



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

**VÝVOJ LEPICÍ HMOTY PRO INSTALACI
ČEDIČOVÝCH PRVKŮ NA SILIKÁTOVÝ PODKLAD
V NÁROČNÝCH EXPOZIČNÍCH PODMÍNKÁCH**

DEVELOPMENT OF ADHESIVE MATERIAL FOR THE INSTALLATION OF BASALT
ELEMENTS ON SILICATE FOUNDATIONS UNDER SEVERE EXPOSURE CONDITIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamila Bergerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA**

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Kamila Bergerová
Název	Vývoj lepicí hmoty pro instalaci čedičových prvků na silikátový podklad v náročných expozičních podmínkách
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

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

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 12004+A1 - Lepidla pro obkladové prvky - Požadavky, posuzování shody, klasifikace a označování

ČSN EN 12004-2 - Lepidla pro obkladové prvky - Část 2: Zkušební metody

ČSN EN 1015-11- Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku

FERRIER E., RABINOVITCH O., MICHEL E. Mechanical behavior of concrete-resin/adhesive-FRP structural assemblies under low and high temperatures, Construction and Building Materials, Volume 127, 30 November 2016, Pages 1017-1028, ISSN 0950-0618

MOHAMMADI M., MOGHTADEI R. M., SAMANI N. A. Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete, Construction and Building Materials, , Pages 141-150, ISSN 0950-0618

SHIMIZU K, MALMOS K., SPIEGELHAUER S, HINKE J., HOLM, A., PEDERSEN, S., DAASBJERG K., HINGE M. Durability of PEEK adhesive to stainless steel modified with aryldiazonium salts, International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 51, June 2014, Pages 1-12, ISSN 0143-7496

NAITO K., ONTA M., KOGO Y. The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyamide adhesive, International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 36, July 2012, Pages 77-85, ISSN 0143-7496

Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem řešení diplomové práce bude problematika lepení čedičových prvků na silikátové podkladní povrchy v náročných podmínkách expozice. U nově vyvíjených hmot bude tedy požadována odolnost vůči působení chemicky agresivních látek a relativně vysokých teplot. Cílem práce bude návrh receptury průmyslového lepidla na silikátové nebo polymerní bázi s podílem druhotných surovin jako plniva a ověření vlastností tohoto nově vyvinutého materiálu.

1. Proveďte zhodnocení v současnosti používaných druhů lepicích hmot, a to zejména používaných pro ukládání prvků z taveného čediče.
2. Definujte požadavky na vlastnosti nově vyvíjených lepicích hmot s ohledem na různé typy náročných podmínek jejich budoucí expozice.
3. Navrhněte soubor potenciálně vhodných vstupních surovin s ohledem na jejich vlastnosti s důrazem na použití druhotných a alternativních surovin.
4. Zhodnoťte možnosti využití druhotných a alternativních surovin pro nová průmyslová lepidla a vyberte vhodné typy
5. Navrhněte materiálové složení nového průmyslového lepidla na silikátové nebo polymerní bázi pro ukládání nenasákavých prvků v agresivních prostředích na silikátový podklad ve dvou kvalitativních úrovních: ECONOMY a PREMIUM.
6. Sestavte metodiku zkoušení požadovaných vlastností nově vyvinutých lepicích hmot, zejména různých typů přídržností (počáteční, po tepelném stárnutí, po tepelném šoku, po ponoření ve vodě, počáteční smyková atd.), doby zavadnutí a skluzu.
7. Prostřednictvím nejmodernějších experimentálních technik prakticky ověřte jednotlivé vlastnosti nových lepicích hmot pro ukládání čedičových prvků do agresivních prostředí, včetně ověření v daných agresivních prostředích.
8. Souhrnně vyhodnoťte všechny dosažené výsledky a stanovte nejvhodnější recepturu lepicí hmoty pro instalaci čedičových prvků na silikátový podklad v náročných expozičních podmínkách.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vývojem nové lepicí hmoty určené pro instalaci nenasákavých čedičových prvků na silikátový povrch v náročných expozičních podmínkách. Při výrobě komerčních lepidel se jako plnivo používají pouze primární suroviny. Cílem této práce je zhodnotit možnosti využití surovin druhotných jako plniva v těchto hmotách. Práce je zaměřena především na životnost těchto materiálů po vystavení agresivnímu prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

lepicí hmota, lepidla, druhotné suroviny, nenasákavé prvky, čedič, adheze, životnost

ABSTRACT

The diploma thesis deals with research and subsequent development of a new adhesive material for the installation of nonabsorbent basalt elements on silicate foundations under severe exposure conditions. For commercially produced tile adhesives, only primary raw materials are used as fillers. The purpose of this work is to evaluate the possibility of utilization of secondary raw materials as fillers in the tile adhesive. The thesis is mainly focused on the durability of these materials after exposure to the aggressive environment.

KEYWORDS

adhesive materials, adhesives, secondary raw materials, nonabsorbent components, basalt, adhesion, durability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Kamila Bergerová *Vývoj lepicí hmoty pro instalaci čedičových prvků na silikátový podklad v náročných expozičních podmínkách*. Brno, 2018. 91 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Kamila Bergerová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Kamila Bergerová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování vedoucímu své práce prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA za věnovaný čas, cenné připomínky a rady, které mi pomohly k vyhotovení této práce. Dále mé poděkování patří Ing. Jindřichu Melicharovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc při zpracování tohoto tématu. Taktéž bych ráda poděkovala Ing. Šárce Keprdové Ph.D., Ing. Lence Mészárosové Ph.D. a paní Blance Bártové za jejich ochotu a čas se mnou strávený na fakultě a ve výzkumném centru AdMaS.

V neposlední řadě bych rovněž chtěla poděkovat svým blízkým a rodině za neustálou podporu během studia.

Předložená práce byla zpracována v rámci řešení projektu TH02020415 „Pokročilé lepicí hmoty s vyšším podílem druhotných surovin do extrémně namáhaných prostředí“.

OBSAH

ÚVOD.....	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1 LEPICÍ HMOTY	14
1.1 Základní principy lepení	14
1.2 Druhy lepicích hmot.....	15
1.2.1 Lepicí hmoty na bázi cementu: čistě cementové a polymercementové	16
1.2.2 Lepicí hmoty na polymerní bázi: disperzní, reakční, silikonové	17
1.3 Třídění a označení lepicích hmot	18
2 SLOŽENÍ LEPICÍCH HMOT.....	19
2.1 Suroviny dle pojivové báze.....	19
2.1.1 Pojiva a aditiva polymercementových malt.....	19
2.1.2 Polymerní materiály.....	21
2.2 Plniva lepicích hmot	22
2.2.1 Primární plniva	23
2.2.2 Druhotná plniva	23
3 TECHNOLOGICKÝ POSTUP APLIKACE LEPICÍCH HMOT	25
3.1 Faktory ovlivňující výběr lepicí hmoty.....	25
3.1.1 Vlastnosti lepených materiálů	25
3.1.2 Expoziční podmínky.....	25
3.2 Příprava podkladu.....	28
3.3 Aplikace lepicích hmot.....	29
3.3.1 Tlustovrstvá lepicí metoda.....	29
3.3.2 Středněvrstvá lepicí metoda.....	30
3.3.3 Tenkovrstvá lepicí metoda.....	30
3.3.4 Lepení do tekutého lože.....	31
3.3.5 Vady v lepených spojkách	32
4 LEPENÉ PRVKY: VÝROBKY Z TAVENÉHO ČEDIČE.....	33
4.1 Vlastnosti odlitků z taveného čediče.....	33
4.2 Výrobky z taveného čediče.....	34
PRAKTICKÁ ČÁST	36
5 CÍL.....	36

6	METODIKA PRÁCE.....	37
6.1	Etapa I: Formulace požadavků na vyvíjené lepicí hmoty	37
6.2	Etapa II: Stanovení vlastností a předúprava vstupních surovin	38
6.3	Etapa III: Vývoj a základní testování receptur lepicích hmot do extrémních podmínek.....	39
6.4	Etapa IV: Pokročilé testování a experimentální ověření vlastností lepicích hmot ..	41
6.5	Etapa V: Optimalizace výsledků a výběr nejúspěšnějších receptur	42
7	ETAPA I: FORMULACE POŽADAVKŮ NA VYVÍJENÉ LEPICÍ HMOTY.....	43
7.1	Požadavky na vlastnosti lepicích hmot dle prostředí	43
7.2	Přehled vybraných produktů lepicích hmot dostupných v ČR.....	44
7.3	Vyhodnocení etapy I.....	47
8	ETAPA II: STANOVENÍ VLASTNOSTÍ A PŘEDÚPRAVA VSTUPNÍCH SUROVIN	48
8.1	Primární suroviny	48
8.1.1	Cement.....	48
8.1.2	Normalizovaný písek	49
8.2	Druhotné suroviny – plniva.....	49
8.2.1	Škvára – Mělník.....	51
8.2.2	Slévárenský písek.....	52
8.2.3	Popílek – Tušimice.....	53
8.3	Vyhodnocení etapy II	54
9	ETAPA III: VÝVOJ A ZÁKLADNÍ TESTOVÁNÍ RECEPTUR LEPICÍCH HMOT DO EXTRÉMNÍCH PODMÍNEK	55
9.1	Návrh receptury.....	55
9.2	Základní laboratorní testování	56
9.2.1	Příprava zkušebních těles	57
9.2.2	Stanovení počáteční tahové přídržnosti.....	57
9.2.3	Vyhodnocení.....	58
9.3	Vyhodnocení etapy III	60
10	ETAPA IV: POKROČILÉ TESTOVÁNÍ A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ LEPICÍCH HMOT	62
10.1	Příprava zkušebních těles	62
10.2	Popis prováděných zkoušek	63
10.2.1	Stanovení tahové přídržnosti cementových lepidel.....	63
10.2.2	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty.....	63
10.2.3	Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku.....	63
10.2.4	Stanovení chemické odolnosti.....	63

10.2.5	Mikrostrukturní analýzy	64
10.3	Vyhodnocení pokročilého testování a etapy IV	65
10.3.1	Fyzikálně-mechanické zkoušky.....	65
10.3.2	Analýzy mikrostruktury	70
11	ETAPA V: OPTIMALIZACE VÝSLEDKŮ A VÝBĚR NEJÚSPĚŠNĚJŠÍCH RECEPTUR.....	76
11.1	Optimalizační výpočet.....	76
11.2	Vyhodnocení etapy V	78
12	SHRNUTÍ A DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	79
13	ZÁVĚR	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
	SEZNAM GRAFŮ.....	90
	SEZNAM TABULEK	91

ÚVOD

Spojování materiálů lepením představuje jednu z nejstarších a nejdůležitějších technik lidstva, ovšem až zásluhou intenzivního vývoje a výzkumu v oblasti chemie bylo umožněno zdokonalování materiálových vlastností lepicích hmot. Na stavební materiály působí mnoho faktorů, které značně ovlivňují jejich vlastnosti. Lepené spoje jsou vystavovány stejným nepříznivým vlivům jako lepené prvky, z tohoto důvodu se musí jejich vlastnosti co nejvíce blížit vlastnostem těchto materiálů. Při lepení čedičových prvků je třeba na kvalitu lepidla dbát dvojnásob. Výrobky z taveného čediče jsou známy pro svou mechanickou a chemickou odolnost a nacházejí své využití především v oblasti staveb realizovaných v agresivním prostředí. V současné době existuje mnoho druhů lepidel od různých výrobců, které svou kvalitou vyhovují kladeným požadavkům, ovšem je třeba stále hledat nové směry a možnosti.

Sílicí environmentální požadavky moderní společnosti a přísnější legislativní nařízení ovlivňují mnoho průmyslových odvětví, přičemž stavebnictví není výjimkou. Jsou hledány a zkoumány nové možnosti využití nejrůznějších alternativních surovin (druhotné suroviny, vedlejší produkty různých průmyslových výrob atd.), které by v případě jejich nevyužití představovaly odpad. Zejména v Evropě se nakládání se stavebními materiály dostává stále více do popředí zájmu. Použití odpadních materiálů přináší v mnoha případech značné výhody. Kromě snížení výsledné ceny vyráběného produktu a úspory nákladů na skladování a likvidaci odpadních surovin lze taktéž docílit zlepšení vlastností samotného výrobku. Dochází tak k propojení technologické, ekologické i ekonomické roviny.

Tato práce se zabývá výzkumem a vývojem lepicích hmot s obsahem druhotných surovin. Tyto suroviny budou částečně nebo plně nahrazovat běžná plniva. Cílem je zjistit, zda je možné nahradit v lepidlech standardně používané plnivo za alternativní materiály, aniž by byly negativně ohroženy parametry nově vyvinutých hmot, přičemž důraz je kladen na přídržnost hmot k nenasákavým čedičovým prvkům v náročných expozičních podmínkách.

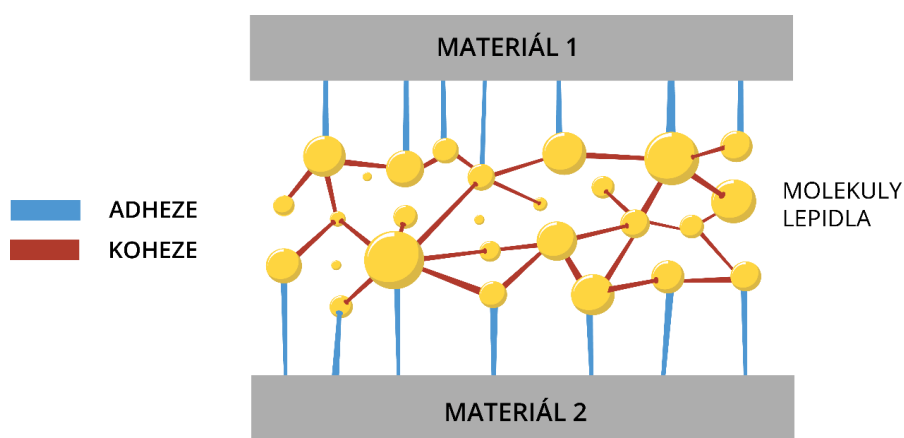
Tato práce navazuje na bakalářskou práci s tématem „*Vývoj průmyslového lepidla pro ukládání nenasákavých prvků*“. [1]

TEORETICKÁ ČÁST

1 LEPICÍ HMOTY

1.1 Základní principy lepení

Princip lepení spočívá v působení sil, které souhrnně nazýváme adheze a koheze. Adheze čili přilnavost je vlastnost lepidla, která vyjadřuje schopnost lepicí hmoty přilnout k lepenému povrchu. Pojem koheze označuje vzájemnou soudržnost částic vlastního lepidla. Působením adhezních a kohezních sil vzniká lepený spoj. [1]



Obrázek 1 Vztah lepidla k lepenému materiálu [1]

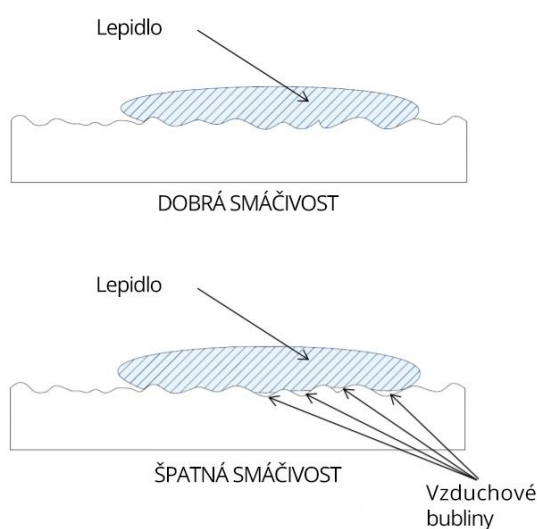
Na základě složení lepených materiálů a lepidel mohou nastat různé formy adheze. Autoadheze jednostranná nebo oboustranná nastává v momentě, kdy má spojovaný materiál a lepidlo stejné složení. [2]

Mezi adhezivem (lepicí hmotou) a adherendem (lepeným povrchem) je možné rozlišit dva hlavní druhy vazeb: mechanickou a chemickou.

Mechanická vazba je podmíněna porézní a členitou strukturou adherendu. Tekutá lepicí hmota proniká do pórů a nerovností povrchu, po zatuhnutí adheziva dojde k mechanickému ukotvení a vytvoří se pevné spojení mezi lepidlem a lepeným materiálem. Uplatňuje se při lepení dřeva, papíru, keramiky či pěnových plastů. Při lepení hladkých povrchů má nepatrný význam. [1]

Chemická (specifická) vazba se uplatňuje u porézních i zcela hladkých povrchů materiálů. Tato teorie je založena na působení slabých Van der Waalsových sil mezi molekulami adheziva a lepeného materiálu a zejména na přímém chemickém působení lepidla na lepený povrch. Díky tomu se lépe spojují materiály, které mají reaktivní povrch, nebo povrch chemicky upraven tak, aby mohla proběhnout chemická reakce mezi lepidlem a povrchem za vzniku kovalentní vazby. U špatně spojitelných povrchů jako je např. nikl, zlato, aj. se chemická vazba nevytváří. [1]

Při lepení hraje významnou roli v pevnosti lepeného spoje tzv. smáčivost, což je proces tvorby stálého kontaktu mezi lepidlem a adherendem. Jedná se o základní předpoklad kvalitního spojení dvou materiálů. Se smáčivostí úzce souvisí povrchové napětí materiálu. V případě, kdy je povrchové napětí kapaliny nižší než povrchové napětí lepeného povrchu, dojde k jeho smočení a vzniká adhezní vazba. Při dobré smáčivosti se adhezivum přizpůsobí nerovnostem povrchu. V opačném případě nedojde k rozprostření lepidla po celém povrchu a není docíleno vytvoření dostatečně velké kontaktní plochy mezi lepidlem a adherendem, což má za následek menší pevnost a odolnost spojení. Rozdíl mezi úplnou a neúplnou smáčivostí povrchu je znázorněn na obrázku 2. [3]



Obrázek 2 Příklad úplného a neúplného smáčení povrchu [3]

1.2 Druhy lepicích hmot

Dle chemického složení a principu tuhnutí ve spoji rozdělujeme dva základní typy spojovacích hmot: maltoviny a lepidla.

Maltoviny jsou směsi hydraulických (cementových) pojiv, minerálů a jiných organických přísad v suchém, převážně práškovém stavu. V praxi postačí pouhé zamísení s vodou a vznikne plastické těsto nazývané malta (s jemnozrnným plnivem), v některých případech i pasta (bez plniva).

Lepidla představují čistě polymerní lepicí hmoty samotné nebo s obsahem plniv. Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, v jejichž velké molekule (makromolekule) se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka. Tvoří tedy chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. [4] [5]

Disperzní lepidla tvoří hotové homogenní směsi z organických pojiv ve formě vodní disperze a minerálních přísad. Reakce vytvrzování lepidla probíhá postupným odpařováním vody obsažené v lepidle, resp. případným sesítováním. Lze je použít na širokou škálu materiálů,

kteřé vřak muří bŕt porézní. Disperzní lepidla vytvářejí tenk  film, a proto mohou bŕt nan řena pouze na dobře p l haj c  povrchy. [2] [4]

Lepidla na bázi reaktivních pryskyřic se skládají z polymerních pryskyřic a minerálních a organických p řisad. Dle typu reagujících látek bývají jednoslořkov  nebo (řastěji) v ceslořkov . [2] [4]

Tabulka 1 Rozdělení jednotlivých druhů lepicích hmot [4]

Druh lepicí hmoty	Oznařen�	Flexibilita	Vytvrzování	Rozdělení
Řist� cementov� maltoviny a malty	CM (Cement Mortar)	Neflexibilní	Hydraulicky	Ř�dn�
Polymercementov� maltoviny a malty	PMM (Polymer-Modified Mortar)	Flexibilní dle druhu	Hydraulicky	Prefabrikovan� Polymery zuřlecht�n�
Řist� polymerní lepidla a tmely	PM (Polymer Mortar)	Flexibilní dle druhu	Odpařením vody nebo ses�řov�n�m	Disperzní (vhodn� akryl�tov� disperze)
		Flexibilní dle druhu	Tvrdidly – chemickou reakcí	• Reakřn� (reaktivní, pryskyř�dn�) • Akryl�tov� • Epoxidov� • Polyuretanov�
		Flexibilní	Chemickou reakcí	Silikonov�

Důležitým parametrem lepicích hmot obecn  je jejich modul pruřnosti. Ten vyjadřuje schopnost daného materiálu deformovat se pruřn  ři plasticky vlivem vn řř ho zat řen . Modul pruřnosti jemnozrných cementových malt se pohybuje v rozmezí od 20 do 30 GPa. Vřeobecn  je snahou docílit co nejv řř  pruřnosti lepicích hmot, tedy co nejniřř ho modulu pruřnosti. U lepidel s vysok m modulem pruřnosti v praxi řasto dochází ke ztrátě soudrřnosti. Sn řen  modulu pruřnosti p  zachování ostatních materiálových vlastností na p řijateln  úrovni je dosařeno p řidavkem polymerních slořek. [4] [6]

1.2.1 Lepicí hmoty na bázi cementu: řist  cementov  a polymercementové

V p řipad  řist  cementových maltovin hovoříme o klasick  sm ři cementu, vody a drobného kameniva (plniva). Tyto slořky vytváří tradiřn  spojovací maltu. Tento typ maltoviny se v souřasn  době pouř v  uř jen jako podklad pod nejr zn jř  typy dlařeb. Řist  cementov  suspenze nelze doporuřit pro tenkovrstv  lepen  obkl dac ch prvku a dlařdic. V sledn  spoj je sice velmi soudrřn , avřak mimoř dn  křehk  s vysok m modulem pruřnosti. [4]

S postupným vývojem stavebnictví a příchodem nových požadavků se vlastnosti čistě cementových malt ukázaly jako nedostatečné. Z tohoto důvodu byla prováděna řada výzkumů zabývajících se možnostmi zlepšení vlastností čistě cementových malt, jejichž hlavní nevýhodou je nejen nízká tahová pevnost a adheze, ale také zpomalené tvrdnutí, vysoké smrštění a nízká chemická odolnost. Bylo zjištěno, že přidavek organických polymerních aditiv významnou měrou ovlivňuje vlastnosti malt. Takto upravené malty se nazývají polymery modifikované malty (PMM) neboli malty polymercementové. Polymerní modifikace zlepšují nejen přídržnost malty k podkladu, ale také její zpracovatelnost. Díky tomu se s maltou snadněji manipuluje a lépe se aplikuje. Některé polymery se chovají jako plastifikátory, což umožňuje snížit vodní součinitel. To vede k lepším pevnostem a ke snížení pórovitosti malty, což pozitivně přispívá ke zlepšení mrazuvzdornosti, odolnosti vůči chloridům, nepropustnosti a celkové trvanlivosti malt. Do jisté míry snižují modul pružnosti, což se projevuje zvýšenou flexibilitou hmoty. [7] [8] [9] [10]

1.2.2 Lepicí hmoty na polymerní bázi: disperzní, reakční, silikonové

Skupina lepicích hmot na čistě polymerní bázi představuje speciální druh lepidel, které umožňují k podkladu připevnit vysoce slinuté keramické prvky, přírodní kámen či sklo. Mají mimořádně vysokou přídržnost k podkladu, mohou být zcela mrazuvzdorné, případně chemicky odolné. Tyto přednosti se však odrážejí na vyšší ceně materiálu, která mnohonásobně převyšuje cenu standardních polymercementových maltovin. [4]

Jedná se o speciální produkty např. na bázi akrylátových vodných disperzí, nevodných akrylátových, polyuretanových, epoxidových a případně silikonových pryskyřic, kde vaznou fází tvoří čistě polymerní složka doplněná pouze inertním plnivem (kamenivem). Kromě řady druhů akrylátových vodných disperzí se jedná převážně o dvousložkové hmoty, vyžadující speciální pracovní postupy založené většinou na reakci pryskyřice s tvrdidlem, urychlovačem či jinou polymerní hmotou. Z těchto důvodů hovoříme o reakčních, někdy také reaktivních pryskyřičných lepidlech. Jejich užití připadá v úvahu při lepení extrémně namáhaných keramických obkladů či dlažeb nebo v těch případech, kdy má vrstva obkladu či dlažby současně vytvořit vodotěsnou bariéru. [4]

1.3 Třídění a označení lepicích hmot

Malty a lepidla pro keramické obkladové prvky jsou podle normy ČSN EN 12004+A1 [11] rozděleny do tří skupin, a to následovně:

Tabulka 2 Označení lepicích hmot [11]

Označení	Druh	Popis
C	Cementové lepidlo	směs hydraulických pojiv, kameniva a organických přísad, která se bezprostředně před použitím mísí s vodou nebo kapalnou složkou
D	Disperzní lepidlo	směs organických pojiv ve formě vodné polymerní disperze, organických přísad a minerálních plniv připravená k použití
R	Lepidlo na bázi reakčních pryskyřic	jedno nebo vícesložková směs syntetické pryskyřice, minerálních plniv a organických přísad, která se vytvrzuje chemickou reakcí.

