a zkušebních hmot	53
Obr. 5 Etapa I – Charakterizace expozičního prostředí, návrh metod laboratorního testování, výběr vstupních surovin, stanovení vlastností surovin a jejich předúprava	54
Obr. 6 ETAPA II. - Sestavení a testování základních surovinových variant, substituce primárních složek druhotnými surovinami	56
Obr. 7 ETAPA III. Návrh a testování vybraných surovinových variant - vliv polymerních redispersovatelných prášků	58
Obr. 8 ETAPA IV. Návrh a testování vybraných surovinových variant - vliv přísad pro kompenzaci objemových změn	60
Obr. 9 ETAPA V. Optimalizace receptur, pokročilé testování vybraných surovinových variant, zhodnocení výsledků, selekce optimalizovaného řešení	62
Obr. 10 Sada sít pro stanovení granulometrie plniv	65
Obr. 11 Přístroj ZEB/PC-Blaine Star pro stanovení měrného povrchu	66
Obr. 12 Přístroj AccuPyc II 1340 Pycnometer	67
Obr. 13 Stanovení konzistence čerstvé malty metodou sednutí rozlitím	67
Obr. 14 Proces míchání čerstvé směsi	68
Obr. 15 Vzorky malt připravené ve formách 3x 160x40x40 mm	68
Obr. 16 Stanovení přidržitosti malty k hladkým nenasákovým obkladovým prvkům v etapě IV. této práce	69
Obr. 17 Stůl pro stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme	70
Obr. 18 Vzorek při stanovení objemových změn trámečkovou metodou	70
Obr. 19 Vzorek pro stanovení objemových změn trámečkovou metodou	71
Obr. 20 Znárodnění hydrostatického vážení	71
Obr. 21 Měřicí zařízení pro stanovení kontinuálního hydrostatického vážení	72
Obr. 22 Distribuční křivky primárních plniv a příměsí	76
Obr. 23 Distribuční křivka vybraných substitučních a primárních pojivových složek	80
Obr. 24 Distribuční křivka vybraných substitučních plnivových složek	81
Obr. 25 Křivka zrnitosti kameniva v základních recepturách	88
Obr. 26 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků dle základních receptur	89
Obr. 27 Pevnost v tahu za ohybu vzorků dle základních receptur	89
Obr. 28 Pevnost v tlaku vzorků dle základních receptur	90
Obr. 29 Nasákovost vzorků dle základních receptur	90
Obr. 30 Odolnost proti obrušování metodou Böhme vzorků dle základních receptur	91
Obr. 31 Odolnost proti působení CHRL vzorků dle základních receptur	91

Obr. 32 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků dle základních receptur	92
Obr. 33 Stanovení objemových změn trámečkovou metodou ve vodním prostředí během prvních 28 dní hydratace vzorků dle základních receptur	92
Obr. 34 Stanovení objemových změn trámečkovou metodou ve vlhkém uložení během prvních 28 dní hydratace vzorků dle základních receptur	93
Obr. 35 Přídržnost kompozitů dle základních receptur k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům	93
Obr. 36 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury A ref při zvětšení 200x	94
Obr. 37 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury A ref při zvětšení 1500x	94
Obr. 38 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B při zvětšení 20x	95
Obr. 39 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B při zvětšení 1000x	95
Obr. 40 Křivky zrnitosti druhotných a odpadních plniv	101
Obr. 41 Křivky zrnitosti druhotných a odpadních plniv	101
Obr. 42 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami	102
Obr. 43 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami	103
Obr. 44 Pevnost v tlaku vzorků s druhotnými či odpadními surovinami	103
Obr. 45 Nasákavost vzorků s druhotnými či odpadními surovinami.....	104
Obr. 46 Odolnost proti obrusu vzorků s druhotnými či odpadními surovinami ...	104
Obr. 47 Odolnost proti působení CHRL vzorků s druhotnými či odpadními surovinami	105
Obr. 48 Objemové změny během prvních 72 hodin hydratace vzorků s druhotnými či odpadními surovinami.....	105
Obr. 49 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Glass_30 při zvětšení 20x ..	106
Obr. 50 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85 při zvětšení 20x .	107
Obr. 51 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_glass_30 při zvětšení 1500x	107
Obr. 52 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Glass_30 při zvětšení 2000x	108
Obr. 53 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků z II. etapy	108
Obr. 54 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s obsahem RDP	119
Obr. 55 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s obsahem RDP	120
Obr. 56 Pevnost v tlaku vzorků s obsahem RDP.....	120
Obr. 57 Nasákavost vzorků s obsahem RDP	121
Obr. 58 Odolnost proti obrusu vzorků s obsahem RDP	121
Obr. 59 Odolnost proti působení CHRL vzorků s obsahem RDP	122
Obr. 60 Odolnost proti působení CHRL vzorků s obsahem HPMC	122
Obr. 61 Stanovení odolnosti proti CHRL u vzorků s obsahem HPMC.....	122
Obr. 62 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s obsahem RDP	123
Obr. 63 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s obsahem RDP	124