Každý druh se může vyskytovat v různé třídě, pro označení používáme tyto zkratky:

- 1 – malta nebo lepidlo pro běžné užití,
- 2 – malta nebo lepidlo pro náročnější aplikace (splňuje požadavky na doplňkové vlastnosti),
- F – rychle tvrdnoucí malta,
- T – malta nebo lepidlo se sníženým skluzem,
- E – malta nebo lepidlo s prodlouženou dobou použitelnosti (jen pro cementové malty pro náročnější aplikace a disperzní lepidla pro náročnější aplikace). [11]

Následující tabulka porovnává parametry lepicích hmot určených k lepení obkladů a dlažeb. Barevně jsou vyznačeny nejlepší parametry:

Tabulka 3 Porovnání lepicích hmot [12]

Parametr	LEPICÍ HMOTA		
	Cementová lepidlo (C)	Disperzní lepidlo (D)	Lepidlo na bázi reakčních pryskyřic (R)
Aplikace	interiér, exteriér stěna, podlaha	interiér stěna	interiér, exteriér stěna, podlaha
Doba vytvrzení	střední	pomalá	PUR rychlá EP pomalá
Stabilita	velmi dobrá	dobrá	špatná
Přidržitost	dobrá	dobrá	výborná
Chemická odolnost	nízká	nízká	vysoká
Tepelná odolnost	střední	nízká	nízká
Cena	nízká	střední	vysoká

2 SLOŽENÍ LEPICÍCH HMOT

2.1 Suroviny dle pojivové báze

Pojivem se rozumí látky nebo směsi látek, které se povětšinou upravují do tekuté nebo kašovitě formy a následně snadno přecházejí z této formy do formy pevné. Je třeba rozlišovat pojiva organického a anorganického původu. Jednotlivé druhy pojiva propůjčují lepicím hmotám specifické vlastnosti a následující podkapitola poskytuje přehled o základních informacích o surovinách dle pojivové báze lepicí směsi a poukazuje na jejich hlavní výhody a nedostatky. [1]

2.1.1 Pojiva a aditiva polymercementových malt

2.1.1.1 Cement

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. To znamená, že po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí na vzduchu i ve vodě zachovává svoji pevnost a stálost ve vodě. V současné době se pro lepidla určené k lepení obkladů nejvíce používají tři typy cementů: portlandský, portlandský pucolánový a hlinitanový hlinitanový. [12] [13]

Nejčastěji používaný je **cement portlandský**. Portlandský slínek se vyrábí výpalem připravené homogenní surovinové směsi složené ze základní vápenaté složky a křemičité složky v rotační peci při teplotách okolo 1 450 °C. **Portlandský pucolánový cement** představuje kombinaci portlandského cementu (46-96 %) a pucolánů (6-35 %) (jejich označení CEM II/A-P – CEM II/B-Q). Jako pucolány označujeme sopečné popely vyznačující se vysokým obsahem amorfního SiO₂. Jejich přítomnost zvyšuje odolnost vůči uhličitánovým vodám, odpadním vodám a zvyšuje plastičnost cementové maltoviny, čímž podporuje vodotěsnost. [14] [12]

Hlinitanový cement, který obsahují více než 35 %, je ve srovnání s portlandským cementem používán v daleko menší míře. Tyto cementy vynikají rychlým nárůstem počátečních pevností. Po delší době u nich však dochází k poklesu pevností a následnému rozpadu. Z tohoto důvodu je vyloučené je používat k výrobě konstrukčních betonů. V kombinaci s portlandským cementem nachází své využití při výrobě lepicích hmot. Fungují jako dobrý akcelerator tuhnutí při hydrataci portlandského cementu, díky kterému je možné lepený prvek plně zatěžovat již po několika hodinách. Mimo jiné jsou odolné v agresivním prostředí a vůči působení vysokých teplot. [1] [12]

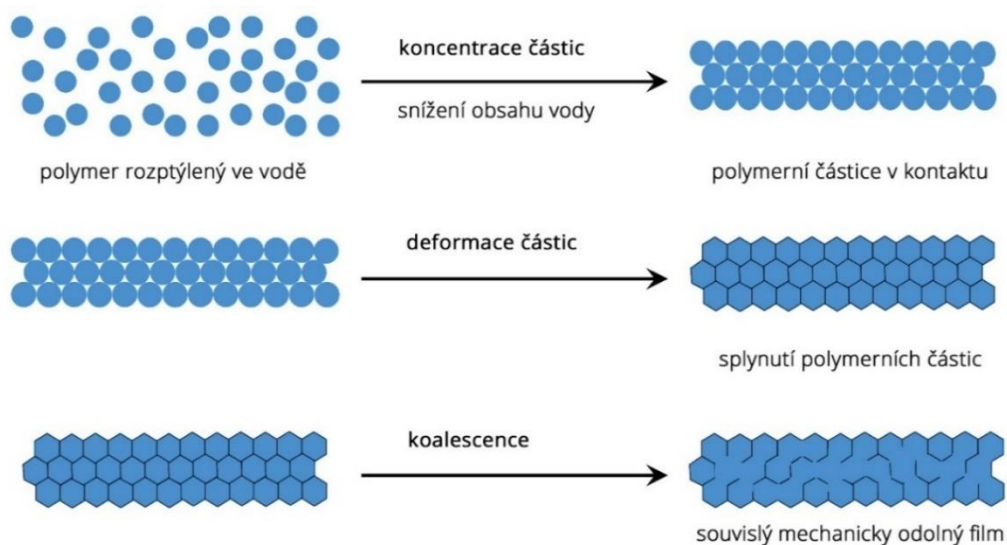
2.1.1.2 Chemické přísady

Chemické přísady fungují jako modifikující složka malt. Volba polymeru závisí na požadovaných užitných vlastnostech materiálu pro konkrétní aplikace. Jestliže je použito více přísad, je důležitá jejich vzájemná kompatibilita, aby jejich vzájemné interakce negativně neovlivňovaly vlastnosti malt. [12] [15]

Polymercementové malty se skládají ze stabilizátorů, které zajišťují mimořádnou tixotropii neboli nestékavost. Další složkou jsou redispergované polymery, které ovlivňují lepivost maltoviny, její pružnost a velkou mírou mohou potlačovat její smršťování. Nakonec obsahují přísady, které se nazývají odpěňovače a redukují případné provzdušňující účinky redispergovaných polymerů. Zároveň zvyšují hutnost, tím sníží nasákavost maltoviny, což má za následek zvýšení mechanických vlastností. [1]

▪ **Redispergovatelné polymery**

Vlastnosti polymerem modifikovaných malt významně závisí na obsahu polymeru nebo na poměru polymeru a cementu. Polymery pro výrobu malt existují v nejrůznějších formách: latexů, vodou ředitelné polymerů, kapalných pryskyřic a monomerů a nejčastěji redispergovatelných polymerních prášků. Volba polymeru pak závisí na požadovaných vlastnostech malty. Ať už se jedná o jakýkoliv typ modifikační přísady, důležitým faktorem je, aby proces hydratace cementu společně probíhal současně s procesem tvorby polymerní fáze (shlukování polymerních částic a polymerizace monomerů). Dojde ke vzniku monolitické matrice se síťovou strukturou, ve které se hydratovaná cementová báze prolíná s fází polymerní. Při vytvrzování cementové matrice dochází k tvorbě polymerního filmu. Mechanismus vzniku polymerního filmu je možné rozdělit do tří fází, jak znázorňuje obrázek 3. V první fázi po nanesení lepicí hmoty dochází ke ztrátě vody, a to díky hydrataci cementu, kapilárnímu sání substrátu a odpaření vody do okolní atmosféry. Ztráta vody zapříčiní zvýšení koncentrace polymerních částic a jejich shlukování. V druhé fázi se dále snižuje obsah vody a dochází k deformaci částic polymeru a k jejich nezvratnému splnutí. Zdárný průběh splnutí částic ovlivňuje teplota. Proběhne jen v případě, pokud je teplota vyšší než minimální teplota pro tvorbu filmu v závislosti na druhu polymeru. Vytvořený film je v této fázi mechanicky velmi slabý, V závěrečné etapě nastává kompletní splnutí neboli koalescence a vytvoří se kompaktní polymerní film. [7] [12] [16]



Obrázek 3 Proces vytváření polymerního filmu [12]

Pro výrobu polymery modifikovaných malt se nejčastěji používají latexy či kombinace polymerů polyvinylacetátu, kopolymerů ethylen vinyl acetátu, styren-butadienu, styren-akrylátu a akrylátu. [17]

▪ *Stabilizátory*

Jsou látky ovlivňující tixotropii (nestékavost). Jsou schopny plně nahradit efekt, který byl dříve dosahován použitím vzdušného vápna. Mezi nejběžnější stabilizátory patří methyl-, ethyl – nebo hydroxyethylcelulóza. Tato přísada se dává v množství pouze několik setin procenta z hmotnosti směsi. [4]

▪ *Odpěňovače*

Hlavním úkolem odpěňovacích přísad je potlačit případné provzdušňující účinky redispergovatelných polymerů. To zapříčiní zvýšení hutnosti, díky tomu je snížena nasákavost malty a jsou zlepšeny mechanické vlastnosti. Používají se polyalkylenglykoly a silikonové odpěňovače. [4] [12]

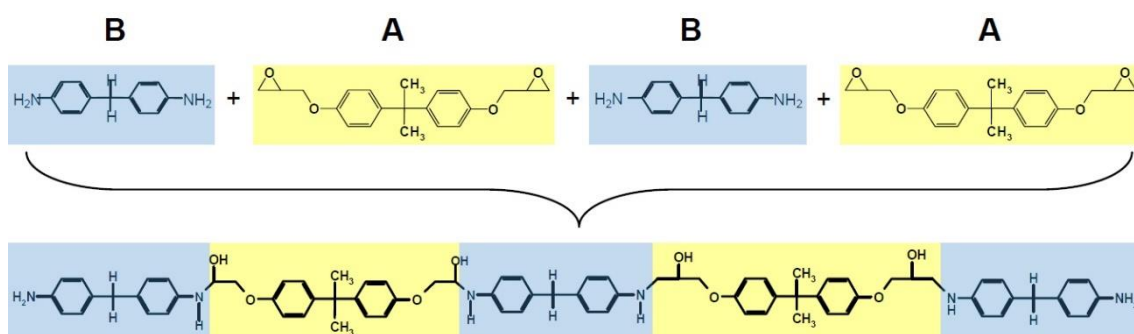
2.1.2 Polymerní materiály

▪ *Akrylátové disperze*

Polyakryláty rozumíme polymery a kopolymery kyseliny akrylové a methakrylové a jejich estery, amidy, nitrily i 2-kyanakryláty. Vyznačují se vysokou odolností vůči povětrnosti, stálostí na světle, transparentností a dobrou přilnavostí. [1]

▪ *Epoxidové pryskyřice*

Názvem epoxidové pryskyřice (EP) se označují pryskyřičné látky, jejichž řetězce obsahují zpravidla více než jednu epoxidovou (oxiranovou, ethylenoxidovou) skupinu. EP vykazují značnou reaktivitu s velkým počtem sloučenin, vzhledem k reaktivitě energeticky bohatého epoxidového kruhu. Tyto reakce vedou k sesítovaným makromolekulárním strukturám. Látky schopné reagovat s epoxidovými skupinami se nazývají tvrdidla. Po vytvrzení získávají epoxidové pryskyřice řadu nových vlastností, jako je mechanická pevnost, vysoká adheze k široké škále materiálů, minimální smrštění při vytvrzování nebo vysoká chemická odolnost, která stoupá s délkou řetězce molekuly a se stupněm zesílení. Tyto vlastnosti jsou pro většinu aplikací v náročných podmínkách nezbytné. [18] [19]



Obrázek 4 Vytvrzovací reakce epoxidové pryskyřice (složka A) tvrdidlem (složka B) [12]

Vytvrzování epoxidových pryskyřic se uskutečňuje různými způsoby:

- polyadici probíhající na epoxidových skupinách,
- polykondenzací na přítomných hydroxylových skupinách,
- polymerací epoxidových skupin.

V praxi se nejčastěji setkáme s polyadiční reakcí. Nejvýznamnější je vytvrzování polyaminy a anhydridy polykarboxylových kyselin. [1] [20]

Epoxidová lepidla mají velmi dobrou přídržnost nejen ke kovům, ale i k porcelánu, sklu, horninám, ke dřevu i pryži. Nejsou však použitelná k lepení plexiskla, PVC, neupraveného polyethylenu, polypropylenu a některých dalších termoplastů, což je způsobeno málo polárním povrchem těchto hmot. Nepříznivou vlastností těchto lepidel je pokles pevností spojů po jejich dalším uložení ve vodě. [21]

▪ **Polyuretany**

Polyuretany řadíme do skupiny syntetických polymerů, které se vyrábí polyadici diizokyanátů (látky obsahující chemicky reaktivní skupiny $-NCO$) s vícemocnými alkoholy ($-OH$) za vzniku karbamátové (uretanové) vazby. Vytvrzení polyuretanů probíhá vlivem vzdušné vlhkosti. Polyadici takto vzniklé produkty jsou materiály s výbornou adhezí a dobrou chemickou odolností. Díky těmto vlastnostem se na bázi polyuretanů vyrábí kvalitní lepidla. Vysoká adheze polyuretanových lepidel je způsobena tím, že vznikající vodní film na povrchu slepovaných dílců zreaguje s pojivem, takže nevzniká nežádoucí vrstvička. Polyuretanová lepidla se používají při lepení dřeva, kovů, kůže a jiných hmot. Při jejich aplikaci je třeba brát v úvahu, že před vytvrzením polyuretany reagují citlivě na vlhkost prostředí. [21]

▪ **Silikonové pryskyřice**

Hydrolýzou dichlorsilanů a jejich samovolnou polykondenzací lze připravit polysiloxany neboli silikony. Silikonové pryskyřice se dodávají ve formě roztoku v toluenu o koncentraci 50–70 %. K dokončení polykondenzace na sesíťované makromolekuly dochází teprve po odpaření rozpouštědla a zahřívání na teplotu 220 °C až 240 °C po dobu 1 až 5 hodin. Silikonové pryskyřice vynikají svojí odolností vůči vysokým teplotám (–50 až 200 °C) a vůči teplotním šokům, velkou hydrofobizační schopností a chemickou odolností. Vyznačují se vysokou trvanlivostí a odolností proti povětrnostním vlivům, působení ozónu a slunečního záření. [1]

2.2 Plniva lepicích hmot

Původně byla plniva využívána ke snížení spotřeby pojiva za účelem snížení nákladů na výrobu konečného produktu. Ukázalo se však, že některá plniva zlepšují vlastnosti materiálů. Tato plniva jsou označována jako plniva funkční.

Hlavní důvody pro přidávání plniv jsou následující: redukce ceny, zlepšení zpracovatelnosti, úprava objemové hmotnosti, změna tepelné vodivosti, kontrola tepelného rozpínání,

zlepšení mechanických vlastností (např. pevnost, odolnost proti oděru, tepelná odolnost či zamezení tvorby trhlin).

Volba plniv je tedy dána především jejich chemickým složením, užitnými vlastnostmi, dostupností, cenou, a především jejich stabilitou a kompatibilitou s pojivovou složkou. [22]

2.2.1 Primární plniva

Křemičitany (silikáty) jsou sloučeniny oxidu křemičitého (SiO_2) a jedná se o nejčastěji používaná primární plniva. Důležité křemičitany jsou živce, slídy, granáty, amfiboly a pyroxeny (téměř všechny horninotvorné nerosty). V přírodě jsou rozšířené jako součásti hornin. Nejběžněji používaným plnivem je křemičitý písek. Je výhodný vzhledem ke své snadné dostupnosti, čistotě složení a jednoduché možnosti úprav (mletí apod.) V ČR jsou běžně prodávány křemičité písky s obsahem SiO_2 98 %. V praxi je do směsí určených pro kladení dlažeb a obkladů obvykle používán křemičitý písek frakce 0–4 mm. [1] [23] Odborná literatura uvádí, že nejvhodnější je použití frakce 0–1 mm. [12] Dalšími surovinami, které se používají jako primární plniva, jsou např. vápenec, mastek, slída atd. [1]

2.2.2 Druhotná plniva

Nevýhodou primárních plniv je jejich vysoká cena. Nabízí se tedy využití plniv na bázi druhotných surovin, které mohou úplně nebo částečně nahrazovat plniva klasická.

Jedná se o materiály získané během výroby nebo jiné lidské činnosti, které jsou produkovány ve velkém množství a problematicky skladovány či likvidovány bez jejich následného dalšího využití. Použití druhotných surovin ve stavebních hmotách znamená příležitost nejen ke snížení výrobních nákladů, ale také k eliminaci ekologické zátěže. Při výběru surovin je však nutné také zohlednit dostupnost tuzemských zdrojů. [1]

Elektrárenský popílek je nerostným zbytkem po spalování tuhých paliv (v práškovém stavu) získávaný zachycováním z plynných spalin v odlučovacích zařízeních. Na základě technologie procesu splavování se popílký dělí na popílký získané vysokoteplotním spalováním v klasických kotlích a popílký vznikající při fluidním spalování. [1]

Slévárenský písek je odpadním produktem slévárenských provozů, kde se čistý křemičitý písek smísí s určitým podílem bentonitu či vodního skla, případně se smísí s dalšími materiály. Tato směs je poté naplněna do formy. Po následném vylisování se vloží jádra a po odlití se nechá výrobek zatuhnout. Odlitek postupuje na rošt, kde dochází k rozpadu formy. V násypce pod roštem dochází ke třídění písku. Roční spotřeba slévárenských písků činí v ČR zhruba 800 000 t, přičemž pouze necelých 10 % z toho je recyklováno. [24]

Skleněný recyklát představuje relativně levné a velmi ekologické plnivo. [1]

Škvára je anorganický odpad, vznikající na roštích nebo v topeništích spalováním uhlí, hořlavých břidlic a jiných pevných paliv. Jedná se o odpadní surovinu, vyznačující se velkou nehomogenitou a možností obsahu většího množství škodlivin. Především obsahuje volné oxidy vápníku a hořčíků. Při jejich hašení dochází ke zvětšování objemu a tvorbě trhlin v cementové matici. Tento jev je tzv. vápenaté a hořečnaté rozpínání. Škvára proto bývá

uložena na odvalech minimálně po dobu 6 měsíců. Volné oxidy zhydratují, zkarbonatují a je umožněno její použití. Volné vápno je možné odstranit taktéž praním. Při dlouhodobém uložení škvár se výrazně zlepšují jejich vlastnosti. [1]

Brusné a řezné kaly vznikají při broušení řezáním, vrtáním či broušením dlažby. Tyto kaly jsou po výbrusu následně promíchány a při procesu sedimentace jsou částečně zbaveny vody a následně vysušeny na vlhkost cca 40 %. Roční produkce odpadu z výroby dlažby se pohybuje okolo 1000–2000 t/rok. [25]

Odpad z praní drceného vápence se získává z vápence ve fázi procesu praní a sušení podrcené suroviny. Díky vysoké vlhkosti je třeba jej před samotným použitím dosušit. [1]

Kamenný odprach vzniká zachytáváním jemných zbytků ve filtrech při drcení kameniva. Mineralogické a chemické složení závisí na dané lokalitě těžby. [24]

Odpadní plast zahrnuje širokou škálu materiálů. Výsledky mnoha studií nejsou jednoznačné ohledně použití plastového granulátu jako náhrady plniva do malt. Vlastnosti lepicích hmot jsou závislé na druhu, tvaru a velikosti použitého plastického materiálu. Bez ohledu na typ plastu použití plastového recyklátu má negativní vliv na soudržnost malt vlivem nízké vazebné síly mezi cementovou pastou a povrchem částic plastu. Na druhou stranu bylo potvrzeno, že substituce přírodního plniva z 50 % odpadním plastem, sníží pevnost v tlaku pouze o 16 %. Přídržnost nebyla předmětem testování. Stávající studie taktéž poukazují na lepší chemickou odolnost malt s obsahem plastového recyklátu. Částečná náhrada je tedy možná. [26]

3 TECHNOLOGICKÝ POSTUP APLIKACE LEPICÍCH HMOT

Správné dodržení technologického postupu při aplikaci lepicích hmot má výrazný vliv na jejich výslednou kvalitu a životnost lepeného spoje. Je nezbytné splnit všechny technologické kroky, které jsou doporučené výrobcem materiálu. Ať už se jedná o přípravu podkladu, aplikaci lepidla nebo následné ošetřování aplikované hmoty.

3.1 Faktory ovlivňující výběr lepicí hmoty

Jedním z prvních kroků je správný výběr vhodného typu adheziva. Správný výběr je závislý na faktorech popsanych v následující kapitole.

3.1.1 Vlastnosti lepených materiálů

Základem je zjistit vlastnosti lepených materiálů. A to jejich strukturu, složení a propustnost plynů. Tyto informace jsou důležité pro výběr lepidla z hlediska adheze, koheze a tuhnutí lepidla ve spoji. Další vlastnosti lepených materiálů jsou tepelná stálost a roztažnost a rozpustnost v organických rozpouštědlech. [27]

Zásadní roli při výběru lepidla hraje **chemická podstata** lepeného materiálu. Nejčastěji lepenými materiály jsou kovy, plasty nebo dřevo. K lepení kovů a polárních plastů se hodí lepidla epoxidová a polyuretanová. U nepolárních plastů se využívají lepidla kyanoakrylátová. Při lepení dřeva hraje hlavní roli druh lepeného dřeva. Převládají lepidla močovinová, polyuretanová a epoxidová. [1]

Pro zvolení vhodného typu lepidla je velmi důležité znát **savost**, tedy poréznost materiálu. Mezi nesavé povrchy materiálů se řadí kovy, sklo, porcelán či plasty. Za savé považujeme dřevo a různé druhy zdiva a betonu. Jak je uvedeno v tabulce 4, v případě, že je alespoň jeden z lepených materiálů savý, je možné vybrat z širokého výběru lepidel bez výraznějšího omezení. Zvláštní pozornost je však třeba věnovat případům, kdy jsou oba materiály nesavé. Tato varianta nám dovoluje využít pouze lepidla čistě na polymerní bázi. [1]

Tabulka 4 Lepicí hmoty používané na základě savosti materiálů [1]

Kombinace materiálů dle savosti	Používané lepicí hmoty
Oba materiály savé	Široký výběr lepidel (disperzní, rozpouštědlová lepidla)
Oba materiály nesavé	Epoxidy, polyuretany, kyanoakryláty, kopolymery, polyamidy
Savý a nesavý materiál	Široký výběr lepidel (disperzní, rozpouštědlová lepidla)

3.1.2 Expoziční podmínky

Lepený spoj musí odolávat řadě vnějších vlivů a předpovědět změnu mechanických vlastností konkrétního lepeného spoje v určitém prostředí představuje složitý úkol, jelikož na spoj působí několik degradačních faktorů současně. Spolupůsobení degradačních faktorů

(např. zvýšené teploty a vlhkosti) může způsobit vážnější zhoršení mechanických vlastností než působení každého faktoru zvlášť. [28]

▪ ***Tepelné namáhání***

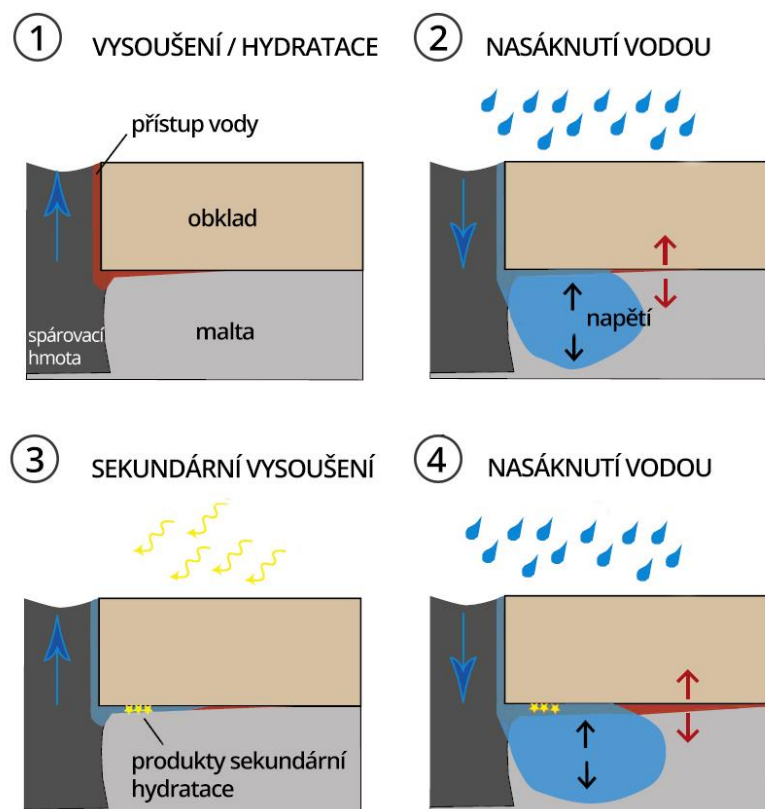
Reakce materiálu na změnu teploty, při které se mění délkové rozměry a objem tělesa, se nazývá teplotní roztažnost. Většina materiálů se při zahřívání rozpíná. Při následném ochlazení může dojít k tomu, že se těleso nevrátí do svého původního rozměru. Tyto změny jsou ovlivňovány složením materiálů, jejich strukturou či tvarem. Při lepení dvou materiálů o různé tepelné roztažnosti může vznikat ve spoji vnitřní pnutí, to způsobuje deformaci spoje, odlupování či praskání. Tomu se lze vyvarovat použitím flexibilního lepidla, které vytváří pružný film, který vyrovnává pnutí mezi adherendy. [2]

Všechny lepicí hmoty vystavené působení vysokých teplot a střídavým změnám teplot, podléhají do jisté míry degradačním procesům, které mají za následek zhoršení jejich užitných vlastností. Odborná literatura [29] uvádí, že některé z polymerních lepidel mohou odolávat soustavnému působení teplot v rozmezí až 260–316 °C. To se ovšem projeví na ceně materiálu a podmínky pro jejich aplikaci jsou náročné. Vysoce odolná jsou silikonová lepidla, která mají velmi široký rozsah provozních teplot od -50 až 200 °C. Aplikace u epoxidových lepidel je omezena do teploty maximálně 120 °C. Teplotní odolnost spojů lepidel polyuretanových dosahuje až 170 °C. Obecně nejvíce odolné vůči vysokým teplotám jsou lepicí hmoty na bázi polymercementu. Řada výzkumů potvrdila, že použití vhodného plniva přispívá k odolnosti vůči vysokým teplotám. [1] [29] [30]

▪ ***Vlhkost a voda***

Důležitou roli v kvalitě lepeného spoje hraje působení vlhkosti. Voda a vlhkost jsou považovány za nejvážnější degradační činitele, protože voda je polární látka a proniká do struktury lepidel (permeabilita). Vyšší teplota urychluje proces difuze, z čehož vyplývá větší poškození během kratší doby. [28]

Vlivem dlouhodobého působení vlhkosti (zejména za současného tepelného působení) dochází ke zhoršení materiálových vlastností, což často vede k porušení spoje. Zejména u polymercementových malt je třeba věnovat pozornost objemovým změnám. Při trvalém uložení ve vodě mohou dlouhodobě nabývat cca 1 ‰ (1 mm/m). Naopak u procesu vysychání dochází k výraznému smršťování přibližně 2-3 ‰ (2-3 mm/m). V případě již vyschlé a vytvrzené malty může být při styku s vodou znovu zahájena sekundární hydratace, což způsobí objemové změny, tím napětí a následné rozpraskání. Další problém představuje střídání vlhkého a suchého cyklu. Nejslabším článkem celého systému je rozhraní adheziva a podkladu. V případě opakovaného vysychání a opětovného nasáknutí vodou je smrštění až dvakrát intenzivnější než expanze v předchozím cyklu vlivem sekundární hydratace cementu po opětovném styku s vodou. Popsané procesy znázorňuje obrázek 5. Čelit rizikům poškození spojovací malty vlivem působení vlhkosti je třeba výběrem vhodné lepicí hmoty a řádným postupem při aplikaci. Důležitá ovšem je i vhodná volba spárovací hmoty, která se nesmršťuje a zamezuje průniku vody spárami mezi obkladovými prvky. [4] [31] [32]



Obrázek 5 Vliv střídání vlhkého a suchého cyklu na pevnost lepeného spoje [32]

Problém s vlhkostí se netýká pouze lepicích hmot na bázi polymercementu, ale taktéž čistě polymerních lepidel. Molekuly vody, které pronikají do struktury polymeru, mají tendenci se přednostně pohybovat k rozhraní, kde mají vliv na adhezní spojení mezi lepidlem a podkladem. Proto je při krátkodobém působení vlhkosti na spoj typický adhezivní způsob porušení. Citlivost na působení vody je rozdílná v závislosti na druhu použité pojivové báze, např. lépe odolávají lepidla silikonová než akrylátová. Dobrou odolností vůči účinkům vlhkosti a vodě se po vytvrzení vyznačují lepidla polyuretanová. Nevytvrzený materiál je však na vlhkost citlivý, a to díky tomu, že právě působením vzdušné vlhkosti či vlhkostí lepených povrchů dochází k sesíťování, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. [1] [28]

▪ **Mrazové působení vody**

Další důležitým faktorem, který může mít negativní vliv na trvanlivost lepeného spoje, je zamrznutí vody v kapilárním systému spojovací malty. Přeměna skupenství vody z kapalného na pevné je doprovázena zvětšením objemu o 9 %. Důsledkem tvorby ledu vznikají expanzní napětí, čímž se narušuje struktura malty. Vlivem cyklického mrazového působení může dojít k postupnému porušení spoje a ke ztrátě soudržnosti systému. [4]

▪ **Chemické zatížení**

Obkládací prvky a dlažby se vyznačují vysokou odolností proti chemickému zatížení, proto je při výběru lepicí hmoty třeba uvažovat s tím, že spojovací materiál bude vystaven stejnému prostředí. Z tohoto důvodu je nutné vybrat lepicí hmoty takového chemického složení, které odolají agresivním látkám. Nejlépe tomuto účelu vyhovují hmoty na polymerní bázi. V případě polymercementových malt záleží na druhu přidaného polymeru, ovšem obecně je jejich chemická odolnost výrazně nižší než u čistě polymerních adheziv. Rozhodujícím faktorem je jejich pevnost, pórovitost a přítomnost trhlin, jelikož každá trhlinka umožňuje přístup agresivních látek a snižuje trvanlivost. [1]

Neexistuje lepicí hmota, která by byla vhodná pro všechny typy chemických prostředí, druh lepidla je třeba volit v závislosti na konkrétní aplikaci. Epoxidová lepidla všeobecně mají velmi dobrou chemickou odolnost vůči široké škále agresivních látek. Výborně odolávají alkáliím a vedle toho i zředěným anorganickým a organickým kyselinám. Nicméně jejich odolnost je dána použitým tvrdidlem, které významně ovlivňuje vlastnosti výsledného spoje. Lepidla polyuretanová vykazují dobrou odolnost vůči většině chemikálií, rozpouštědel, olejů a maziv. [29]

3.2 Příprava podkladu

V technologických operacích spojování lepením nesmíme zapomínat na úpravu povrchu před samotnou aplikací lepicí směsi. Povrch adherendů je jedním z klíčových parametrů pro budoucí kvalitu a pevnost spoje, z tohoto důvodu je nezbytné zajistit odstranění nečistot a mastnot z povrchu. Pro podklad platí, že veškeré požadavky na přídržnost lepicí hmoty k podkladu nebo ke keramickému obkladu musí korespondovat s tahovými pevnostmi podkladu. [1] [3]

Jak již bylo zmíněno, lepené povrchy je nutné odmastit. Jestliže by byly znečištěny nepolární látkou, jako je např. tuk, bylo by bráněno požadované adhezi mezi materiály. Na znečištění povrchu jsou značně citlivé spoje hladkých a neporézních materiálů (např. kovů, skla a porcelánu). Pevnost lepeného spoje je taktéž jednoznačně závislá na mechanické úpravě povrchu adherendu, z toho důvodu je vhodné, aby byly plochy adherendu zdrsňeny. V případě polymercementových malt je možné přídržnost k podkladu zvýšit pomocí penetrace podkladu nebo tzv. adhezním můstkem. Vliv na výsledný spoj má taktéž rovinnost a vlhkost podkladu. [1] [3]

Ideálním podkladem pro obklad je objemově stabilizovaný, soudržný, rovný a suchý povrch. Vhodnost povrchu materiálu se určí podle měření povrchového napětí neboli zkouškou smáčivosti. Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, povrchové napětí substrátu musí být vyšší jako povrchové napětí lepicí hmoty. V praxi to znamená, že se lepidlo dostatečně rozteče a smáčí lepený povrch. [1] [33]

Následující tabulka poskytuje přehled požadavky na podklad podle druhu podkladu:

Tabulka 5 Specifikace jednotlivých druhů podkladů a vhodných spojovacích hmot [4]

Druh podkladu	Požadavky na podklad	Příprava podkladu vhodnou emulzí	Standardní hydraulická	Flexibilní hydraulická lepidla (PCC)	Speciální hydraulická lepidla	Disperzní lepidla (PC)	Lepidla na bázi reaktivních pryskyřic	Rychleschnoucí lepidla	Nutnost penetrace u PC lepidel
Dřevotřískové desky, dřevo	Min. tloušťka 19 mm, fixace ve vzdál. max. 400 mm					X	X		X
Staré obklady	Důkladně očistit a odmastit	X		X		X			
Beton	Starší než 28 dní	X		X				X	X
Pórobeton	Očistit od prachu	X		X				X	X
Cementové a sádrové omítky	Starší než 28 dní			X				X	
Sádrokartonové či sádrotřískové desky	Zatmelit mezery	X		X	X			X	
Umakart	Odmastit			X	X		X		X
Polystyrenové desky	Zajistit trvanlivost			X	X	X			
Hydroizolace	Vlhkost odpuzující materiál	X		X	X	X	X		
Speciálně do koupelen a sprch se sádrokartonovými, pórobetonovými podklady			X	X	X				X
Speciálně k lepení nenasákavých obkladových prvků		X		X		X	X		

3.3 Aplikace lepicích hmot

Nanášení lepidel či lepicích směsí se provádí různými metodami. Základní podmínkou je vytvoření lepicí vrstvy o tloušťce potřebné pro dosažení dobré pevnosti spoje. Ve velké většině případu se bude jednat o souvislou rovnoměrnou vrstvu o požadované tloušťce. Právě tloušťka vrstvy lepidla má výrazný vliv na mechanické charakteristiky lepeného spoje. Dají se rozlišit čtyři základní metody lepení obkladů a dlažeb. Každá je vhodná v jiné situaci. [34]

3.3.1 Tlustovrstvá lepicí metoda

Jedná se o osvědčený a v minulosti nejrozšířenější způsob pokládání dlažby. Obklady jsou kladeny do silné vrstvy malty a není vyžadována předchozí úprava podkladu. Předností této metody je možnost zakrytí výrazných nerovností bez vyrovnávací stěrky. I přesto však nevýhody této metody převažují. Záporům je vysoká spotřeba materiálu, jelikož minimální vrstva maltového lože se pohybuje okolo 15 mm na stěně a 20–50 mm na podlaze. Rozhodně se tedy neřadí mezi produktivní metody. Mimo jiné vyžaduje vysokou zkušenost a odbornost pracovníků. Zkušený pracovník musí připravit maltu odpovídajícího složení, což přináší riziko

horších fyzikálních vlastností malty. Směs se míchá přímo na stavbě, takže často nelze přesně dodržet poměr cementu, písku a vody. Kromě toho často dochází k tomu, že je používán nekvalitní písek s nesprávnou křivkou zrnitost. Tato metoda je navíc prakticky nepoužitelná v exteriéru. Jestliže se objeví pod dlažbou vzduchové dutinky, stávají se zdrojem problémů. Zejména u vodorovných venkovních ploch voda prochází spárami, kondenzuje v dutinách. Pokud zmrzne, rozpínající se led odtrhne keramický prvek od podkladu nebo dojde k poškození dlažby. [4] [35]

3.3.2 Středněvrstvá lepicí metoda

Tvoří mezistupeň mezi klasickou tlustovrstvou a v současné době nepoužívanější tenkovrstvou metodou. Používá se pro pokládku méně přesných obkladových prvků. Především těch, které mají různé tloušťky, kdy se tolerance ve potřebě lepidla pohybuje v rozmezí od 5–15 mm. [35]

3.3.3 Tenkovrstvá lepicí metoda

Tenkovrstvé lepicí metody patří mezi propracované a moderní metody lepení s mnoha výhodami. Použití se obvykle doporučuje do pěti milimetrů tloušťky lepicího lože, jinak by v lepidle došlo k vnitřnímu pnutí, což může mít za následek odchlípnutí dlažby či obkladu nebo by vedlo ke vzniku trhlin ve spárách či glazuře.

U tenkovrstvého lepení se rozlišují tři způsoby nanášení lepicí hmoty: *floating*, *buttering* a *buttering-floating*. [4] [35]

- **Metoda nanášení zubovým hladítkem (*Floating*)**

U této metody je lepicí malta nanášena na podklad ve dvou krocích. Nejprve se na podkladní plochu nanese tenká kontaktní vrstva. Následně se do čerstvé kontaktní plochy nanáší lepicí hmota zubovou stěrkou. Stěrka se táhne po plně nanesené vrstvě lepidla pod úhlem cca 60°. Je důležité, aby lepidlo bylo nanesené jen na takovou plochu, na kterou lze stihnout položit obkladový materiál v otevřeném čase. Výzkumy prokázaly, že u všech lepicích hmot se po 30 minutách snižuje přídržnost až na polovinu. Při pokládání platí zásada, že při aplikaci v interiéru, musí být lepidlem pokryto minimálně 60 % obkladačky a 90 % dlaždice. Pro exteriér platí pokrytí po celé ploše u všech obkladových prvků. [4] [35]

- **Metoda natírání (*Buttering*)**

Na podklad se natře tenká vrstva lepidla. Zároveň se lepidlo nanese i na rubovou stranu keramického prvku a obklad či dlažba i s lepidlem se vtlačí do lepidlem natřeného podkladu. Tento způsob lepení se využívá zejména při osazování soklů nebo při opravách obkladů. [35]

- **Kombinovaná metoda (*Buttering – Floating*)**

Je kombinací obou předchozích metod. Lepicí hmota se nanáší zubovým hladítkem na zadní stranu dlaždice nebo obkladačky i na podkladní plochu. Tato metoda se využívá při obkládání náročných ploch (balkóny, bazény nebo mrazicí boxy), kde se požaduje bezdutinové položení obkladu nebo dlažby. [35]

V praxi se u hydraulicky vytvrzujících tenkovrstvých lepicích hmot a u epoxidových lepidel používají všechny tři výše zmíněné metody. U disperzních lepidel se obvykle setkáváme pouze s metodou nanášení *floating*. [4] [35]

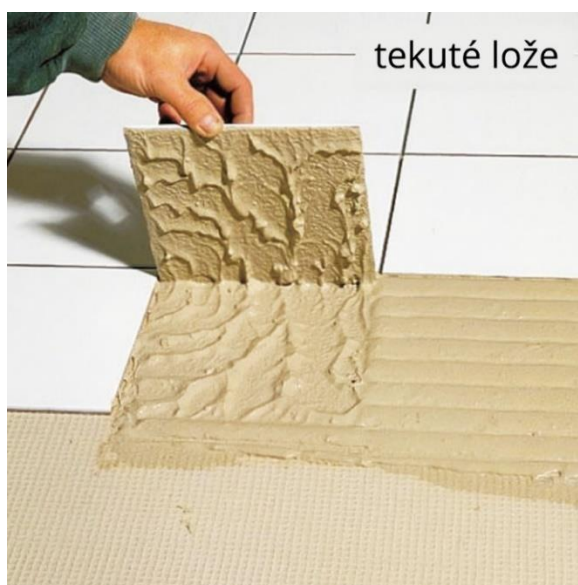


Obrázek 6 Lepicí hmota nanesená v tenké vrstvě pomocí zubové stěrky [36]

Tenkovrstvá lepicí metoda je efektivní a rychlá a ve srovnání s metodou tlustovrstvou má řadu předností. Mnohonásobně zvyšuje efektivitu práce a nevyžaduje speciální kvalifikaci a zkušenosti pracovníků. Obklady a dlažby je možné lepit prakticky bez omezení materiálu podkladu. Po několika málo hodinách je možné položenou dlažbu plně zatěžovat, což přináší značnou úsporu času. [4] [35] [36]

3.3.4 Lepení do tekutého lože

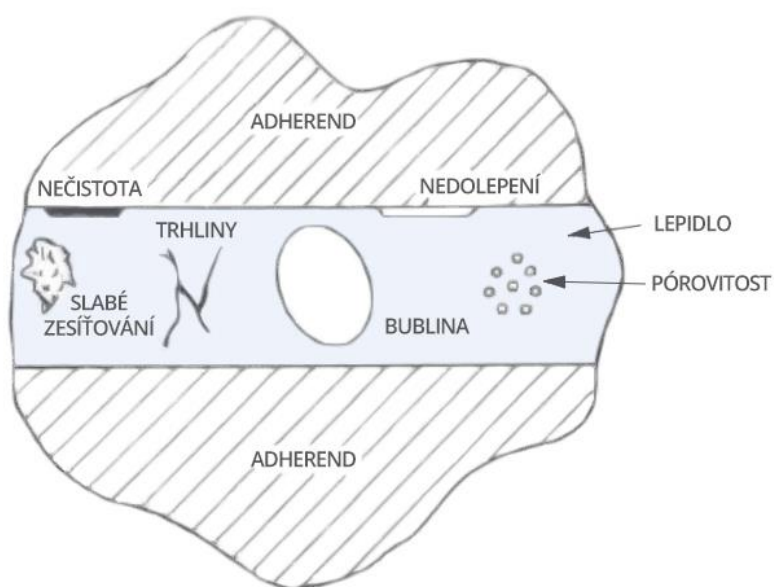
Pro kladení dlažeb velkých formátů (rozměry nad 330 x 330 mm) se používají lepicí hmoty řidší konzistence. Tyto hmoty vyžadují velmi kvalitní přípravu podkladu. Použitím této samonivelizující tekuté lepicí hmoty s následným 100% přilnutím lze dosáhnout několikanásobně vyšší rychlosti pokládky. Obrázek 7 zobrazuje pokládku dlažby do tekutého lože. [4]



Obrázek 7 Pokládka dlažby na tekuté lože [37]

3.3.5 Vady v lepených spojkách

Při vytváření a následné kontrole lepeného spoje je třeba přesně dodržet technologický postup daný výrobcem. Dodržením technologického postupu lepení dosáhneme nejen námi požadovaných a výrobcem deklarovaných mechanických vlastností lepeného spoje, ale také předejdeme vzniku nežádoucích vad. I malý defekt působí jako koncentrátor napětí a může významným způsobem změnit rozložení napětí ve spoji. Vady ve spoji značně snižují maximální pevnost lepeného spoje, která je závislá především na jeho ploše. Typické defekty vyskytující se v lepeném spoji můžeme vidět na obrázku 8. [38]



Obrázek 8 Vady vyskytující se ve vrstvě lepidla [38]

4 LEPENÉ PRVKY: VÝROBKY Z TAVENÉHO ČEDIČE

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, při lepení materiálů je třeba znát i vlastnosti lepených materiálů. Z tohoto důvodu se bude poslední kapitola teoretické části práce podrobněji zabývat výrobky z taveného čediče.

Přírodní čedič neboli bazalt se u nás vyskytuje na mnoha místech. Vzhledem ke své velmi obtížné obrobitelnosti bylo v minulosti těžké plně využít čediče jako stavebního materiálu. Používal se pouze v případech, kdy nebylo vyžadováno přesnějších rozměrů, tedy ve formě drti, jako šterku nebo dlažebního kamene. Až s vývojem průmyslu tavených hornin se kámen dočkal svého plného využití. [1]

4.1 Vlastnosti odlitků z taveného čediče

Odlitky z taveného čediče mají nejen původní vlastnosti této suroviny, ale zpracováním získávají vlastnosti, kterými překonají vlastnosti kovových materiálů. V následující tabulce je uvedeno shrnutí významných vlastností taveného čediče v porovnání s čedičem přírodním. [1]

Tabulka 6 Porovnání vlastností přírodního a taveného čediče [39]

Vlastnost		Jednotka	Přírodní čedič	Tavený čedič
Měrná hmotnost		kg/m ³	3040	3000
Objemová hmotnost		kg/m ³	3017–3057	2900–3000
Nasákavost		% hmot.	–	0
Porezita skutečná		% obj.	–	1–3
Pevnost v tlaku		MPa	162–318	450
Pevnost v ohybu		MPa	16,5–35,1	40
Délková teplotní roztlačnost	0–200 °C	K ⁻¹ 10 ⁶	–	8
	0–400 °C			9
Tepelná vodivost		20 °C	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	–
Chemická odolnost	70% H ₂ SO ₄	% obj.	24	9
	1% NaOH		2	1,5
Tvrdost dle Mohse			–	8
Obrusnost DIN 52108		cm ³ /50 cm ²	5,6–6,6	max. 5
Odolnost proti opotřebení EN 102		mm ³	139–177	max. 110

Vynikající fyzikální vlastnosti nabízí široké pole aplikací čedičových odlitků. Jednou z hlavních výhod těchto výrobků je vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení a dlouhodobá životnost i v těch nejnáročnějších podmínkách. Jeho tvrdost je dle Mohsovy stupnice

ohodnocena stupněm 8. K nesporným výhodám patří i výborné pevnostní vlastnosti, které překonají přírodní čedič. Další předností je nulová nasákavost a mrazuvzdornost tohoto materiálu. Tepelná odolnost má závislost na podmínkách okolního prostředí. Větší rozdíly teplot mají negativní vliv na pevnost materiálu. Náhlé změna teplot nad 250 °C může vyvolat porušení materiálu. [1]

Významná je i chemická odolnost prvků z taveného bazaltu. Za normální teploty je tavený čedič vůči agresivním látkám netečný. Bylo ovšem prokázáno, že při zvýšené teplotě dochází ke snížení chemické odolnosti. S výjimkou koncentrované kyseliny sírové, u které nedochází ke změnám, tohoto se není doporučeno používat čedičové odlitky v chemicky agresivním prostředí při zvýšené teplotě. [1]

4.2 Výrobky z taveného čediče

Mezi hlavní typy výrobků taveného čediče patří dlažba, potrubí a kanalizační prvky. Dle způsobu výroby je možné rozlišit staticky lité odlitky do kovových kokil, odstředivě lité trouby a ostatní odlitky lité do pískových forem. [39]

Dlažba. Do kokových kokil je nejčastěji odlévána dlažba. V případě dlaždic nestandardních rozměrů jsou používány pískové formy. Pro svoji tvrdost, odolnost a nulovou nasákavost jsou převážně používány jako podlahy průmyslových objektů a v prostorech s požadavkem na protiskluzovou úpravu povrchu. Pro svou estetickou hodnotu naleznou své využití taktéž v interiérech obytných budov. [39]



Obrázek 9 Čedičová dlažba s rozdílnou úpravou povrchu [40]

Sklovitý charakter materiálu klade zvýšené nároky na pokládku. Pro zlepšení adheze je na rubové ploše dlaždic jemné nebo hrubé drážkování – tzv. rastr se zásypem křemičitého písku. Také je třeba počítat s větší tloušťkou spojovacího lepidla. K ukládání dlažby se doporučuje používat polymercementové malty či epoxidové pryskyřice. [1] [41]



Obrázek 10 Drážkování pro zlepšení adheze – hrubé (vlevo) a jemné (vpravo) [41]

Otěruvzdorné trouby. S výjimkou nejmenších průměrů se vyrábějí odstředivým litím. Takto vyráběné roury mají mnohem jednodušší strukturu a daleko větší pevnost proti přetlaku než trouby lité statickým způsobem. Nedají se použít přímo jako potrubí, fungují jako ochranné vložky, které se zasouvají do ocelových trub. Jsou vhodné k pneumatické dopravě nejrůznějších abrazivních materiálů. Navíc existují speciální odlitky pro potrubní řady (T- a Y- kusy), které se vyrábí statickým litím do pískových forem. [1]

Kanalizační prvky. Další své uplatnění našel tavený čedič v kanalizacích. Stokové žlaby a tvarovky z taveného čediče vynikají vysokou odolností proti abrasivním účinkům suspendovaných a po dně sunutých materiálů. Další nespornou výhodou je vysoká chemická odolnost bazaltu proti agresivnímu působení látek obsažených v odpadních vodách, a navíc odolávají teplotním šokům. Použití těchto prvků několikanásobně zvyšuje životnost kanalizačních stok v porovnání s ostatními materiály a technologiemi. [42]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL

Hlavním cílem diplomové práce je vývoj a ověření vlastností nových lepicích hmot na vhodné silikátové bázi pro ukládání nenasákavých prvků z taveného čediče v náročných expozičních podmínkách na silikátový podklad.

Jedním z cílů diplomové práce je ověření možnosti využití druhotných surovin jako plnivové složky v těchto lepicích hmotách při zachování požadovaných vlastností materiálu, a tím snížit dopad výroby na životní prostředí.

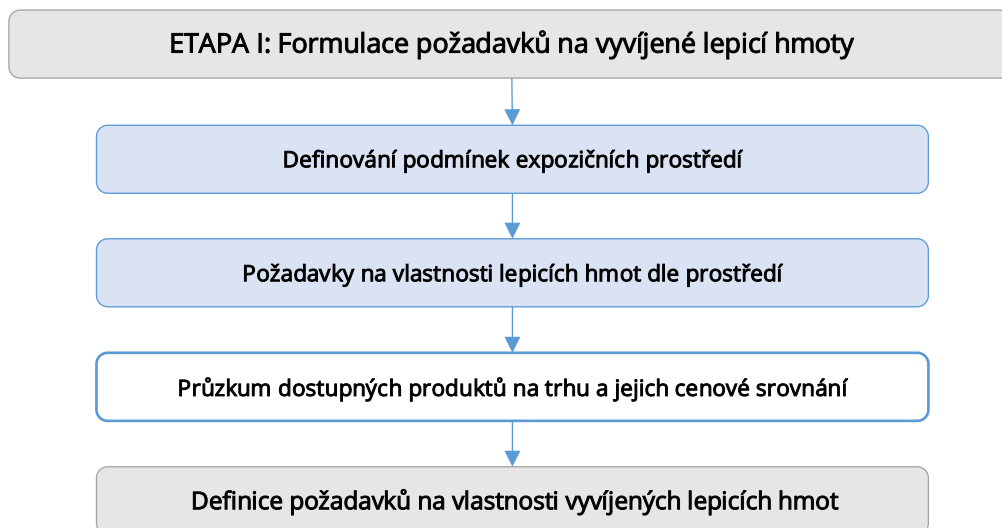
Nové lepicí hmoty budou vyvíjeny ve dvou kvalitativních třídách: ECONOMY a PREMIUM. U varianty PREMIUM bude důraz kladen na finální parametry spojovacích hmot. U hmoty ECONOMY bude zohledňován ekonomický aspekt, tedy cena konečného produktu s důrazem na co nejvyšší obsah druhotných surovin. Hmota PREMIUM bude naopak vykazovat lepší mechanicko-fyzikální vlastnosti a odolnost vůči agresivnímu prostředí s nižším zastoupením druhotných surovin ve směsi.