Obr. 64 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s obsahem RDP uložených ve vodě.....	124
Obr. 65 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s obsahem RDP uložených ve vlhku	125
Obr. 66 Přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vzorků s obsahem RDP	125
Obr. 67 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_SA_2.5 při zvětšení 20x	126
Obr. 68 Detail mikrostruktury vzorku dle receptury B_SA_2.5 při zvětšení 200x ..	126
Obr. 69 Detail póru ve vzorku dle receptury B_SA_2.5 při zvětšení 200x.....	127
Obr. 70 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_VAE_2.5 při zvětšení 20x....	127
Obr. 71 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků z III. etapy	128
Obr. 72 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	135
Obr. 73 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	136
Obr. 74 Pevnost v tlaku vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	136
Obr. 75 Nasákavost vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	137
Obr. 76 Odolnost proti obrusu vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	137
Obr. 77 Odolnost proti působení CHRL vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	138
Obr. 78 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.	138
Obr. 79 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn.	139
Obr. 80 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vodě	140
Obr. 81 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vodě	140
Obr. 82 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vlhku	140
Obr. 83 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn uložených ve vlhku	141
Obr. 84 Přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	142
Obr. 85 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_ACA_20 při zvětšení 1000x	143
Obr. 86 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_Gyps_5 při zvětšení 250x...	143
Obr. 87 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_CSA_7 při zvětšení 2500x...	144
Obr. 88 XRD analýza vzorků - porovnání mineralogického složení vzorků ze IV. etapy	144
Obr. 89 Objemová hmotnost v čerstvém a ztvrdlém stavu vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	156
Obr. 90 Pevnost v tahu za ohybu vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	157

Obr. 91 Pevnost v tlaku vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	157
Obr. 92 Nasákavost vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	158
Obr. 93 Odolnost proti obrusu vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	158
Obr. 94 Odolnost proti působení CHRL vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	159
Obr. 95 Chemické smrštění metodou kontinuálního hydrostatického vážení během prvních 72 hodin hydratace vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	159
Obr. 96 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	160
Obr. 97 Objemové změny trámečkovou metodou vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	160
Obr. 98 Přídržnost k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	161
Obr. 99 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15 při zvětšení 2500x.....	161
Obr. 100 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_glass_30_SA_2.5_ACA_15 při zvětšení 200x.....	162
Obr. 101 Detail mikrostruktury vzorku dle receptur B_basalt_85_HFA_30_SA_2.5_ACA_15 při zvětšení 20x.....	162
Obr. 102 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a nasákavosti po 28 dnech zrání	170
Obr. 103 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání	170
Obr. 104 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání.....	170
Obr. 105 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a odolnosti proti CHRL po 28 dnech zrání.....	171
Obr. 106 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a odolnosti proti obrusu metodou Böhme po 28 dnech zrání	171
Obr. 107 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění trámečkovou metodou po 28 dnech zrání.....	172
Obr. 108 Graf s vnesenými hodnotami přídržnosti k hladkým nenasákavým obkladovým prvkům a smrštění kontinuálním hydrostatickým vážením po prvních 72 hodin hydratace	173

14 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Pevnost v tlaku vybraných kameniv [40; 41; 42]	28
Tab. 2 Požadavky na funkční vlastnosti výrobků pro opravy se statickou funkcí a bez statické funkce [52]	39
Tab. 3 Směrná receptura pro tenkovrstvou PCC stěrku [53]	40
Tab. 4 Směrná receptura pro polymer-cementovou maltu [53]	40
Tab. 5 Směrná receptura pro polymer-cementový nátěr [53]	41
Tab. 6 Mechanické a fyzikální vlastnosti PC CEM I 42,5 R Mokrý 12/2022 [80]	73
Tab. 7 Chemické složení PC CEM I 42,5 R Mokrý 12/2022 [80]	73
Tab. 8 Fyzikální a chemické vlastnosti Provodínských písků [81]	74
Tab. 9 Fyzikální vlastnosti použitých provodínských písků	74
Tab. 10 Fyzikální vlastnosti Křemenné moučky ST 2 [82]	74
Tab. 11 Chemické složení Křemenné moučky ST 2 [82]	74
Tab. 12 Sítový rozbor Křemenné moučky ST 2 [82]	74
Tab. 13 Chemické složení Mikromletého vápence VBS 40 [83]	75
Tab. 14 Fyzikální vlastnosti Mikromletého vápence VBS 40	75
Tab. 15 Chemické složení použitého metakaolinu	75
Tab. 16 Fyzikální vlastnosti použitého metakaolinu	75
Tab. 17 Chemické složení použité mikrosiliky	76
Tab. 18 Fyzikální vlastnosti použité mikrosiliky	76
Tab. 19 Chemické složení slévárenského písku s vodním sklem	77
Tab. 20 Fyzikální charakteristiky slévárenského písku s vodním sklem	77
Tab. 21 Chemické složení odpadní škváry	78
Tab. 22 Fyzikální charakteristiky odpadní škváry	78
Tab. 23 Chemické složení odpadních čedičových odkapů	78
Tab. 24 Fyzikální charakteristiky odpadních čedičových odkapů	78
Tab. 25 Chemické složení vysokoteplotního popílku	79
Tab. 26 Fyzikální charakteristiky vysokoteplotního popílku	79
Tab. 27 Chemické složení odpadního expandovaného perlitu	79
Tab. 28 Fyzikální charakteristiky odpadního expandovaného perlitu	79
Tab. 29 Chemické složení odpadního obalového skla	80
Tab. 30 Fyzikální charakteristiky odpadního obalového skla	80
Tab. 31 Vlastnosti použitého polymeru BASF SA	82
Tab. 32 Vlastnosti použitého polymeru WACKER VAE	82
Tab. 33 Vlastnosti použitého polymeru DCC VAE	82
Tab. 34 Vlastnosti použitého polymeru WACKER VAE/VC/E	83
Tab. 35 Vlastnosti použitého polymeru Redipol VAE, VE, E	83
Tab. 36 Vlastnosti použitého suroviny SE Tylose HPMC	83
Tab. 37 Vlastnosti použitého Neopentyl glycolu	84
Tab. 38 Vlastnosti použitého polyetheru	84
Tab. 39 Fyzikální charakteristiky sádry	85
Tab. 40 Chemické složení CAC cementu	85
Tab. 41 Fyzikální charakteristiky CAC cementu	85
Tab. 42 Chemické složení CSA cementu	86
Tab. 43 Fyzikální charakteristiky CSA cementu	86