Vzhledem k tomu, že v náročných podmínkách prostředí uložení čedičových prvků bude lepicí hmota vystavena stejným podmínkám expozice, tak je nutné, aby se svými vlastnostmi těmto prvkům vyvíjená hmota co nejvíce přiblížila.

Konečným cílem práce je ověření jak mechanicko-fyzikálních vlastností nových hmot, tak jejich odolnosti vůči vlivům agresivního prostředí.

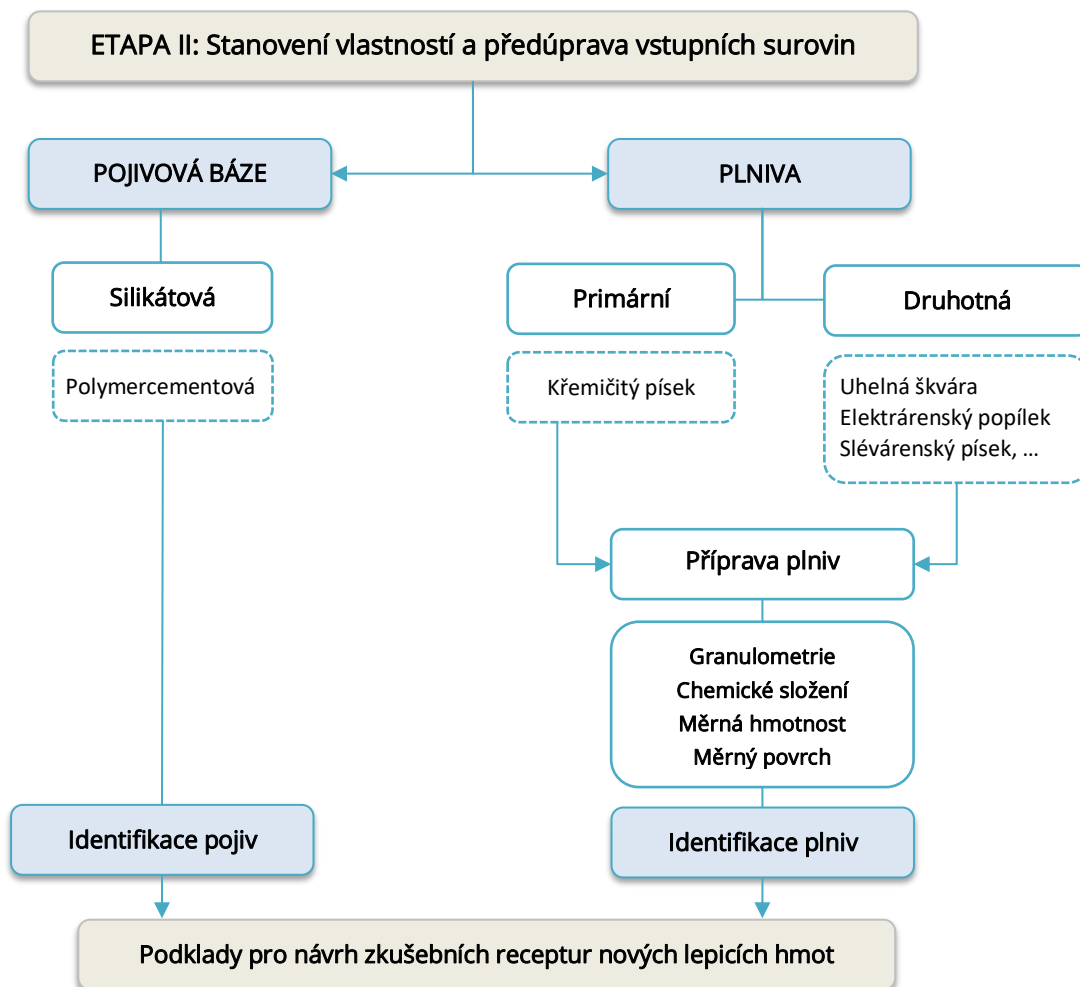
6 METODIKA PRÁCE

6.1 Etapa I: Formulace požadavků na vyvíjené lepicí hmoty



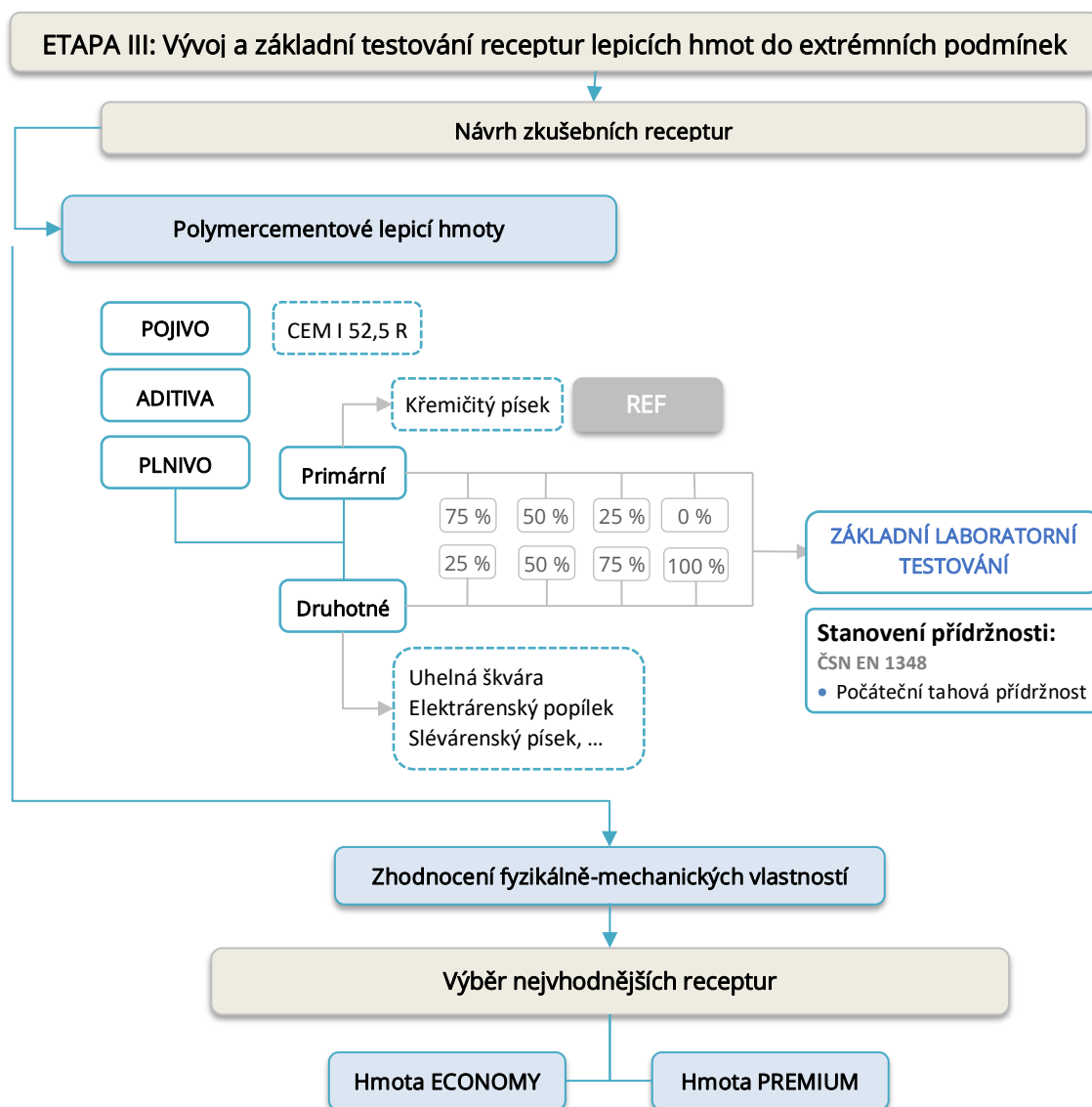
První etapa práce bude zaměřena na definování různých druhů prostředí s extrémním namáháním a vymezení požadovaných kritérií na nově vyvíjené lepicí materiály. Následně bude provedeno zmapování trhu se současně dostupnými produkty splňujícími požadavky specifikované v rámci této etapy a bude provedeno jejich cenové srovnání.

6.2 Etapa II: Stanovení vlastností a předúprava vstupních surovin



Stěžejním úkolem etapy II bude stanovení vlastností a případná předúprava vstupních surovin. Nejdříve bude provedena analýza pojivové báze a primárního plniva. Následně bude pozornost zaměřena na vybrané zástupce alternativních surovin, tedy substituenty používaného primárního plniva. U vybraných plniv bude provedena jejich identifikace. Budou stanoveny jejich vlastnosti, chemické složení a případně provedena úprava granulometrie na požadované frakce.

6.3 Etapa III: Vývoj a základní testování receptur lepicích hmot do extrémních podmínek

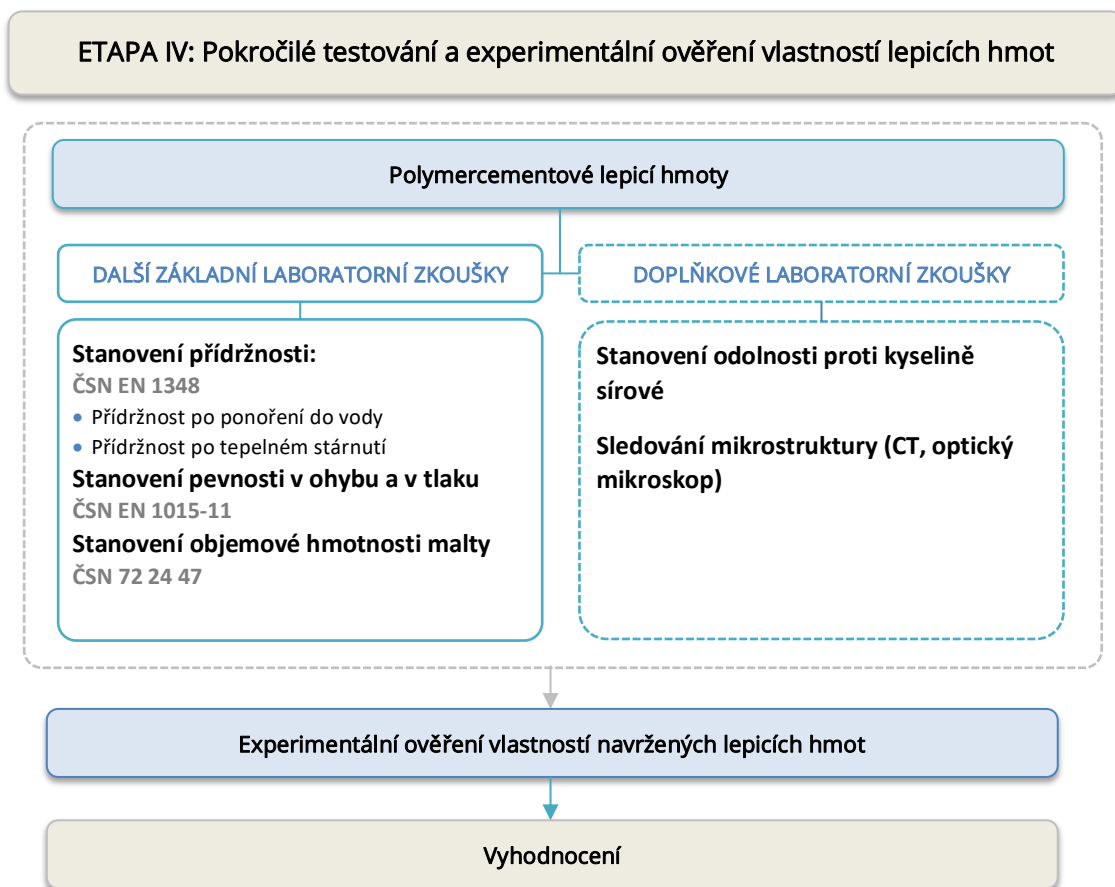


Výstupem třetí etapy bude soubor nejvhodnějších receptur lepicích hmot určených do náročných expozičních podmínek na nejvhodnější bázi ve dvou kvalitativních úrovních ECONOMY a PREMIUM. U varianty ECONOMY bude kladen důraz na výslednou cenu materiálu a co nejvyšší obsah druhotných surovin. Zároveň však u hmoty ECONOMY budou dodrženy požadované vlastnosti a parametry.

Budou navrženy směsi s různými typy plniv a ideálním druhem pojivové báze pro aplikaci na silikátový podklad. U všech vyvíjených lepicích hmot bude jako primární referenční plnivo použit křemičitý písek. V rámci modifikace plnivové složky lepicích hmot se nabízí dvě základní alternativy: částečná substituce primárního plniva či úplná substituce primárního plniva surovinami druhotnými. Navržené receptury budou následně laboratorně testovány,

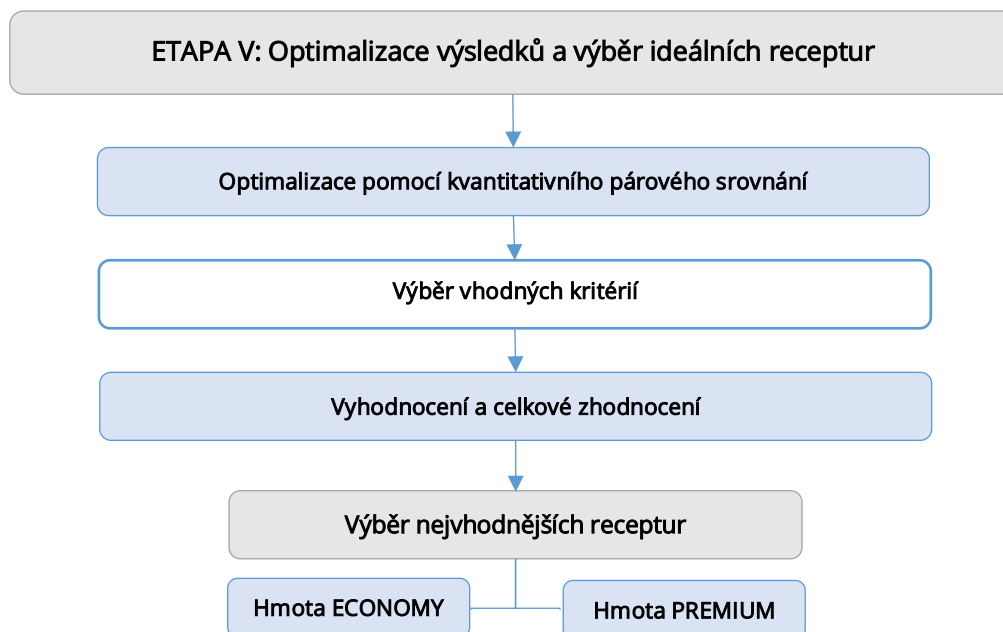
čímž bude ověřena jejich vhodnost. Jednotlivé varianty budou zhodnoceny po fyzikálně-mechanické stránce při využití rozdílných odpadních surovin v recepturách.

6.4 Etapa IV: Pokročilé testování a experimentální ověření vlastností lepicích hmot



Ve čtvrté etapě bude pozornost zaměřena na vytvoření optimální metodiky zkoušení receptur lepicích hmot vybraných v rámci předchozí etapy. Na základě navržené metodiky bude provedeno experimentální ověření vlastností těchto hmot. V první řadě bude provedeno laboratorní testování základních parametrů a následně budou vyvíjené lepicí hmoty podrobeny doplňkovému testování.

6.5 Etapa V: Optimalizace výsledků a výběr nejúspěšnějších receptur



V závěrečné etapě bude provedena optimalizace pomocí kvantitativního párového srovnání hodnot. Budou vybrána vhodná hodnotící kritéria a následně určeny jejich váhy. Díky optimalizačnímu výpočtu budou vybrány konečné varianty hmot ECONOMY a PREMIUM.

7 ETAPA I: Formulace požadavků na vyvíjené lepicí hmoty

Před návrhem lepicí hmoty je třeba specifikovat požadavky na vlastnosti lepicích hmot s ohledem na různé typy náročných podmínek jejich budoucí expozice v souladu s platnými legislativními předpisy a normami.

7.1 Požadavky na vlastnosti lepicích hmot dle prostředí

V předcházející (bakalářské) [1] práci byla provedena rešerše v současné době používaných lepicích hmot odolávajících nepříznivým vlivům okolního prostředí. Čedičové výrobky nachází své uplatnění zejména v kanalizacích a v průmyslových provozech s extrémním zatížením. Bylo zjištěno, že pro lepení nenasákavých prvků, kam se čedičové odlitky řadí, jsou nejvíce vhodná flexibilní cementová lepidla, disperzní lepidla a lepidla na bázi reaktivních pryskyřic. Disperzní lepidla byla v bakalářské práci vyloučena s ohledem na jejich nedostatečnou odolnost. Pro prostředí vyžadující vysokou chemickou rezistenci jsou nejvíce vhodná epoxidová lepidla, která přispívají k lepší adhezi a mají minimální smrštění. Vykazují však špatnou přídržnost k vlhkému podkladu a mají omezenou teplotní odolnost. [1]

Z řady cementových lepidel se používá modifikovaná cementová malta s doplňkovými charakteristikami. Hmoty na této bázi jsou pro pokládku čedičové dlažby a tvarovek nejvhodnější. Zatímco standardní cementová lepidla třídy C1 nelze použít pro slinuté a nesavé povrchy a povrchy vystavené tepelnému namáhání, hmoty třídy C2 mohou být použity pro všechny typy a velikosti obkladů a povrchů. Největší rozdíl mezi těmito třídami je v obsahu redispergovatelného polymerní přísady, který má zásadní vliv na přídržnost lepidla k materiálu. Obsah polymerního prášku u lepidel třídy C1 se orientačně pohybuje do 3 %. U třídy C2 v rozmezí 3–6 %. [12]

Nejsledovanějším parametrem lepicích malt se zlepšenými vlastnostmi je jejich tahová přídržnost: počáteční, po ponoření do vody a po tepelném stárnutí. Dalším požadavkem je snížený skluz.

Shrnutí požadavků na lepidla do náročných podmínek je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 7 Požadavky na vyvíjené lepicí hmoty na silikátové bázi [1]

	KLASIFIKACE	CHARAKTERISTIKA	POŽADAVEK	METODA ZKOUŠENÍ
Zlepšené lepidlo třída 2	C2	Vysoká počáteční tahová přídržnost	≥ 1 MPa	EN 1348, 8.2
		Vysoká tahová přídržnost po ponoření do vody	≥ 1 MPa	EN 1348, 8.3
		Vysoká tahová přídržnost po tepelném stárnutí	≥ 1 MPa	EN 1348, 8.4
		Vysoká tahová přídržnost po cyklech zmrazení-rozmrazení	≥ 1 MPa	EN 1348, 8.5
		Doba zavadnutí: tahová přídržnost	$\geq 0,5$ MPa ne méně než po 20 min	EN 1346
Zvláštní charakteristika	T	Skluz	$\leq 0,5$ mm	EN 1380

V případě reaktivních pryskyřic je sledována smyková přídržnost: počáteční, po ponoření do vody a po tepelném šoku. Stejně jako u cementových lepidel je požadavek na snížený skluz.

Tabulka 8 Požadavky na vyvíjené lepicí hmoty na bázi reaktivních pryskyřic [1]

	KLASIFIKACE	CHARAKTERISTIKA	POŽADAVEK	METODA ZKOUŠENÍ
Zlepšené lepidlo třída 2	R2	Počáteční smyková přídržnost	≥ 2 MPa	EN 12003, 7.3
		Smyková přídržnost po ponoření do vody	≥ 2 MPa	EN 12003, 7.4
		Smyková přídržnost po tepelném šoku	≥ 2 MPa	EN 12003, 7.5
		Doba zavadnutí: tahová přídržnost	$\geq 0,5$ MPa ne méně než po 20 min	EN 1346
Zvláštní charakteristika	T	Skluz	$\leq 0,5$ mm	EN 1308

7.2 Přehled vybraných produktů lepicích hmot dostupných v ČR

Byl vypracován přehledný souhrn dostupných informací o společnostech a produktech na českém trhu patřících do zmíněných kategorií. Pozornost byla upřena především na definici jejich chemické báze. Následující tabulka shrnuje lepidla pro nenasákové prvky do namáhaného prostředí nabízené na českém trhu:

Tabulka 9 Vybrané produkty lepicích hmot do náročných podmínek dostupných v ČR a jejich báze

VÝROBCE	VÝROBEK	BÁZE	KLASIFIKACE
BASF	PCI FT® Klebemörtel	polymercement	C2T
	PCI Collastic®	epoxid	R2T
CERESIT	CM 12 PLUS	polymercement	C2TE
	CM 74 UltraPox Fix	epoxid	R2T
KNAUF	EASYKLEBER – C	polymercement	C2TE
LB CEMIX, s. r. o.	FORTE PLUS	polymercement	C2T
MAPEI, spol. s r. o.	Adesilex P7	polymercement	C2T
	Keraprox Adhesive	epoxid	R2T
	Keralastic T	polyuretan	R2T
MUREXIN, spol. s r. o.	Flex Trass KTF 55	polymercement	C2T
	EKY 91	epoxid	R2T
SAKRET CZ, k. s.	FK extra	polymercement	C2T
	EPK-F	epoxid	R2T
SCHÖNOX, s. r. o.	SCHÖNOX Q2	polymercement	C2TE
	SCHÖNOX KR	epoxid	R2T
Stachema CZ s.r.o.	CHEMA LEP EXTRA C2T	polymercement	C2T
Redrock Construction s.r.o.	Eufix S	polymercement	C2T
	Eufix EP	epoxid	R2T
Saint-Gobain Construction Products CZ a.s.	weberfor fix	polymercement	C2T
	weberpox easy	epoxid	R2T

Poznámka:

- Výrobky dodávané výrobcem prvků z taveného čediče EUTIT s.r.o.
- Výrobky doporučené pro lepení nenasákavých prvků s prodlouženou dobou použitelnosti

Některé z firem nabízí cementová lepidla k ukládání nenasákavých prvků, která splňují požadavky pro náročné aplikace se sníženým skluzem, ovšem navíc mají prodlouženou dobu zavadnutí. Z tabulky je patrné, že největší zastoupení na trhu mají polymercementové malty. Řada firem taktéž nabízí lepidla na epoxidové bázi. Sortiment firmy MAPEI, spol. s r.o. poskytuje zlepšené reakční polyuretanové lepidlo se sníženým skluzem na obkladové prvky s nízkou nasákavostí. Největší problém u nich však představuje jejich aplikace, protože, jak již bylo vysvětleno v teoretické části práce, jsou velice citlivé na vlhkost před vytvrzením. Významnou roli u epoxidových lepidel hraje vlhkost podkladu. Podkladní plocha musí být dostatečně suchá, přičemž maximální povolená vlhkost je 4 %. [4] Z těchto důvodů je aplikace hmot na čistě polymerní bázi problematická v prostředí kanalizace, kde čedičové výrobky nachází jedno ze svých největších využití.

Neméně důležitým faktorem je tixotropní charakter lepidla, který brání stékání z místa nanesení. Cementové malty vykazují lepší tixotropní vlastnosti než lepidla na polymerní bázi a jak již bylo uvedeno v podkapitole 4.2 věnované výrobkům z taveného čediče, při lepení těchto prvků je třeba počítat s větší tloušťkou spojovacího lepidla, z tohoto důvodu je cementové lepidlo vhodnější pro vytvoření vrstvy o dostatečné tloušťce.

Následující tabulka poskytuje přehled cenového srovnání nabízených lepicích materiálů k roku 2018:

Tabulka 10 Cenové srovnání vybraných lepicích hmot do náročných podmínek k roku 2018

VÝROBCE	VÝROBEK	BÁZE	Orientační spotřeba [kg·m ⁻²]	Množství [kg]	Cena za balení bez DPH [Kč]	Cena za MJ [Kč]
BASF	PCI FT® Klebemörtel	polymercement	2,0 - 3,6	25	597	24
	PCI Collastic®	epoxid	1,8 - 4,2	3	1 836	612
CERESIT	CM 12 PLUS	polymercement	2,6	25	290	12
	CM 74 UltraPox Fix	epoxid	2,8	8	1992	249
KNAUF	EASYKLEBER – C	polymercement	2,2	25	288	12
LB CEMIX, s. r. o.	FORTE PLUS	polymercement	3,0 - 4,0	25	305	12
MAPEI, spol. s r.o.	Adesilex P7	polymercement	2,5 - 3	25	230,5	9
	Keraproxy Adhesive	epoxid	1,5	10	2190	219
	Keralastic T	polyuretan	2,5	10	2000	200
MUREXIN, spol. s r. o.	Flex Trass KTF 55	polymercement	3,0	25	607,5	24
	EKY 91	epoxid	2,9	6	2004	334
SAKRET CZ, k. s.	FK extra	polymercement	2,4 - 4,4	25	344	14
	EPK-F	epoxid	1,6-3,8	5	1520	304
SCHÖNOX, s. r. o.	SCHÖNOX Q2	polymercement	2,4 - 3,4	25	362,5	15
	SCHÖNOX KR	epoxid	3,2 - 3,8	5	1 565	313
Stachema CZ s.r.o.	CHEMA LEP EXTRA	polymercement	3,1	25	275	11
Redrock Construction s.r.o.	Eufix S	polymercement	4,2	25	562,5	23
	Eufix EP	epoxid	1,65	30	3600	120
Saint-Gobain Construction Products CZ a.s.	weberfor fix	polymercement	4,0	25	300	12
	weberpox easy	epoxid	4,0	4,5	1210,5	269

Poznámka:

- Výrobky dodávané výrobcem prvků z taveného čediče EUTIT s.r.o.
- Výrobky doporučené pro lepení nenasákavých prvků s prodlouženou dobou použitelnosti

Je patrné, že cena lepidel na bázi reaktivních pryskyřic výrazně převyšuje cenu cementových lepidel. Při srovnání produktů firmy Redrock Construction s.r.o., které jsou doporučovány k lepení čedičových odlitků výrobcem EUTIT s.r.o., činí cena epoxidového lepidla (120 Kč za 1 kg) více než pětinasobek ceny lepidla na cementové bázi (23 Kč za 1 kg). Průměrná cena pro polymercementové hmoty je 16 Kč za 1 kg.

7.3 Vyhodnocení etapy I

Cílem této etapy bylo specifikování požadavků na vlastnosti vyvíjených lepidel v souladu s platnou normou ČSN EN 12004+A1 *Lepidla pro obkladové prvky – Požadavky, posuzování shody, klasifikace a označování* [11]. Definování požadavků bylo nezbytným krokem pro správný vývoj lepicí hmoty a pro stanovení srovnávacích parametrů.

Vzhledem k vlhkosti prostředí, ceně materiálu a požadovaným tixotropním vlastnostem hmot, budou v dalších etapách této práce uvažovány lepicí hmoty na silikátové bázi, u nichž bude vzhledem k jejich budoucí aplikaci sledována především počáteční přídržnost a přídržnost k adherendu v různém prostředí, tedy po ponoření do vody a po tepelném stárnutí. Ve všech případech bude nutné dosažení minimálně 1 MPa přídržnosti. Nebude požadována prodloužená doba zavadnutí.

8 ETAPA II: Stanovení vlastností a předúprava vstupních surovin

Při jejich návrhu receptury je důležité věnovat pozornost nejen konečnému produktu, ale i každé složce separátně, jelikož negativní vlastnost jediné složky může představovat hrozbu pro celkovou odolnost systému. Druhá etapa této práce je věnována volbě a popisu vstupních surovin, které budou dále použity v rámci experimentální části. Pozornost je zaměřena na jejich chemické složení, granulometrii, fyzikálně mechanické vlastnosti a případný způsob předúpravy.

8.1 Primární suroviny

8.1.1 Cement

Na základě poznatků zjištěných v předchozí etapě a rešerše zpracované v teoretické části bude jakožto pojivo použit portlandský cement s označením CEM I 52,5 R pocházející ze závodu Mokrý společnosti HeidelbergCement Group.

Tabulka 11 Chemické složení CEM I 52,5 R Mokrý [43]

Složka	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O	ZŽ
Obsah [%]	63,6	20,3	4,8	3,3	1,4	3,1	0,041	0,76	0,20	1,6

Pro tento cement je charakteristický rychlý nárůst pevností, vysokou počáteční i konečnou pevností a velmi rychlým vývinem hydratačního tepla a je vhodný pro použití ve všech prostředích podle stupňů vlivu prostředí. [43]

Tabulka 12 Fyzikální a mechanické vlastnosti [43]

Parametr		Průměrná metoda	Metoda
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	25	EN 196-1
	2 dny	38	
	7 dní	57	
	28 dní	64	
	56 dní	68	
	90 dní	69	
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	6	EN 196-1
	2 dny	7	
	7 dní	8	
	28 dní	9	
	56 dní	9	
	90 dní	9	

Parametr	Průměrná metoda	Metoda
Normální konzistence [%]	30,5	EN 196-3
Počátek tuhnutí [min]	140	
Konec tuhnutí [min]	187	EN 196-3
Objemová stálost [mm]	1,2	EN 196-3, La Chatelier
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	515	EN 196-6, Blaine

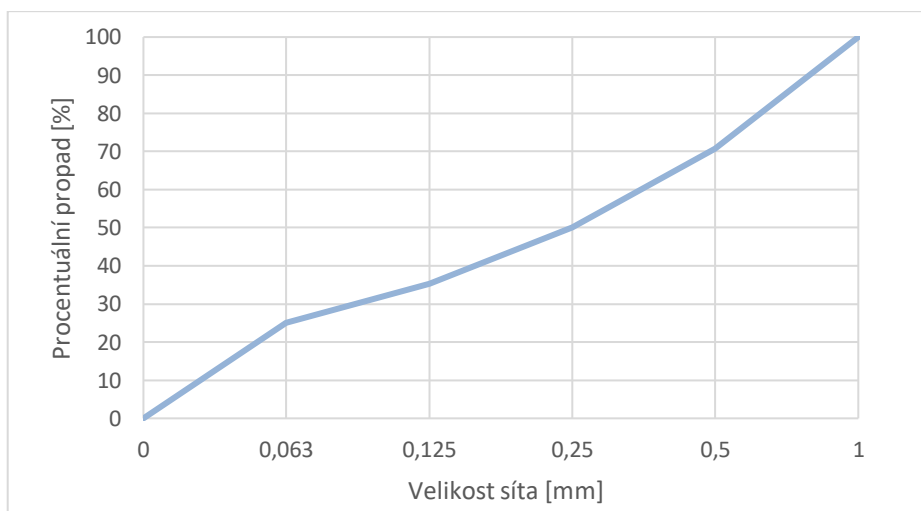
8.1.2 Normalizovaný písek

Pro výrobu referenční lepicí malty je zvolen normalizovaný písek CEN třech různých frakcí. Jedná se o přírodní křemičitý písek skládající se ze zaoblených částic, a jehož obsah křemenných zrn je nejméně 98 %. Tento písek je nutné přesít na maximální velikost zrna 1 mm, aby se navrhovaná směs co nejvíce přiblížila komerčním produktům.

Důležitým faktorem při návrhu složení plniv je křivka zrnitosti, která zajišťuje optimální zastoupení frakcí. V našem případě bude zvolen model dle Fullera:

$$P = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^{0,5} \cdot 100 [\%]$$

kde P udává propad sítem o velikosti otvoru d a $D_{\max}$ představuje velikost maximálního zrna.



Graf 1 Křivky zrnitosti dle Fullera pro $D_{\max} = 1$ mm

8.2 Druhotné suroviny – plniva

S cílem dosažení požadovaných vlastností výsledné hmoty bylo třeba vytipovat vhodné vstupní substituenty používaného primárního plniva, v našem případě výše zmíněného křemičitého písku. Plnivo představuje procentuálně nejvíce zastoupenou část v maltě, z tohoto důvodu je při jeho výběru potřeba postupovat velmi pečlivě.

Nabízí se široká škála druhotných surovin (brusné a řezné kaly, slévárenský písek, popílek, kamenný odprach, odpad z praní drceného vápence, skelný recyklát, škvára), avšak ne

všechny jsou vhodné pro použití do navrhovaných lepicích hmot, je tedy nutno provést vhodný výběr. Tento výběr probíhá pomocí optimalizačního výpočtu a řídí se vybranými kritérii s důrazem na nutnost předúpravy plniva. Byla brána v úvahu taktéž jejich cena, dostupnost, chemická inertnost a granulometrie a vliv plniva na zpracovatelnost malty.

Popis všech uvažovaných plniv a jejich obecné vlastnosti byly uvedeny v teoretické části v podkapitole 2.2 *Plniva lepicích hmot*.

Významným nedostatkem mnohých druhotných surovin je již zmíněná jejich nutnost předúpravy. Tyto úpravy však představují finanční zátěž a může se odrazit na konečné ceně produktu, přičemž může převýšit náklady na suroviny primární. Použití surovin druhotných by se v tom případě nevyplatilo.

Často je před použitím pro výrobu stavebních materiálů nutné upravit granulometrii a složení druhotných surovin. Vzhledem k tomu, že si tato práce klade za cíl najít ekonomicky nejvýhodnější a nejjednodušší alternativu, nebude křivka zrnitosti vybraných plniv žádným způsobem upravována. Nezbytné je však zachování maximálního zrna do 1 mm stejně jako u referenčního křemičitého plniva.

Neméně důležité je odstranění vlhkosti, z tohoto důvodu musí být všechny suroviny, které to vyžadují, vysušeny do konstantní hmotnosti. Příkladem jsou brusné a řezné kaly či odpad z drceného vápence. Odpad z praní drceného vápence je navíc pro naše účely nevyhovující, jelikož vápenec vykazuje nízkou chemickou odolnost.

Pro některá druhotná plniva je navíc charakteristické měnící se složení a kolísavé vlastnosti, při výběru je tedy nutno dbát i na tento faktor. Příkladem může být škvára, jejíž kvalita závisí na celé řadě faktorů, na které je nutno brát zřetel. Jedná se zejména o stáří a uložení škváry, s kterým souvisí její možné nadměrné znečištění organickou složkou, což vede k jejímu znehodnocení a omezení možnosti využití této suroviny jakožto plniva. I přes výše zmíněná rizika však může škvára přispívat ke zvýšení odolnosti vůči nepříznivým okolním vlivům.

Pro aplikace, kde je vyžadována chemická odolnost, je vhodné použití materiálů jako je popílek či sklený recyklát. V návaznosti na bakalářskou práci [1] byl skelný recyklát označen jako nevyhovující plnivo do lepicích hmot, jelikož lepidla s jeho obsahem vykazovaly nízké hodnoty počáteční přídržnosti. Sklený recyklát taktéž není možné použít bez úpravy zrnitosti (velikost zrna musí být pod 63 μm za účelem zamezení alkalicko-silikátové reakce, resp. u velmi jemných částic dochází k alkalicko-silikátové reakci stejně jako u hrubších zrn, tlak při bobtnání zůstává ale vlivem menší velikosti zrn tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin). [44] Naproti tomu popílek se jeví jako potenciálně vhodná surovina, jelikož nevyžaduje žádnou předúpravu a pozitivně přispívá ke zvýšení trvanlivosti materiálu. Nevýhodou použití popílků však představuje zastoupení pouze jemných frakcí do velikosti zrn maximálně 250 μm .

U zvolených plniv byla provedena jejich identifikace. Sledovány byly údaje o jejich chemickém složení.

8.2.1 Škvára – Mělník

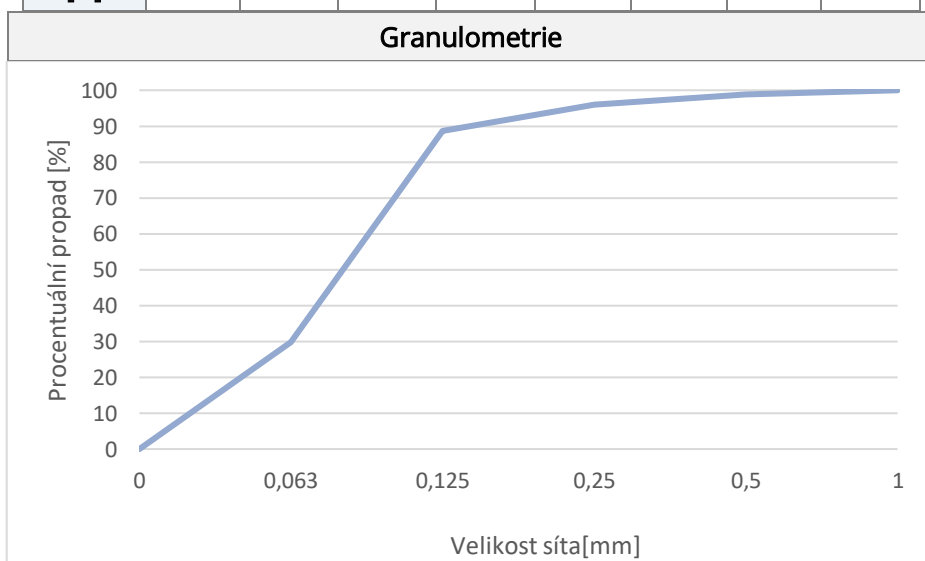
Tabulka 13 Škvára – údaje

Producent
Elektrárna Mělník
Fotodokumentace



Základní charakteristiky		
Sypná hmotnost volně sypaná	[kg·m ⁻³]	590
Sypná hmotnost setřesená	[kg·m ⁻³]	780
Měrná hmotnost	[kg·m ⁻³]	1800
Měrný povrch	[cm ² ·g ⁻¹]	350

Chemické složení								
Složka	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄ ²⁻	K ₂ O	Na ₂ O
Obsah [%]	1,77	45,20	28,20	8,04	1,07	0,14	1,25	0,272



8.2.2 Slévárenský písek

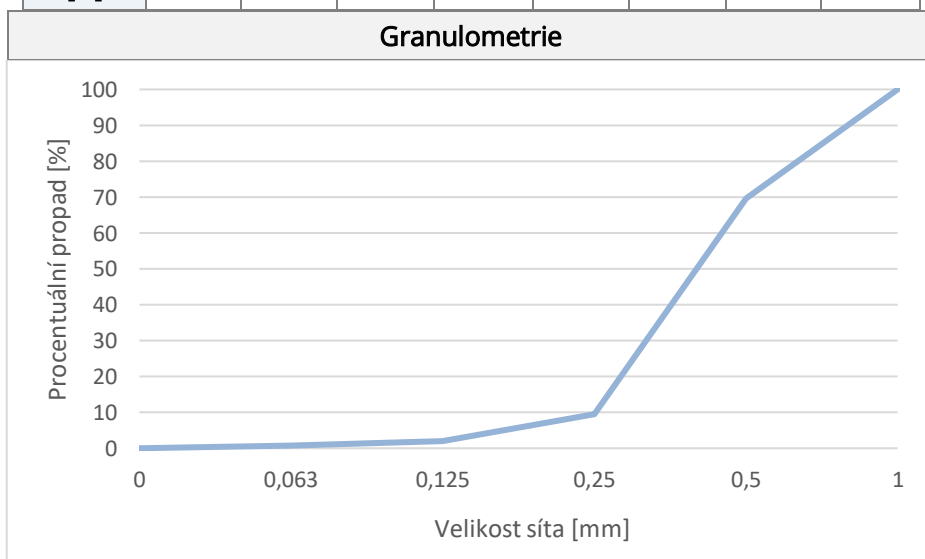
Tabulka 14 Slévárenský písek – údaje

Producent
ArcelorMittal Engineering Products Ostrava, s.r.o.
Fotodokumentace



Základní charakteristiky		
Sypná hmotnost volně sypaná	[kg·m ⁻³]	1130
Sypná hmotnost setřesená	[kg·m ⁻³]	1490
Měrná hmotnost	[kg·m ⁻³]	2860
Měrný povrch	[cm ² ·g ⁻¹]	3000

Chemické složení								
Složka	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄ ²⁻	K ₂ O	Na ₂ O
Obsah [%]	0,3	82,7	1,51	2,63	0,53	0,1	0,45	0,23



8.2.3 Popílek – Tušimice

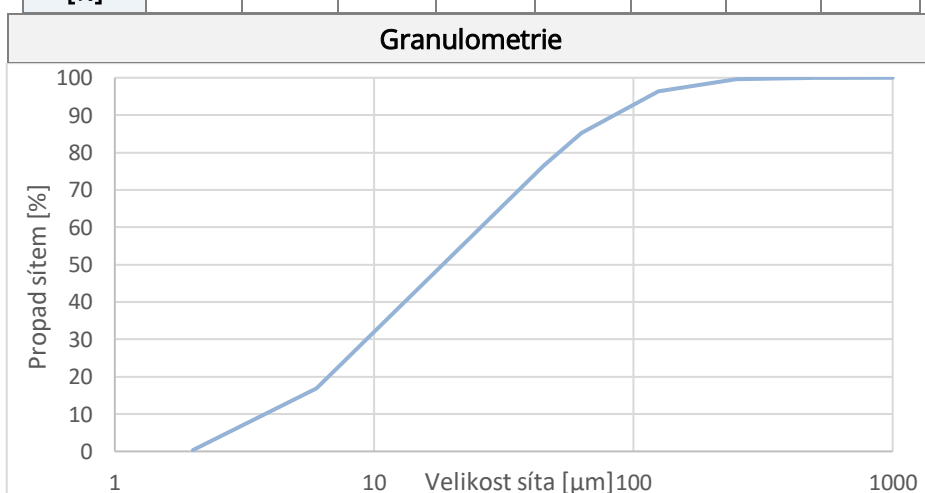
Tabulka 15 Popílek Tušimice – údaje

Producent
Elektrárna Tušimice
Fotodokumentace



Základní charakteristiky		
Sypná hmotnost volně sypaná	[kg·m ⁻³]	730
Sypná hmotnost setřesená	[kg·m ⁻³]	840
Měrná hmotnost	[kg·m ⁻³]	2407
Měrný povrch	[m ² ·kg ⁻¹]	262

Chemické složení								
Složka	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Obsah [%]	3,7	48,3	22,8	16,6	1,73	0,5	1,16	0,45



8.3 Vyhodnocení etapy II

Na základě vybraných technologických, ekologických a ekonomických kritérií byl v této etapě proveden výběr tří rozdílných druhotných surovin, které mohou sloužit jako částečná náhrada plnivové složky nových lepicích malt při současném zachování dostatečné trvanlivosti. Jako potenciálně vhodné suroviny byly vyhodnoceny slévárenský písek ArcelorMittal, škvára z Mělníku a popílek z Tušimic.

Výběrovým kritériím nejvíce vyhovoval slévárenský písek, a to především díky jeho zrnitosti, která se nejvíce přibližuje primárnímu plnivu. Další jeho nespornou výhodou představuje minimální potřeba úpravy před jeho použitím do stavebních hmot. Ze stejného důvodu byl vybrán i popílek, u kterého však nejsou zastoupeny hrubší frakce, ale jeho přítomností se očekává pozitivní vliv na trvanlivost lepicích hmot. Jako poslední daným kritériím vyhovovala škvára.

Na závěr etapy byly tyto suroviny podrobeny identifikaci jejich nejdůležitějších vlastností jako je chemické složení, zrnitost a vybrané materiálové vlastnosti.

9 ETAPA III: Vývoj a základní testování receptur lepicích hmot do extrémních podmínek

Náplní třetí etapy bude základní testování souboru nejvhodnějších receptur s důrazem na určení množství možné substituce primárního plniva zástupci druhotných surovin.

9.1 Návrh receptury

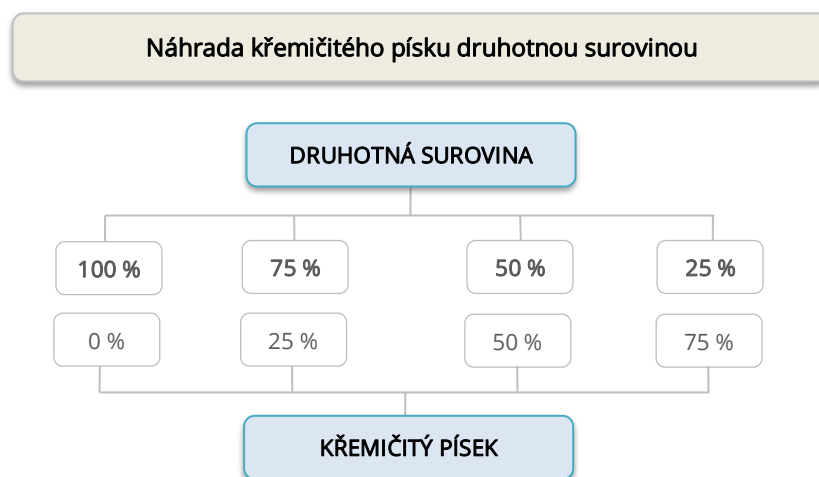
Materiálové složení nových lepicích hmot vycházelo z receptury společnosti Redrock Construction s.r.o., přičemž byla modifikována plnivová složka. Procentuální zastoupení jednotlivých složek lepicí hmoty na silikátové bázi udává **tabulka 16**.

Tabulka 16 Základní materiálové složení lepicí hmoty na silikátové bázi

RECEPTURA	
Složka	Obsah [%]
CEM I 52,5 R	35,1
Pří sada A - (Směsná chemie)	6,4
Polypropylenová vlákna	0,1
Plnivo	58,4
Konzistence	Pasta

Pro lepicích hmot byl použit portlandský cement CEM I 52,5 R. Firmou Redrock Construction s.r.o. byla dodána směsná chemie složená z urychlovače tuhnutí cementu, odpěňující přísady, plastifikační přísady za účelem zlepšení zpracovatelnosti a snížení množství záměsové vody, a zejména redispergovatelného polymerního prášku na styren-akrylátové bázi. Dávka polymerního prášku se pohybuje okolo 1 % z celkové suché směsi. Pro zamezení vzniku a rozvoje smršťovacích trhlin, které by měly negativní dopad zejména na trvanlivost materiálu, bylo přidáno malé množství polypropylenových vláken.

Jak již bylo zmíněno v druhé etapě, jakožto výchozí plnivo byl použit normalizovaný křemenný písek CEN s maximální velikostí zrna do 1 mm. Po volbě vhodných vstupních surovin byly stanoveny mísící poměry. Cílem bylo nalézt optimální množství druhotného plniva tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Pro primární testování bylo zvoleno množství náhrady křemičitého písku druhotným dle následujícího schématu:



Obrázek 11 Substitute primárního plniva druhotnou surovinou

V prvním případě byla provedena úplná, tedy 100% náhrada křemičitého písku vybraným druhotným plnivem (slévárenským pískem, škvárou z Mělníka a popílkem z Tušimic), přičemž následně došlo k postupnému snižování množství náhrady druhotné plnivé složky po 25 %. Celkově bylo navrženo 12 receptur určených pro základní testování, které se lišily množstvím a typem druhotného plniva. Jednotlivé receptury jsou označeny následovně:

Tabulka 17 Procentuální náhrada primárního plniva druhotným a označení receptur

Plnivo	Náhrada druhotného plniva	Označení receptury
Křemičitý písek	-	REF
Škvára	100%	ŠKV-100
	75%	ŠKV-75
	50%	ŠKV-50
	25%	ŠKV-25
Slévárenský písek	100%	SLP-100
	75%	SLP-75
	50%	SLP-50
	25%	SLP-25
Popílek	100%	POP-100
	75%	POP-75
	50%	POP-50
	25%	POP-25

9.2 Základní laboratorní testování

Základní laboratorní testování je klíčové pro určení základních a nejvýznamnějších vlastností typických pro lepicí malty. Výsledky těchto zkoušek musí splňovat požadavky, které jsou

dány podmínkami budoucího místa aplikace. V případě lepicích hmot pro instalaci čedičových prvků s nulovou nasákavostí do náročných podmínek je klíčová počáteční přídržnost. V případě hmot PREMIUM bude požadováno splnění limitní hodnoty 1 MPa a u hmot ECONOMY je stanovena mezní hodnota minimálně na 0,5 MPa.

9.2.1 Příprava zkušebních těles

Veškeré složky byly nejdříve smíchány v suchém stavu. Poté byla postupně přidávána voda, aby bylo dosaženo obdobné konzistence ve všech případech, tedy aby všechny lepicí hmoty vykazovaly lepivou konzistenci.

U směsí s nižším procentem náhrady referenčního plniva škvárou či popílkem byla pozorována dobrá přilnavost k nanášenému povrchu. Se zvyšujícím se množstvím škváry však docházelo k trhání malty. Spotřeba vody nutná k dosažení obdobné konzistence však byla vyšší než u hmot s křemičitým pískem. To lze vysvětlit porozitou částic škváry, které absorbují vodu. Podobně tomu tak bylo i v případě směsí s vyšším zastoupením popílku, u kterých bylo nutné přidat až dvojnásobnou dávku vody oproti referenční směsi, což se dá opět vysvětlit vysokou nasákavostí, která je pro popílky charakteristická. Všechny receptury s obsahem slévárenského písku vykazovaly stejné vlastnosti jako referenční směs.

9.2.2 Stanovení počáteční tahové přídržnosti

Postup pro stanovení počáteční tahové přídržnosti byl modifikován, přičemž se vycházelo ze zkušebního postupu uvedeného v normě ČSN EN 1348 *Maltoviny a lepidla pro keramické obkladové prvky – Stanovení přídržnosti cementových maltovin tahovou zkouškou*. [45]

Na očištěný povrch čedičového dlaždice byla aplikována vrstva malty v tloušťce od 5 do 40 mm. Vzhledem ke křehkosti materiálu bylo nemožné proříznout podklad, jak je zvykem u betonových desek, tudíž bylo třeba již v čerstvém stavu vytvarovat kruhovou plochu o průměru 50 mm.



Obrázek 12 Nanesená vrstva malty na čedičovou dlaždici pro stanovení přídržnosti k podkladu

Následně jsou pomocí speciálního dvoukomponentního lepidla Sikadur na epoxidové bázi přilepeny zkušební terče.