Tab. 44 Chemické složení ACA cementu.....	86
Tab. 45 Fyzikální charakteristiky ACA cementu	86
Tab. 46 Základní receptury PMCC	87
Tab. 47 Přehled parametrů vzorků dle základních receptur z první části I. etapy ..	96
Tab. 48 Přehled pevnostních charakteristik vzorků dle základních receptur	96
Tab. 49 Volba kritérií - vlastností základních receptur	97
Tab. 50 Rozhodovací matrice A_{ij} pro základní receptury	97
Tab. 51 Transformovaná matrice B_{ij} pro základní receptury	98
Tab. 52 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku ..	98
Tab. 53 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro základní receptury	98
Tab. 54 Výpočtová matice C_{ij} pro základní receptury.....	99
Tab. 55 Receptury PMCC s druhotnými a odpadními surovinami	100
Tab. 56 Přehled fyzikálně-mechanických parametrů vzorků s druhotnými či odpadními surovinami z druhé části II. etapy.....	110
Tab. 57 Přehled pevnostních charakteristik vzorků dle základních receptur	111
Tab. 58 Volba kritérií - vlastností vzorků s druhotnými či odpadními surovinami	112
Tab. 59 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami	112
Tab. 60 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami	113
Tab. 61 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku	114
Tab. 62 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami	114
Tab. 63 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s druhotnými či odpadními surovinami	115
Tab. 64 Receptury PMCC s polymerními přísadami	119
Tab. 65 Přehled parametrů vzorků obsahem RDP.....	129
Tab. 66 Přehled pevnostních charakteristik vzorků obsahem RDP.....	129
Tab. 67 Volba kritérií - vlastností vzorků s obsahem RDP	130
Tab. 68 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s obsahem RDP.....	130
Tab. 69 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s obsahem RDP	131
Tab. 70 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku	131
Tab. 71 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s obsahem RDP	132
Tab. 72 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s obsahem RDP	132
Tab. 73 Receptury PMCC s přísadami pro regulaci objemových změn	135
Tab. 74 Přehled parametrů vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn..	146
Tab. 75 Přehled pevnostních charakteristik vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	146
Tab. 76 Volba kritérií - vlastností vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	147
Tab. 77 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	148
Tab. 78 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	149
Tab. 79 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku	149

Tab. 80 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	150
Tab. 81 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	150
Tab. 82 Receptury PMCC s kombinací výstupů z předchozích etap	155
Tab. 83 Přehled parametrů vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn	163
Tab. 84 Přehled pevnostních charakteristik vzorků s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	163
Tab. 85 Volba kritérií - vlastností vzorků s přísadami pro regulaci objemových změn	164
Tab. 86 Rozhodovací matrice A_{ij} pro vzorky s kombinací druhotných surovin, polymerních přísad a přísad pro regulaci objemových změn.....	165
Tab. 87 Transformovaná matrice B_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	165
Tab. 88 Popis vah při hodnocení multikriteriální analýzy pro následující tabulku	165
Tab. 89 Saatyho matice pro stanovení váhy jednotlivých kritérií pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	166
Tab. 90 Výpočtová matice C_{ij} pro vzorky s přísadami pro regulaci objemových změn	166
Tab. 91 Výpočet kvality modelu závislosti přídržnosti obkladových prvků a objemových změn měřených trámečkovou metodou dle stanovené rovnice	174
Tab. 92 Výpočet kvality modelu závislosti přídržnosti obkladových prvků a objemových změn měřených pomocí metody kontinuálního hydrostatického vážení dle stanovené rovnice.....	175
Tab. 93 Obsah pojivových složek v optimalizované receptuře z V. etapy.....	180
Tab. 94 Obsah plnivových složek v optimalizované receptuře z V. etapy.....	180