Obrázek 13 Nalepené terče k vrstvě malty před stanovením počáteční přídržnosti k podkladu

Po 24 hodinách uložení ve standardním prostředí je stanovena tahová přídržnost lepicí hmoty pomocí odtrhoměrného zařízení. Přídržnost R_{fu} v [MPa] se poté vyjádří jako podíl vyvozeného zatížení v N a zkoušené plochy A.

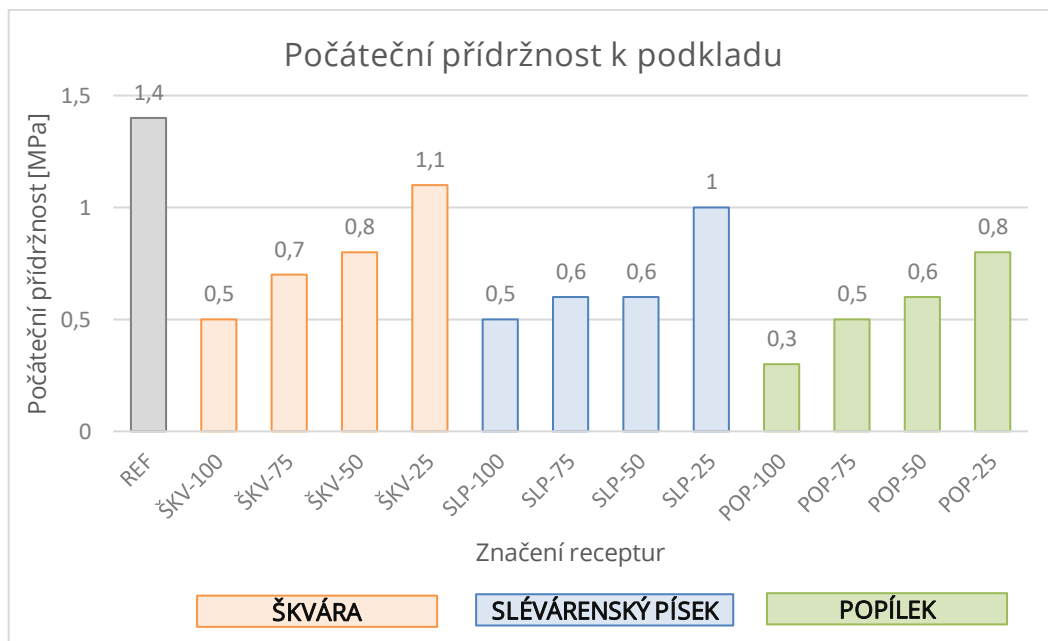
Při zkoušce může dojít k odlišným způsobům porušení. Mohou nastat tyto případy:

Tabulka 18 Možné typy porušení při stanovení přídržnosti

Typ porušení	Popis
porušení v lepidle	hodnota přídržnosti je vyšší než dosažený výsledek zkoušky, v případě nízkých hodnot se do výpočtu neuvažuje.
porušení ve vrstvě malty	hodnota přídržnosti je vyšší než dosažená hodnota, přídržnost je vyšší než pevnost v tahu malty
porušení ve spoji podklad/malta	udává přídržnost malty k podkladu
porušení v podkladu	hodnota přídržnosti je vyšší než dosažená hodnota, porušení je způsobeno nekvalitním podkladem nebo vyšší přídržností, než je pevnost v tahu podkladu

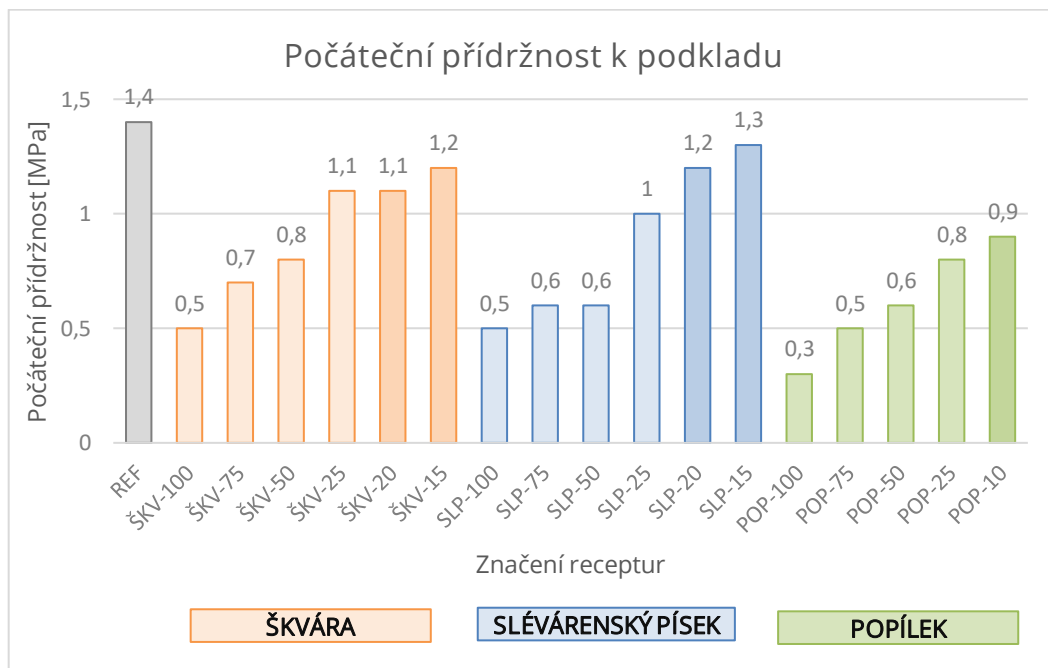
9.2.3 Vyhodnocení

Vzhledem k získaným poznatkům a naměřeným hodnotám počáteční přídržnosti k adherendu je možné stanovení konečné procentuální náhrada primárního plniva od každé uvažované druhotné suroviny.



Graf 2 Počáteční přídržnost k podkladu

Na grafickém znázornění (**graf 2**) lze pozorovat rostoucí trend počáteční přídržnosti k podkladu v závislosti na klesajícím procentuálním zastoupením druhotné suroviny. Vzhledem k této tendenci byly navrženy k doplňujícímu testování další receptury. V případě slévárenského písku a škváry byla provedena náhrada výchozího plniva z 20 a 15 %. U popílku byla vzhledem k nevyhovujícím výsledkům zvolena pouze 10% náhrada primárního plniva. Celkové výsledné hodnoty doplněné o další zkušební receptury ilustruje následující graf:



Graf 3 Souhrnné výsledné hodnoty počáteční přídržnost k podkladu

S ohledem na nejvyšší procentuální zastoupení druhotného plniva se pro další testování jako nejvhodnější receptury jeví hmoty se 100% náhradou křemičitého písku za škváru, 75 % náhradou za slévárenský písek a 50% náhradou za popílek. Tyto hmoty splnily snížený požadavek 0,5 MPa a budou nadále označovány jako hmoty ECONOMY, u kterých je kladen důraz na co nejvyšší možnou náhradu primárního plniva.

Dále bylo vyhodnoceno, že je možné použití malt s 25%, 20% a 15% obsahem slévárenského písku a škváry, jelikož tyto malty dosáhly po 24 hodinách přídržnosti 1 MPa nebo i více. Výsledné hodnoty rovněž ukázaly, že i nízká náhrada křemičitého písku popílkem má výrazný vliv na snížení přídržnosti k nesavému čedičovému prvku, z toho důvodu se jeví použití popílku jako nevhodné. Naproti tomu je při jeho použití očekáváno zvýšení trvanlivosti hmot, z tohoto důvodu budou receptury s 50% a 10% obsahem popílku dále podrobeny zkouškám v další etapě.

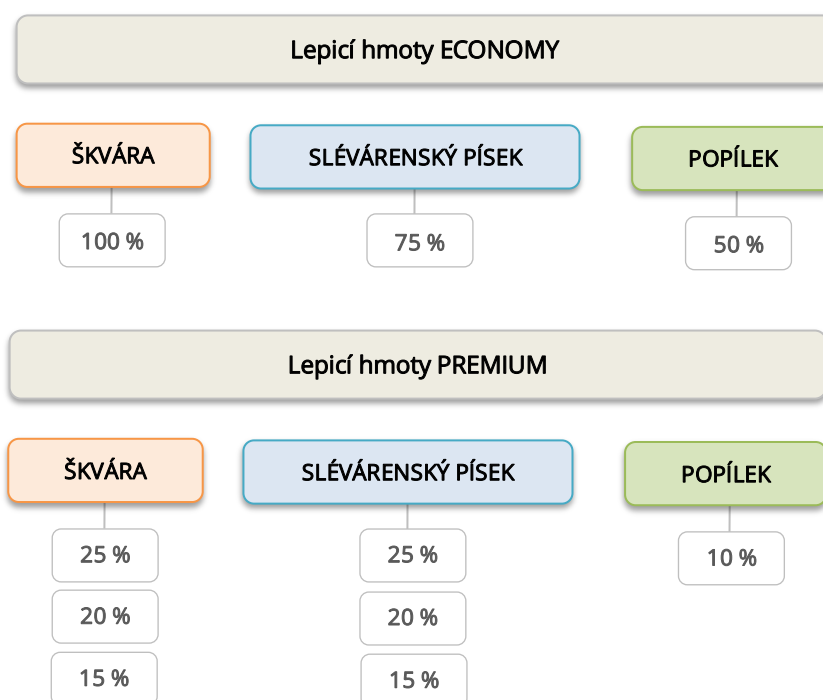
9.3 Vyhodnocení etapy III

Ve třetí etapě byly ze surovin vybraných v etapách předešlých sestaveny receptury, přičemž všechny se shodovaly v použitém druhu pojiva, chemické přísady a dávkou polypropylenových vláken. Plnivová složka tvořena normalizovaným křemičitým pískem byla postupně nahrazována v procentuálním zastoupení 25, 50, 75 a 100 % zástupci druhotných surovin zvolenými v předešlé etapě. Cílem této etapy bylo pomocí vhodných zkoušek stanovení maximální možné náhrady plnivové složky v jednotlivých recepturách. Stěžejním rozhodujícím parametrem bylo stanovení počáteční přídržnosti k čedičovému prvku.

Receptury lze rozdělit do dvou kvalitativních úrovní na receptury ECONOMY a PREMIUM, přičemž v případě hmot PREMIUM bylo požadováno dosažení hodnoty 1 MPa, v případě hmot ECONOMY byl tento požadavek snížen na hodnotu 0,5 MPa.

Na základě výsledků a zjištění z testování polymercementových malt modifikovaného složení bylo nutné provést dodatečnou úpravu složení. Vzhledem k rostoucímu trendu počáteční přídržnosti k podkladu v závislosti na klesajícím procentuálním zastoupením druhotné suroviny, byly v případě slévárenského písku a škváry dodatečně navrženy další receptury. První receptura počítá se 20% náhradou výchozího plniva za škváru či slévárenský písek, přičemž druhá pouze s náhradou 15 %. U lepicích hmot s obsahem popílku snížen obsah substituční složky na 10 %, jelikož při vyšší dávce docházelo ke značnému ovlivnění sledovaného parametru.

Následující schéma ilustruje konečné procentuální zastoupení druhotných surovin v jednotlivých recepturách vybraných v rámci této etapy:



Obrázek 14 Stanovený obsah druhotných surovin v jednotlivých recepturách pro pokročilé testování

Výstupem této etapy představovalo stanovení maximální možné substituce výchozí plnivové složky. Na základě tohoto zjištění byly navrženy receptury, které se jeví jako potenciálně vhodné pro další vývoj nových lepicích hmot určených do náročných podmínek a které budou podrobeny důkladnějšímu testování.

10 ETAPA IV: Pokročilé testování a ověření vlastností lepicích hmot

Následující etapa byla věnována pokročilému experimentálnímu ověření vlastností vybraných lepicích malt určených do náročných podmínek. Návrh expozičních podmínek byl zvolen s ohledem na reálné působení nepříznivých vlivů působících při obvyklé expozici čedičových prvků v kanalizacích.

10.1 Příprava zkušebních těles

V rámci experimentálních prací bylo sestaveno 10 receptur, které jsou uvedeny v následující tabulce včetně receptury referenční s normalizovaným křemičitým pískem použitým jakožto plnivo. Procentuální zastoupení druhotného plniva vychází ze základního laboratorního testování provedeného v rámci předchozí etapy:

Tabulka 19 Procentuální náhrada primárního plniva druhotným a označení receptur

Plnivo	Náhrada druhotného plniva	Označení receptury
Křemičitý písek	-	REF
Škvára	15%	ŠKV-15
	20%	ŠKV-20
	25%	ŠKV-25
	100%	ŠKV-100
Slévárenský písek	15%	SLP-15
	20%	SLP-20
	25%	SLP-25
	75%	SLP-75
Popílek	10%	POP-10
	50%	POP-50

Veškeré směsi byly míchány v laboratorních podmínkách. Při míchání jednotlivých komponent byly nejdříve smíchány všechny suché složky. Voda byla přidávána postupně pro dosažení obdobné konzistence jako u referenční směsi.

Každá takto připravená směs byla naplněna do ocelové trojformy (20×20×100 mm) za účelem výroby zkušebních těles pro zkoušky mechanických vlastností a stanovení chemické odolnosti. Zhutnění zkušebních těles probíhalo na vibračním stole. Po vizuální kontrole hmota vykazovala hutnou strukturu bez pozorovatelné segregace plniva. Všechna zkušební tělesa byla odformována po uplynutí 24 hodin od namíchání a následně uložena na 28 dní do vody. V případě přípravy zkušebních vzorků určených pro zkoušení tahové přídržnosti k podkladu se postupovalo stejným způsobem, jak je uvedeno v předchozí etapě v podkapitole 9.2.1.

10.2 Popis prováděných zkoušek

10.2.1 Stanovení tahové přídržnosti cementových lepidel

Kromě počáteční tahové přídržnosti je rovněž neméně důležité sledovat tuto materiálovou vlastnost v různém prostředí. U lepicích hmot bude tedy stanovena přídržnost po ponoření do vody, po tepelném stárnutí a po 28 dnech zrání v laboratorních podmínkách. Zkušební postup je obdobný jako v případě počáteční přídržnosti, ovšem liší se v době a způsobu ošetření zkušebních těles. Jedná se o alternativní zkoušky vycházející z normy ČSN EN 12004-2. [46]

Přídržnost po ponoření do vody. Zkušební tělesa se kondicionují za standardních podmínek po dobu 7 dní, potom se ponoří do vody při standardní teplotě. Po 20 dnech jsou tělesa z vody vyjmuta, vysušena a následně jsou na vrstvu malty přilepeny zkušební terče. Následující den je stanovena tahová přídržnost podle 9.2.2.

Přídržnost po tepelném stárnutí. Zkušební tělesa se kondicionují za standardních podmínek po dobu 14 dní, poté se vloží do sušárny s cirkulací vzduchu vyhřáté na 70 ± 3 °C na 14 dní. Po vyjmutí ze sušárny jsou k vrstvě malty přilepeny zkušební terče. Po 24 hodinách v laboratorních podmínkách je stanovena tahová přídržnost postupem podle 9.2.2.

Přídržnost po 28 dnech ve standardních podmínkách. Zkušební tělesa jsou po dobu 27 dní uložena v laboratorních podmínkách ve standardním prostředí. Následně se na vrstvu malty přilepí zkušební terče a po 24 hodinách je stanovena tahová přídržnost dle 9.2.2.

10.2.2 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty proběhlo v souladu s normou ČSN EN 1015-10. [47] Objemová hmotnost p správkové malty se stanovuje na zkušebních tělesech po jejich uložení ve standardních laboratorních podmínkách a po působení agresivního prostředí. Stanovení proběhlo na třech zkušebních tělesech, která se jsou zvážena a změřena. Vypočte se objemová hmotnost ρ , která se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 :

10.2.3 Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku

V případě pevnostních zkoušek se vycházelo z postupu dle normy ČSN EN 1015-11. [48] Nejdříve jsou očištěny tlačné desky, následuje středové uložení zkušebního tělesa kolmo na střed hutnění s přesností ± 1 %. Samotné zatěžování probíhá rychlostí $0,04\text{--}0,06 \text{ MPa/s}$ až do porušení zkušebního tělesa. Po stanovení pevnosti v tahu za ohybu se úlomky zkušebních těel použijí pro stanovení pevnosti v tlaku.

10.2.4 Stanovení chemické odolnosti

Pro simulaci reálných podmínek expozice a průniku agresivních médií do lepicích hmot byla navržena a aplikována speciální metodika. Jedná se o modifikovanou zkoušku chemické odolnosti. [49] Podstata zkoušky spočívá ve sledování vlivu zvoleného agresivního prostředí na ošetřená zkušební tělesa.

Podobně jako na pevnostní zkoušky, byla připravena zkušební tělesa o rozměrech 20x20x100 mm. Od každé receptury jsou vyrobeny dvě trojice trámčů. Takto připravené zkušební vzorky se ponechají po dobu 28 dní zrát v laboratorních podmínkách. Polovina vzorků je po uplynutí této doby uložena do roztoku zvolených chemikálií, v našem případě byl pro simulaci reálných podmínek expozice zvolen 3% roztok kyseliny sírové, po dobu 21 dní. Vzorky je třeba pravidelně kontrolovat po 7 dnech. Po ukončení zkoušky se provede vizuální zhodnocení, následně je materiál otestován a je na něm stanovena hodnota pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

10.2.5 Mikrostrukturní analýzy

Vybrané varianty lepicích hmot byly podrobeny doplňkové mikrostrukturní analýze. Ta spočívala v hodnocení porušení struktury a sledování případného výskytu trhlin. Tyto analýzy byly provedeny na úlomcích zkušebních těles o velikosti 20x20x100 mm po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.

Pro podrobné studium strukturních změn testovaných hmot je využito **rentgenové tomografie** (Computed Tomography, CT). Pro zobrazení vnitřní struktury materiálu se využívá rentgenového záření. Zkoumaný vzorek je umístěn mezi zdroj záření (rentgenem) a plošným detektorem zařízení. Při otáčení stolku během činnosti tomografu je pomocí plošného detektoru zaznamenávána postupná změna procházejícího rentgenového záření. Díky takto zaznamenaným datům změny intenzity dochází pomocí specializovaného softwaru k vyhodnocení a zpětné rekonstrukci vnitřní struktury zkoumaného materiálu. [50]

Pro sledování mikrostruktury bylo také využito **optické mikroskopie**. Zkušební tělesa byla pozorována digitálním optickým mikroskopem Keyence VHX-950F za účelem zhodnocení a porovnání hmot vystavených nepříznivému působení kyseliny sírové se vzorky, které nebyly exponovány. Optická mikroskopie patří mezi nejpoužívanější zobrazovací metody. Využívá viditelného světla a systému světelných čoček pro vytvoření zvětšeného obrazu zkoumaného vzorku, přičemž digitální mikroskop umožňuje pozorovat i málo kontrastní a lesklé předměty, má automatické zaostřování a hloubka ostrosti až dvacetkrát větší než u běžných optických mikroskopů. [51]



Obrázek 15 Digitální optický mikroskop VHX-950F

10.3 Vyhodnocení pokročilého testování a etapy IV

V následující podkapitoly shrnují zjištění a výsledné hodnoty provedených testů a analýz.

10.3.1 Fyzikálně-mechanické zkoušky

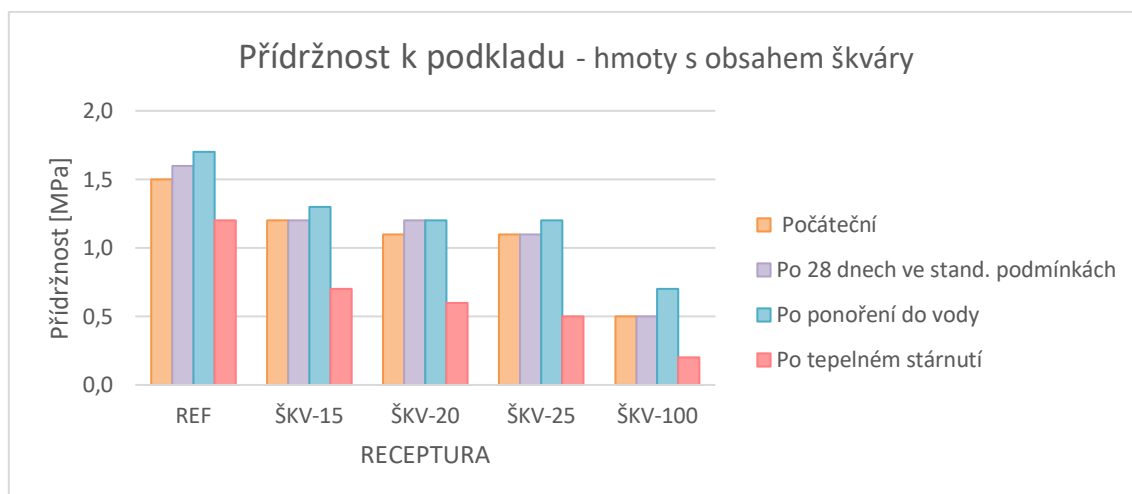
Stanovení tahové přídržnosti cementových lepidel

Následující tabulka udává celkové výsledky přídržnosti k podkladu vybraných receptur, přičemž hmoty s obsahem škváry mají označení ŠKV, hmoty s obsahem slévárenského písku SLP a hmoty s obsahem popílku označení POP. Číslo za zkratkou udává procentuální zastoupení dané druhotné suroviny.

Tabulka 20 Souhrnné výsledné hodnoty přídržnosti k podkladu

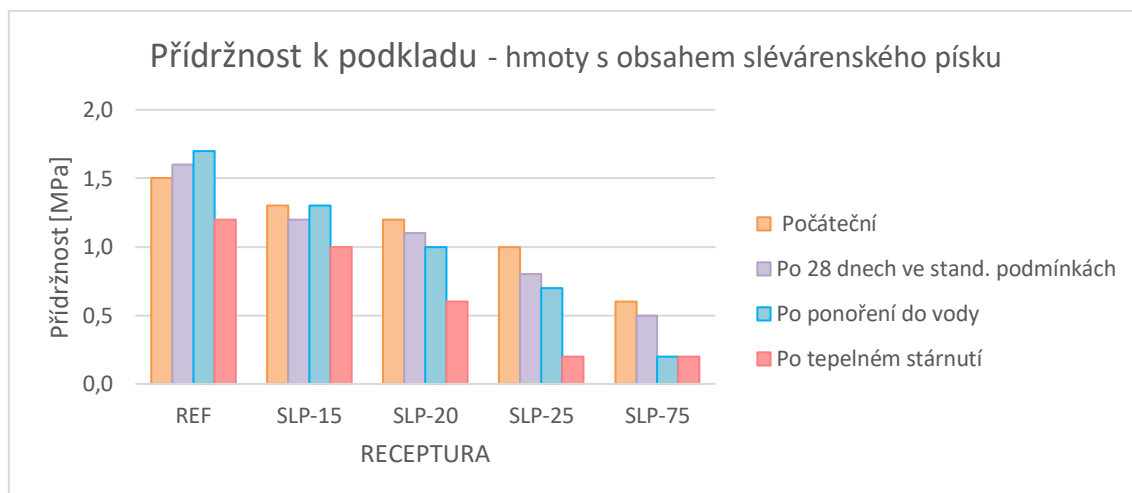
Plnivo	Náhrada druhotného plniva	Označení receptury	Ø Přídržnost [MPa]			
			Počáteční	Po 28 dnech ve stand. podmínkách	Po ponoření do vody	Po tepelném stárnutí
Křemičitý písek	-	REF	1,5	1,6	1,7	1,2
Škvára	15%	ŠKV-15	1,2	1,2	1,3	0,7
	20%	ŠKV-20	1,1	1,2	1,2	0,6
	25%	ŠKV-25	1,1	1,1	1,2	0,5
	100%	ŠKV-100	0,5	0,5	0,7	0,2
Slévárenský písek	15%	SLP-15	1,3	1,2	1,3	1,0
	20%	SLP-20	1,2	1,1	1,0	0,6
	25%	SLP-25	1,0	0,8	0,7	0,2
	75%	SLP-75	0,6	0,5	0,2	0,2
Popílek	10%	POP-10	0,9	0,7	0,6	0,2
	50%	POP-50	0,6	0,4	0,2	0,1

Pro lepší orientaci je grafické porovnání hodnot přídržnosti zkoušených lepicích malt rozděleno do několika grafů dle užitého typu plniva. Navíc byly grafy doplněny o hodnoty počátečních přídržností za účelem lepší přehlednosti.



Graf 4 Výsledné hodnoty přidržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících škváru

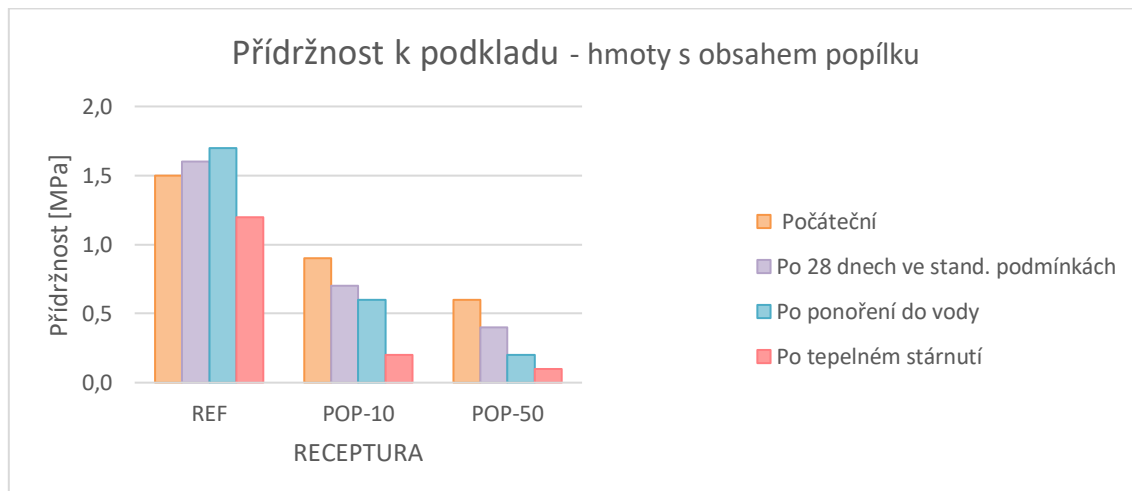
Z grafického vyjádření je patrné, že u receptur, u nichž škvára nahrazovala z 15, 20 a 25 % křemičitý písek, bylo dosaženo srovnatelných výsledků. I přesto, že byl očekáván pozitivní vliv škváry na teplotní odolnost, byly výsledné hodnoty výrazně nižší než u referenční hmoty. Taktéž nebyl splněn zvýšený požadavek 1 MPa pro hmoty PREMIUM. Naproti tomu byla splněna alespoň snížená limitní hodnota 0,5 MPa. Tato hodnota však nebyla dodržena v případě cementového lepidla s úplnou náhradou výchozího plniva za škváru.



Graf 5 Výsledné hodnoty přidržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících slévárenský písek

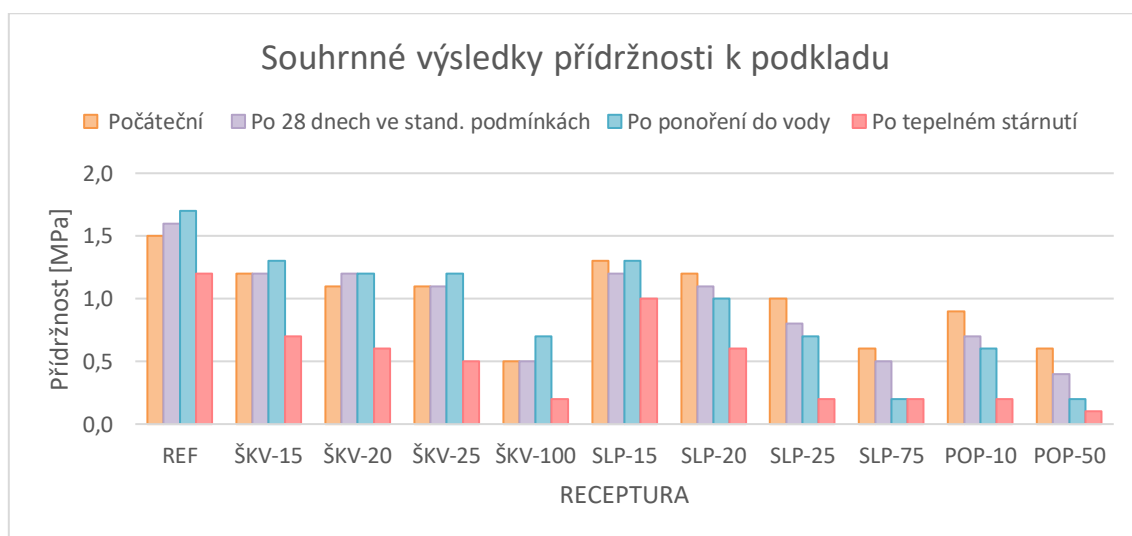
V případě receptur s obsahem slévárenského písku je pozorovatelný klesající trend se zvyšujícím se zastoupením druhotné suroviny. Nejlepších výsledků bylo dosaženo 15% náhradou primární plnivové složky, přičemž byla splněna mezní požadovaná hodnota 1 MPa ve všech případech testovaných přidržností. Při 20% obsahu slévárenského písku nebylo vyhověno zmíněnému požadavku a byl zaregistrován výrazný pokles u přidržnosti po tepelném stárnutí. Lze tedy konstatovat, že pro cementová lepidla je maximální přípustné množství náhrady křemičitého písku pískem slévárenským pro splnění požadovaných sledovaných parametrů 15 % a tato lepidla je možné zařadit mezi hmoty s označením PREMIUM. Receptura s 20% náhradou splňuje snížený požadavek na přidržnost po tepelném

stárnutí. U vzorků s 25% a 75% substitucí primárního plniva nebylo vyhověno ani jedné limitní hodnotě.



Graf 6 Výsledné hodnoty přidržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících popílek

U popílku použitého jakožto plniva bylo potvrzeno zjištění v předešlé etapě, tedy jeho negativní vliv na přidržnost k podkladu ve všech zkoumaných prostředích.

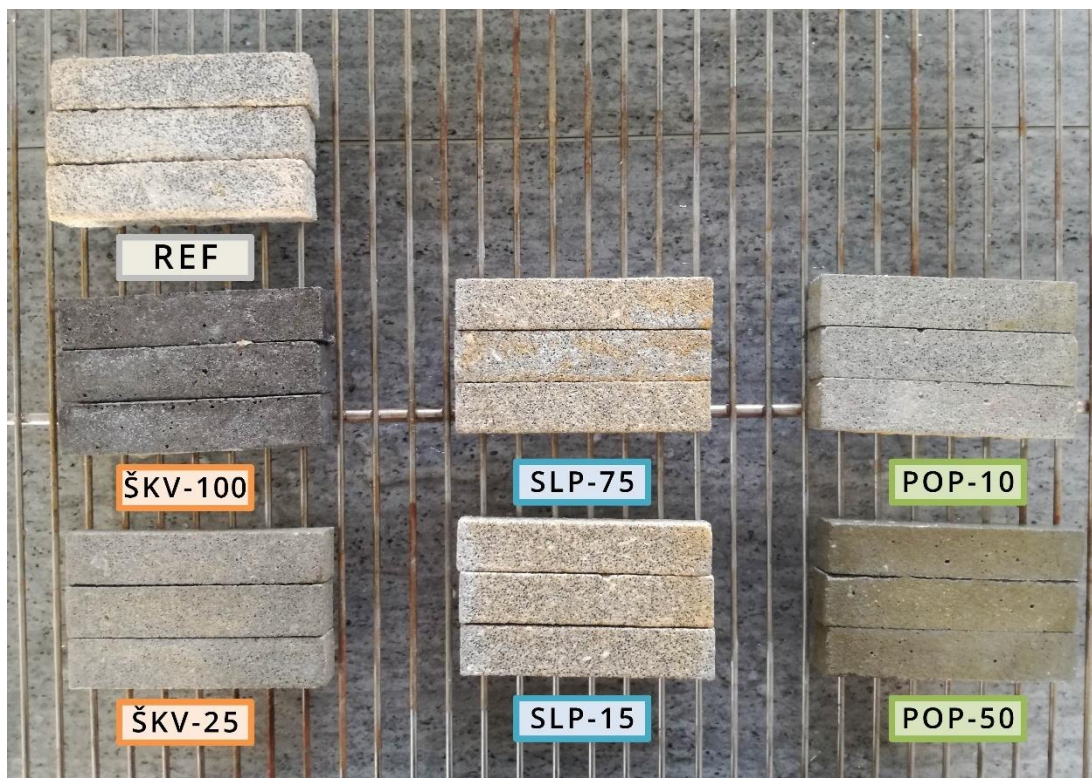


Graf 7 Souhrnné výsledky přidržnosti k podkladu všech zkoušených receptur

Při celkovém porovnání dosavadních výsledků je možné k dalšímu testování doporučit recepturu s 15% náhradou slévarenského písku, která jako jediná ze všech zkoumaných hmot dosáhla požadovaných vlastností. Hmoty s nižším obsahem škváry vykazovaly výsledky na srovnatelné úrovni, budou tedy dále testovány malty s nejvyšší možnou (25%) substitucí křemičitého písku za škváru. Dalšímu zkoušení budou podrobeny taktéž hmoty s vyšším zastoupením odpadní suroviny pro možnost porovnání těchto vzorků s hmotami, které se jeví jako perspektivní. Ze stejného důvodu budou nadále zkoumány hmoty s obsahem popílku.

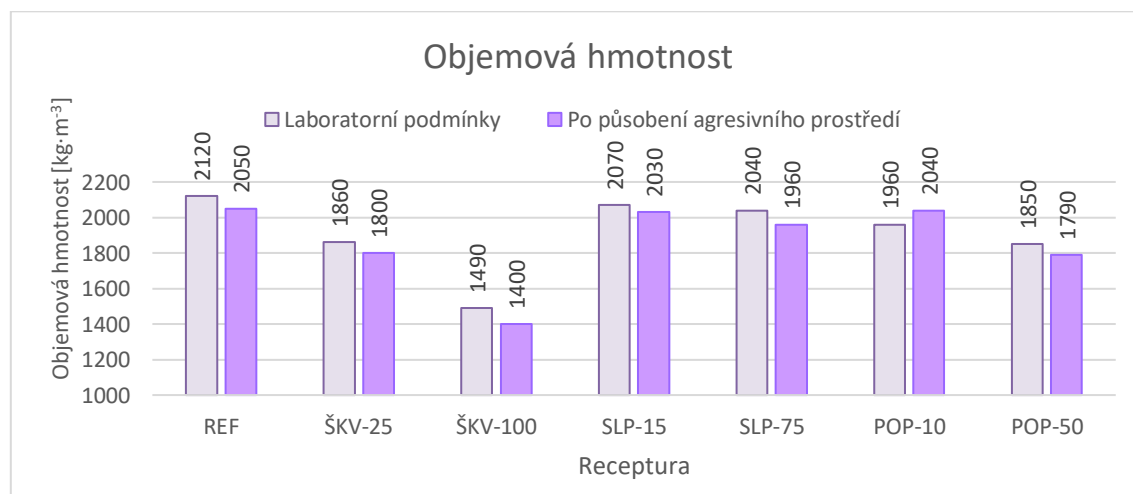
Stanovení objemové hmotnosti, pevnostních charakteristik a chemické odolnosti

Po vizuálním zhodnocení je zřejmé, že degradace sledovaných lepicích malt byla na povrchu výrazně viditelná u referenční směsi a taktéž u vzorků s obsahem slévarenského písku (viz **obrázek 16**).



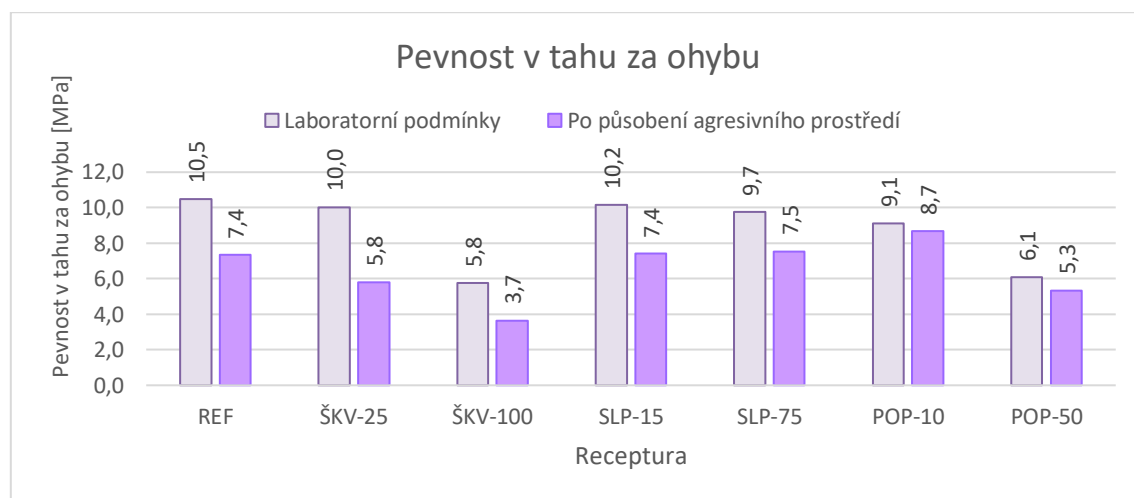
Obrázek 16 Porovnání zkušebních těles po expozici chemicky agresivního prostředí roztoku kyseliny sírové

Následující grafické srovnání objemové hmotnosti ztvrdlých malt demonstruje, že ve většině případů došlo buď k mírnému poklesu objemové hmotnosti po uložení do 3% roztoku kyseliny sírové, nebo nedošlo k žádné změně (u všech receptur obsahující popílek).

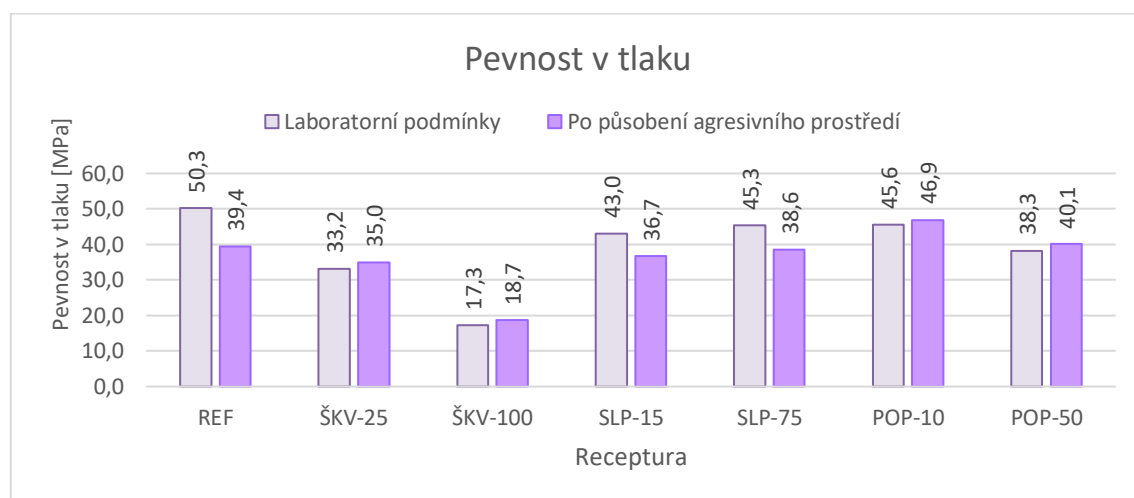


Graf 8 Objemové hmotnosti vybraných testovacích hmot

Zkušební tělesa vystavená působení agresivního prostředí byla také podrobena pevnostním zkouškám. Na následujících grafech je znázorněna komparace dosažených hodnot pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku u jednotlivých receptur.



Graf 9 Pevnost v tahu za ohybu vybraných testovacích hmot



Graf 10 Pevnost v tlaku vybraných testovacích hmot

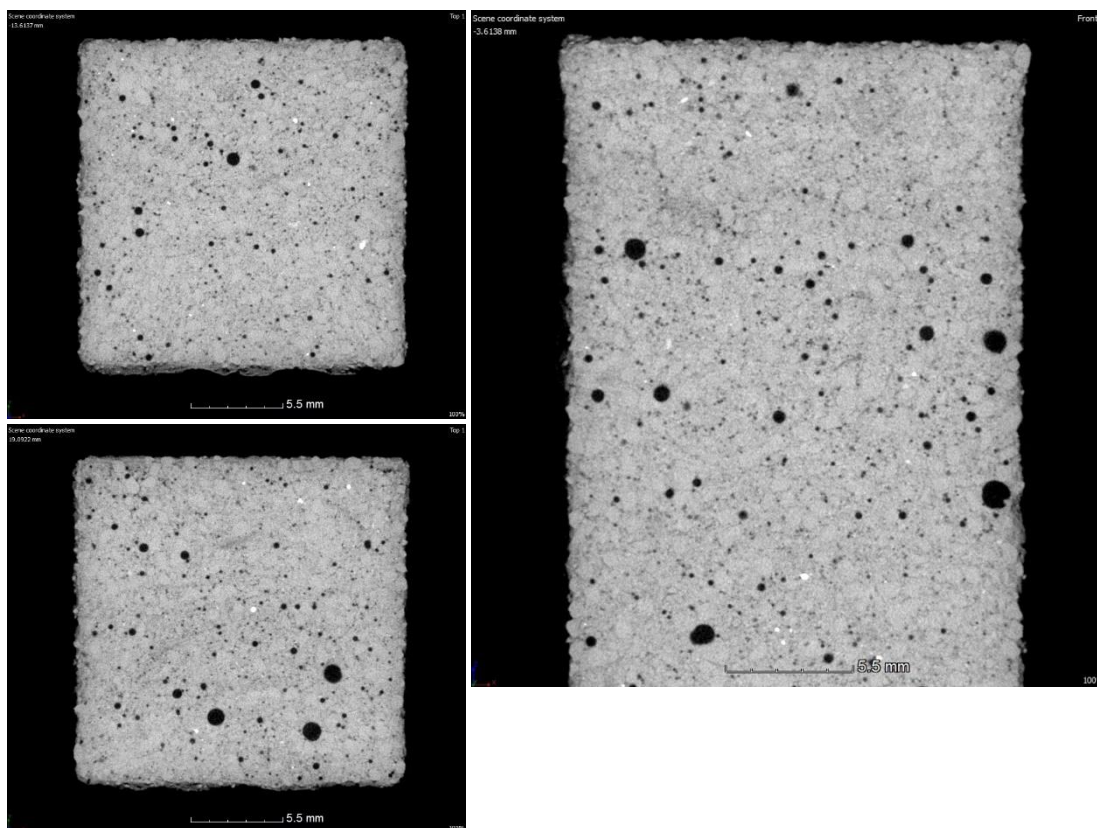
Z grafického vyjádření je patrné, že použitý typ plniva má vliv na pevnostní výsledky pevnostních zkoušek. Je zřejmé, že v případě použití škváry jakožto plniva dochází nejen při úplné, ale i částečné substituci křemičitého písku k poklesu hodnot jak u pevností v tahu za ohybu, tak v tlaku. Slévarenský písek dosahoval podobných hodnot jako referenční lepicí hmota. Další zjištění, které výsledky zkoušek přinesly, bylo ověření obecně známého pozitivního vlivu rozptýlených polypropylenových vláken na zvýšení pevností v tahu za ohybu oproti běžným maltám bez tohoto přídatku. Po působení agresivního prostředí však došlo k poklesu hodnot ve všech případech. Pevnosti v tlaku se po působení 3% roztoku kyseliny sírové snížily pouze nepatrně. Největší pokles pevností jak v tahu za ohybu, tak v tlaku byl zaznamenán překvapivě u referenční receptury. Nejmenší pokles hodnot pevností v tahu za ohybu byl pozorován u vzorků s obsahem popílku. Tyto vzorky dosáhly po expozici agresivního prostředí dokonce nepatrně vyšších hodnot pevností v tlaku než jejich referenční vzorky.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že ze všech zkoumaných receptur se jeví jako nejvhodnější použití receptury se slévárenským pískem, u kterých je dosaženo obdobných vlastností jako u referenčních hmot, a receptury s nižším obsahem popílku, které zlepšily chemickou odolnost testovaného materiálu. V budoucnu se tedy nabízí použití kombinace slévárenského písku s popínkem jako plnivové složky. Toto složení by mělo zajistit nejlepší chemickou odolnost.

10.3.2 Analýzy mikrostruktury

CT tomografie

Pro vyhodnocování vnitřní mikrostruktury materiálu slouží metoda počítačové tomografie (CT). Vlastní tomografické měření je časově náročné, což je omezujícím faktorem v případě většího množství zkoumaných vzorků. Z tohoto důvodu byly k této analýze náhodně vybrány vzorky po jejich uložení v roztoku kyseliny sírové za účelem prozkoumání vnitřní struktury testovaných hmot.

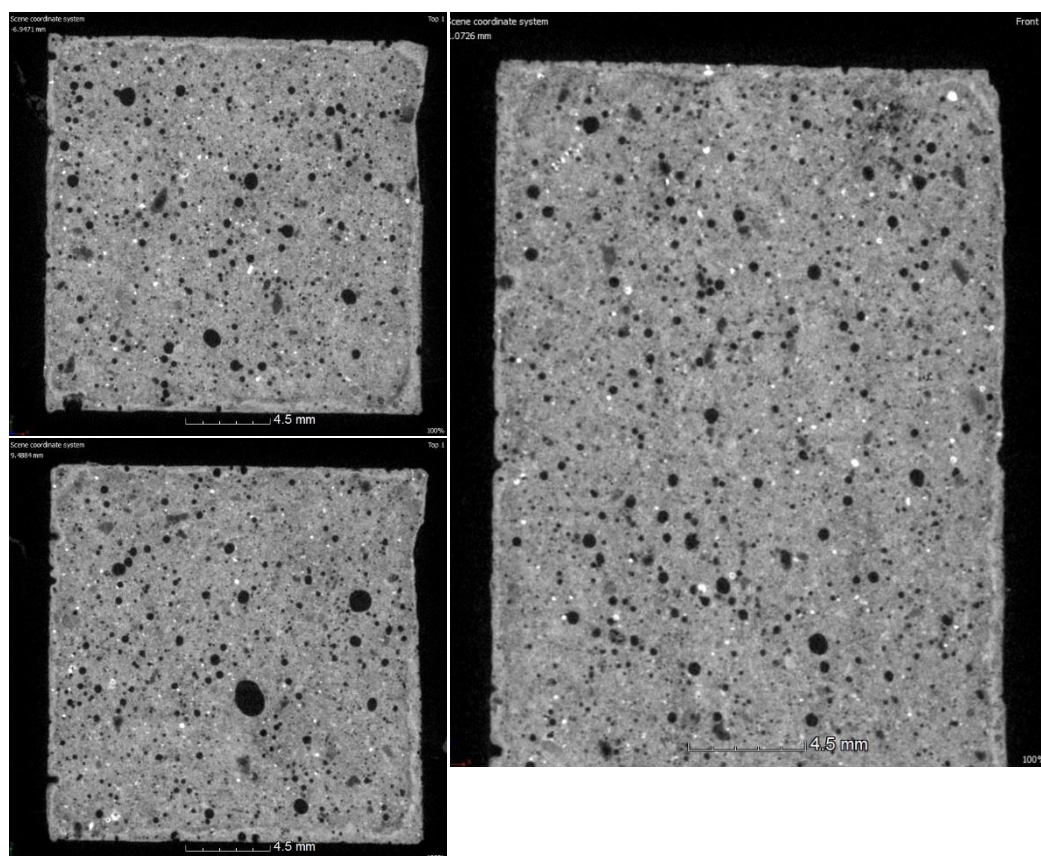


Obrázek 17 Snímky CT pro recepturu s 15% náhradou výchozí plniva slévárenským pískem (vlevo – příčné řezy, vpravo – podélný řez vzorkem)

Vybranými vzorky byly hmoty s 15% náhradou výchozího plniva slévárenským pískem a hmoty s úplnou náhradou výchozí plniva škvárou. Snímky byly pořízeny nahodile z různých míst napříč vzorky. Za účelem lepšího posouzení struktury byly pořízeny snímky jak v příčném, tak v podélném řezu. Jak je na pořízených snímcích (**obrázek 17** a **obrázek 18**) možné pozorovat, díky užití vláken a přísadky vhodných chemických přísad nebyl zjištěn

výskyt žádných trhlin ani jiné výrazné defekty či deformace ve struktuře malt. Při srovnání snímků v obou zkoumaných směrech v případě receptury s 15% obsahem slévárenského písku (**obrázek 17**) je u podélného řezu zřetelnější pórovitost materiálu. Jedná se o póry vzniklé vnášením vzduchu do čerstvé malty při míchání. V případě porovnání obou vzorků je patrná výraznější pórovitost u malt s úplnou náhradou primárního plniva škvárou (**obrázek 18**) oproti maltám, kde je jako plnivo použita kombinace slévárenského a křemičitého písku, což je značně ovlivněno vyšším množstvím přidané vody při přípravě malt pro dosažení požadované konzistence. Pórovitá struktura potom úzce souvisí s odolností celého systému, můžeme tedy očekávat nižší trvanlivost materiálu, a navíc i nižší pevnost, což v případě malt s vyšším obsahem škváry potvrdily výsledky pevnostních zkoušek uvedené v předchozí podkapitole 10.3.1.

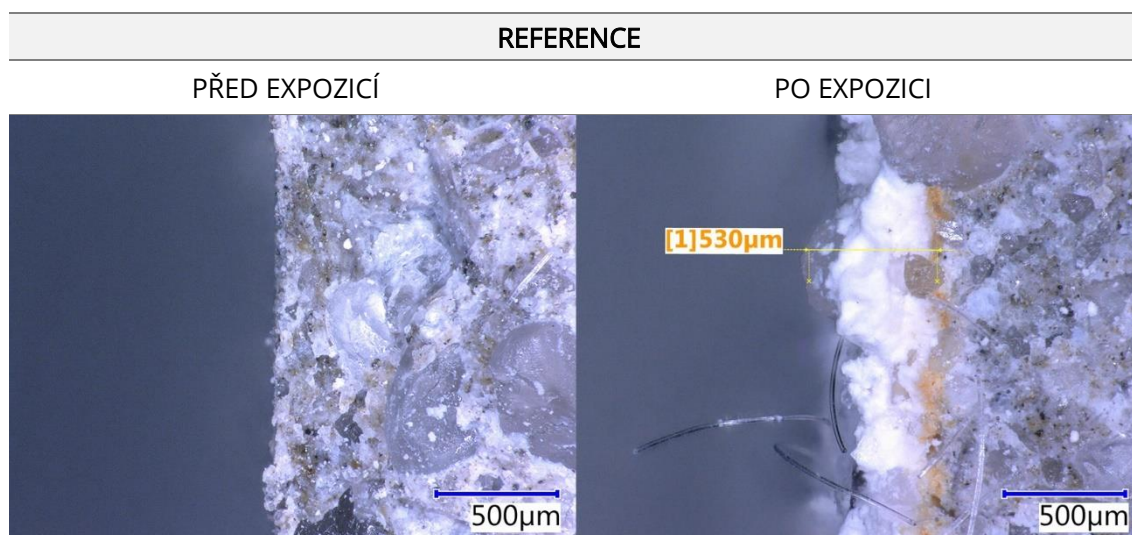
Pro zkoumání vlivu chemické zátěže na zkoušená cementová lepidla je více vypovídající zkoumání povrchu cementových lepidel pomocí mikroskopické analýzy.



Obrázek 18 Snímky CT pro recepturu s úplnou náhradou výchozího plniva škvárou (vpravo – příčné řezy, vlevo – podélný řez vzorkem)

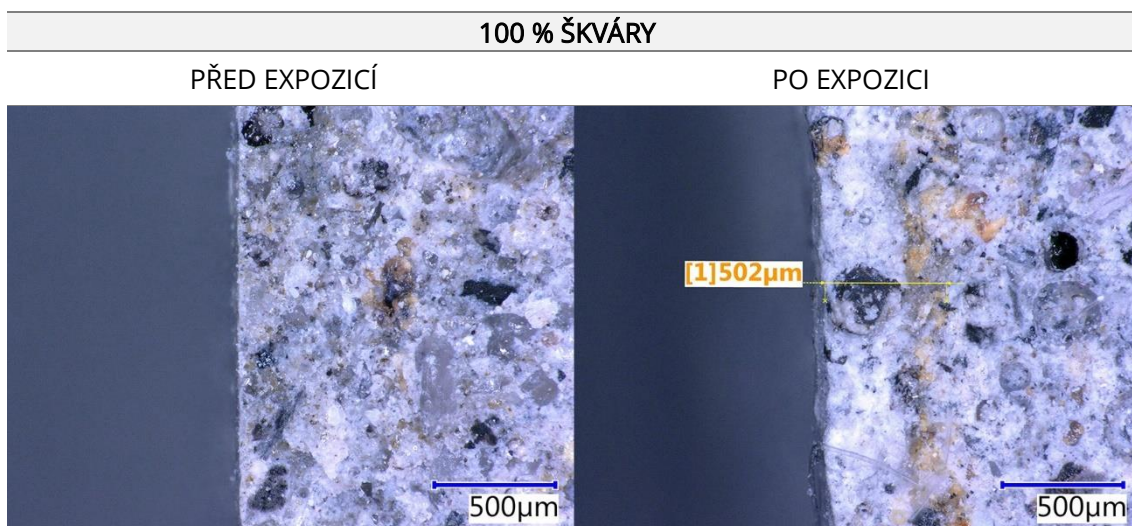
Optická mikroskopie

Poslední zkouškou provedenou v rámci této etapy bylo prozkoumání struktury daných vzorků pomocí digitálního optického mikroskopu VHX-950f se zvětšením 150x, přičemž zkoumány byly jednak vzorky, které nebyly vystaveny žádným náročným podmínkám a byly uloženy v laboratorních podmínkách, tak hmoty, které vystaveny agresivnímu působení chemikálií. Byla tedy možná jejich komparace.

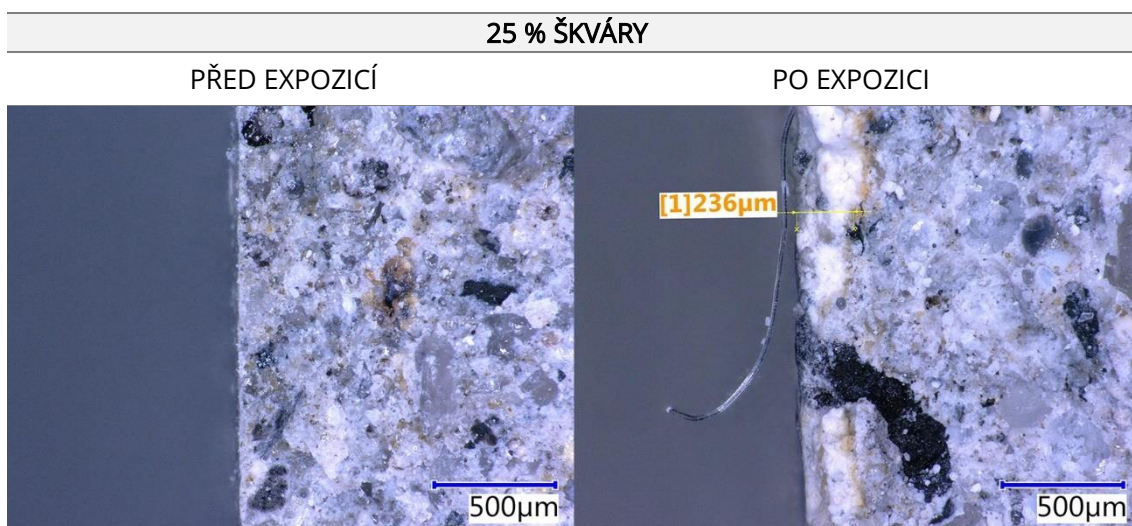


Obrázek 19 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici referenční hmoty s křemičitým pískem

V mikroskopickém pozorování v našem případě hraje významnou roli porovnání zkoumaných vzorků na jejich okrajích. Na snímku (**obrázek 19**) je viditelný výrazný kontrast mezi neporušeným povrchem vzorku, který nebyl vystaven žádné chemické zátěži a mezi porušeným povrchem vzorku vystaveným působení chemikálií.

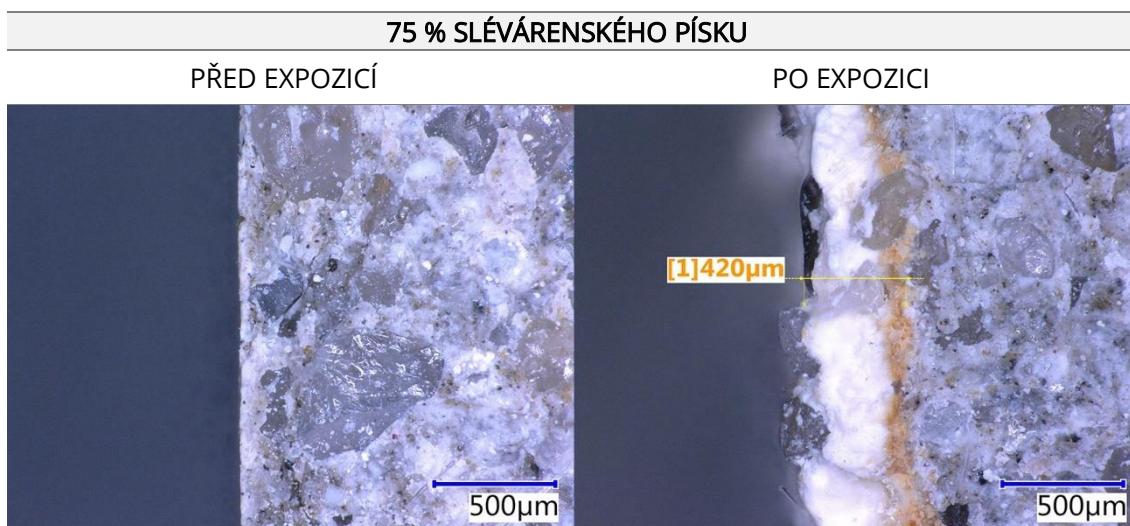


Obrázek 20 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot se 100% obsahem škváry

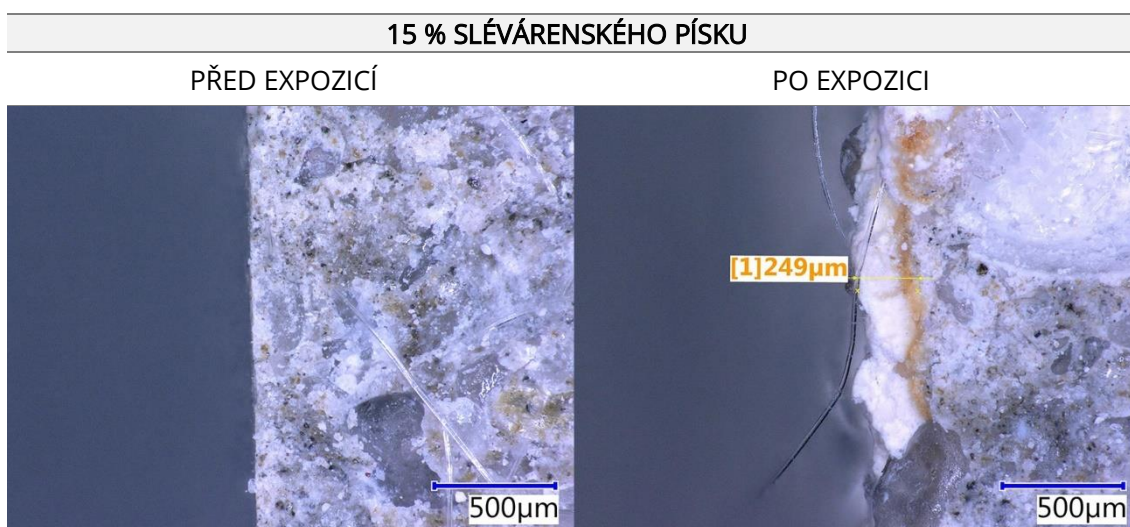


Obrázek 21 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 25% obsahem škváry

Obdobně tomu bylo i v případě škváry, kdy na první pohled není patrné porušení zkušebního vzorku, ovšem mikroskopické snímky odhalily u hmot s úplnou náhradou výchozího plniva škvárou srovnatelné narušení povrchu jako u křemičitého písku. U lepidel s 25% obsahem škváry lze pozorovat menší míru porušení povrchu degradačním prostředím.

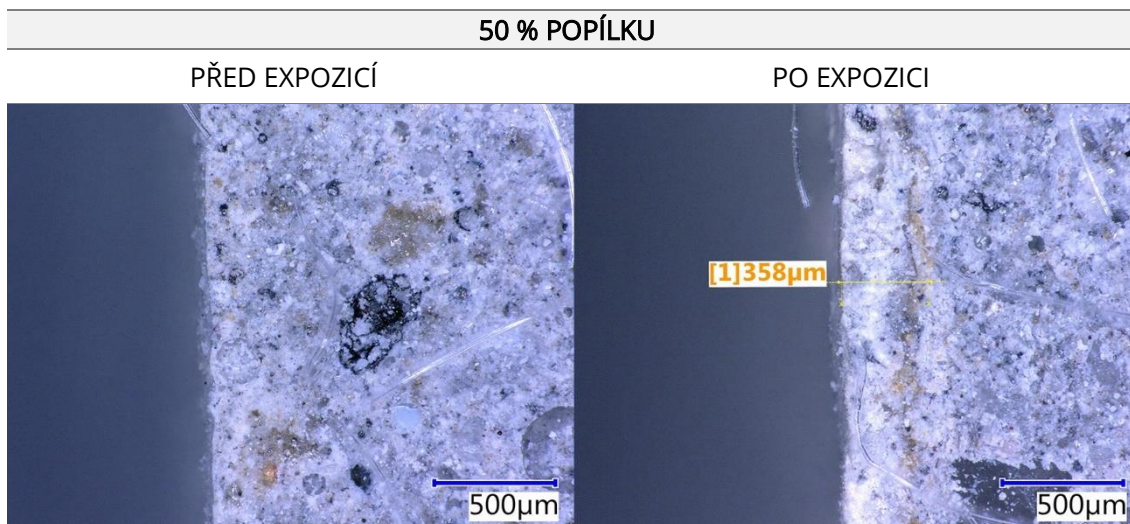


Obrázek 22 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot se 75% obsahem sl. písku

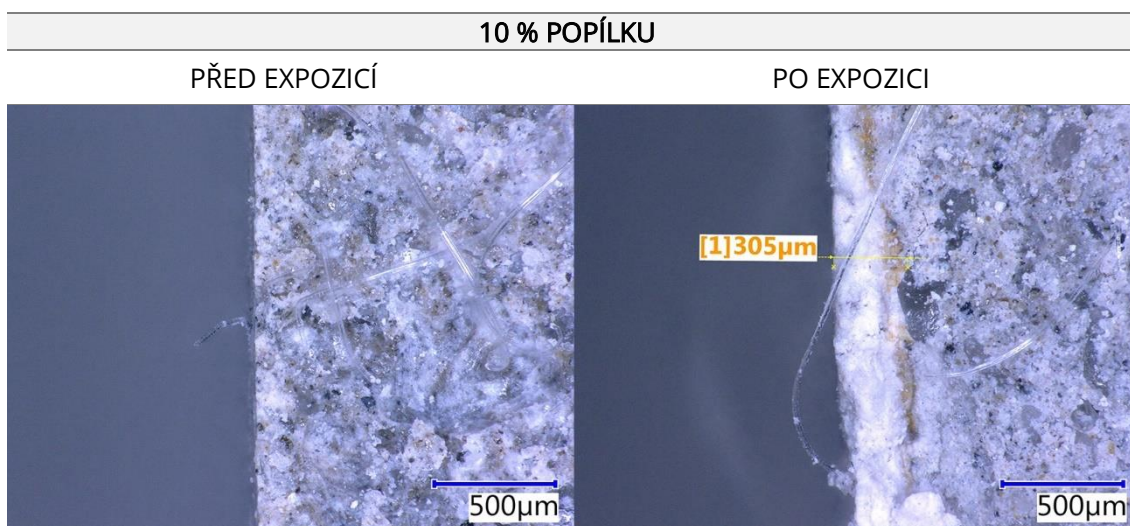


Obrázek 23 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 15% obsahem sl. písku

Stejně jako v případě referenční malty je zřejmý vyšší stupeň narušení povrchu i u hmot s 75% obsahem slévárenského písku. Naopak pozitivně lze hodnotit nízkou míru narušení oproti referenci v případě receptury s 15% substitucí primárního plniva za slévárenský písek. Lze tedy konstatovat, že vhodnou kombinací křemičitého a slévárenského písku je možné dosáhnout menší míry degradace.



Obrázek 24 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 50% obsahem popílků



Obrázek 25 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 10% obsahem popílků

U vzorků částečně plněných popílkem bylo při mechanických zkouškách docíleno nejlepších vlastností ve srovnání s jejich referenčními vzorky. Na první pohled není u cementových lepidel, kde je polovina plnivové složky tvořena popílkem, viditelné porušení povrchu. Po bližším prozkoumání je však možné zaregistrovat určitou hloubku průniku roztoku kyseliny sírové do struktury trámečku. Při 10% substituci křemičitého písku je tato hloubka průniku menší.

11 ETAPA V: Optimalizace výsledků a výběr nejúspěšnějších receptur

Závěrečná etapa bude věnována optimalizaci receptur, pomocí které bude určena nejvhodnější receptura na základě zvolených kritérií.

11.1 Optimalizační výpočet

Na výběr nejlepších receptur byla aplikována optimalizace pomocí kvantitativního párového srovnání. Následující tabulka uvádí zvolená kritéria.

Tabulka 21 Rozhodující kritéria při optimalizačním výpočtu

Kritérium	Jednotky
Počáteční přídržnost	[MPa]
Přídržnost po ponoření do vody	[MPa]
Přídržnost po tepelném stárnutí	[MPa]
Přídržnost po 28 dnech	[MPa]
Chemická odolnost	[-]
Pevnost v tlaku	[MPa]
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
Nutnost předúpravy použitého druhotného plniva	ANO/NE
Obsah druhotné suroviny	[%]

Mezi rozhodující kritéria patřila maximální přídržnost, a to zejména počáteční, po ponoření do vody a po tepelném stárnutí. Taktéž byla brána v úvahu chemická odolnost. Toto kritérium je hodnoceno na stupnici od 1 do 10, kde 1 bod znamená nejméně odolný materiál a 10 bodů je nejvíce odolná hmota. Dalším významným zvoleným kritériem byla případná nutnost předúpravy použitého druhotného plniva, jelikož potřeba úpravy suroviny před jejím použitím představuje finanční a časovou zátěž v rámci výrobního procesu.

Pro závěrečný optimalizační výpočet byly pro porovnání vybrány hmoty ŠKV-25, SLP-15 a POP-10 a taktéž hmoty ŠKV-100 A SLP-75, aby bylo možné porovnat veškerá zvolená kritéria.

Pro výpočet váhy kritérií byla použita Sattiho matice, dle které se posoudila míra důležitosti všech vybraných kritérií:

Tabulka 22 Výpočet váhy - Sattiho matice

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	S_i	R_i	F_i
1	1	1	1/5	2	7	5	6	4	8	2688,00	2,404627	0,199485
2	1	1	6	2	1/3	7	6	4	7	4704,00	2,558892	0,212283
3	5	1/6	1	4	1	7	6	6	9	7560,00	2,697409	0,223774
4	1/2	1/2	1/4	1	1/2	6	5	1/7	5	0,67	0,956421	0,079344
5	1/7	3	1	2	1	5	3	1/2	1/3	2,14	1,088371	0,09029
6	1/5	1/7	1/7	1/6	1/5	1	1	1/5	1	0,00	0,310992	0,0258
7	1/6	1/6	1/6	1/5	1/3	1	1	1/4	2	0,00	0,377131	0,031286
8	1/4	1/4	1/6	7	2	5	4	1	3	8,75	1,272529	0,105567
9	1/8	1/7	1/9	1/5	3	1	1/2	1/3	1	0,00	0,38781	0,032172
Σ										14963,56	12,05	1,00

Právě důležitost jednotlivých kritérií a jejich hodnoty u daných receptur určují, která z nabízených variant je pro požadovaný účel nejvhodnější. Hodnoty zvolených kritérií jsou zapsány v následující tabulce (**tabulka 23**), kde je taktéž uvedeno, zda je pro dané kritérium optimální minimální či maximální hodnota:

Tabulka 23 Rozhodovací matice

Vlastnost	Optimum	ŠKV-25	ŠKV-100	SLP-15	SLP-75	POP-10
Počáteční přídržnost	max	1,1	0,5	1,3	0,6	0,9
Přídržnost po ponoření do vody	max	1,2	0,7	1,3	0,2	0,6
Přídržnost po tepelném stárnutí	max	0,5	0,2	1	0,2	0,2
Přídržnost po 28 dnech	max	1,1	0,5	1,2	0,5	0,7
Chemická odolnost	max	5	3	8	6	9
Pevnost v tlaku	max	33,2	17,3	43	45,3	45,6
Pevnost v tahu za ohybu	max	10	5,8	10,2	9,7	9,1
Nutnost předúpravy druhot. plniva	min	1	1	0	0	0
Obsah druhotné suroviny	max	25	100	15	75	10

Konečným krokem je transformace rozhodovací matice na matici výpočtovou a následný závěrečný výpočet, na základě kterého je vybrána nejvhodnější lepicí hmota s neoptimálnějšími vlastnostmi do náročných podmínek.

Tabulka 24 Výpočtová matice

číslo	Fi	Optimum	ŠKV-25	ŠKV-100	SLP-15	SLP-75	POP-10
1	0,1994849	max	14,9614	0,0000	19,9485	2,4936	9,9742
2	0,2122825	max	19,2984	9,6492	21,2283	0,0000	7,7194
3	0,2237737	max	8,3915	0,0000	22,3774	0,0000	0,0000
4	0,0793435	max	6,8009	0,0000	7,9344	0,0000	2,2670
5	0,0902899	max	3,0097	0,0000	7,5242	4,5145	9,0290
6	0,0257995	max	1,4495	0,0000	2,3429	2,5526	2,5800
7	0,0312863	max	2,9864	0,0000	3,1286	2,7731	2,3465
8	0,1055674	min	0,0000	0,0000	10,5567	10,5567	10,5567
9	0,0321722	max	0,5362	3,2172	0,1787	2,3235	0,0000
Σ			56,8978	9,6492	95,0409	22,8905	44,4727

Jako nejlepší se na základě výpočtu podle metody kvantitativního párového srovnání jeví varianta SLP-15 – receptura, kde je plnivová složka tvořena z 15 % slévárenským pískem. Na druhém místě se umístila receptura ŠKV-25 s 25% náhradou primárního plniva škvárou.

11.2 Vyhodnocení etapy V

Optimalizačním výpočtem podle stanovených kritérií byla určena hmota kvalitativní úrovně PREMIUM jako SLP-15, zejména díky obdobným výsledným hodnotám jako referenční směs a splnění limitního požadavku 1 MPa ve všech případech zkoušek přídržnosti k podkladu. Dalším stěžejním rozhodujícím kritériem byl charakter plnivové složky, jelikož u slévárenského písku není nutnost zásadní předúpravy plniva pro jeho další použití v lepicích maltách.

Hmota kvalitativní úrovně ECONOMY byla určena jako ŠKV-25, díky vyššímu procentuálnímu zastoupení ve zkoušených lepidlech a taktéž díky dobrým výsledkům přídržnosti k podkladu, které překročily hodnotu 0,5 MPa.

12 SHRNUÍ A DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Jako první krok experimentální části práce bylo nutné provedení analýzy na trhu dostupných lepicích hmot, prozkoumání a rozdělení druhů lepidel využívaných v běžné praxi do náročných podmínek a stanovení požadavků na tyto materiály. Tímto se zabývala první etapa, v rámci které byla taktéž stanovena silikátová pojivová báze nově vyvíjených hmot s ohledem na cenu výsledného produktu, požadovaným tixotropním vlastnostem a vlhkost kanalizačního prostředí, kam budou nově vyvinuté hmoty aplikovány.

Následující etapa se zabývala rozbořem vstupních surovin, přičemž stěžejní částí byla analýza surovin druhotných, které tvoří plnivovou složku vyvíjených cementových lepidel. Uvažované druhotné suroviny měly rozdílný charakter, lišily ve svém chemickém složení, fyzikálně mechanických vlastnostech, původu a zejména v granulometrii. Vybranými zástupci druhotných surovin využitelných jakožto náhrada původního plniva byly: slévárenský písek ArcelorMittal, škvára z Mělníku a vysokoteplotní popílek z Tušimic. Slévárenský písek se svými vlastnostmi nejvíce přibližoval referenčnímu plnivu, kterým byl zvolen písek křemičitý. Po chemické stránce měl právě slévárenský písek nejvyšší zastoupení oxidu křemičitého oproti ostatním vybraným druhotným surovinám. Další výhodou slévárenského písku je jeho tvar zrna, který je oblý, z čehož lze předpokládat úspornější dávkování pojiva, které je potřeba k obalení zrn. Vyhodnocení granulometrické analýzy ukázalo, že slévárenský písek má nejvhodnější zrnitost pro nahrazení křemičitého písku. Dalším plnivem byl zvolen popílek, u něhož se předpokládal pozitivní vliv na zvýšení odolnosti lepicích malt v chemicky agresivním prostředí. Na výběr se nabízelo použití popílku vysokoteplotního či fluidního, přičemž byl zvolen popílek vysokoteplotní. Důvodem byl vyšší obsah volného oxidu vápenatého ve fluidních popílcích, s kterým souvisí vyvolání objemových změn a riziko vnitřního prnutí s následným rozvojem trhlin v cementovém tmele. Jako poslední zástupce druhotných surovin byla vybrána škvára, jejíž materiálové využití závisí na jejím složení a vlastnostech, které jsou do jisté míry podobné křemičitému plnivu. Nevýhodou však je její kolísavé složení, které závisí na mnoha faktorech. Taktéž má škvára na rozdíl od kulatých zrn písku zrna ostrohranná, což negativně ovlivňuje reologické vlastnosti hmot v čerstvém stavu, což omezuje použití této druhotné suroviny. Na druhou stranu u ostrohranných zrn se předpokládá lepší soudržnosti s cementovým tmelem. Další nevýhodu při použití škváry představuje nutnost jejího vysušení před samotným použitím do lepicích hmot. U všech plniv včetně referenčního byla zvolena maximální velikost zrna plniva do 1 mm.

Třetí etapa práce se zabývala návrhem receptur lepicích hmot, přičemž ve složení receptur byly zakomponovány vybrané druhotné suroviny jako částečná či úplná náhrada referenčního křemičitého plniva. Při přípravě malt byl potvrzen zásadní vliv zvyšujícího se obsahu jak škváry, tak popílku na zpracovatelnost hmot. Pro dosažení stejné konzistence pasty bylo potřeba výrazně vyšší množství vody než u křemičitého písku vlivem nasákavosti použitých surovin. Do budoucna je třeba mít na paměti nutnost zvýšení množství plastifikační přísady, s čímž se ovšem pojí i zvýšení nákladů na výrobu směsi. Po přípravě zkušebních těles následovalo základní testování malt. Sledovaným a rozhodujícím parametrem byla počáteční přídržnost lepicích hmot k prvku z taveného čediče. Prvotní

testování probíhalo na dvou úrovních. Prvotně byly zkoušeny malty, u kterých byla navržena náhrada primární plnivové složky v procentuálním zastoupení 25, 50, 75 a 100 %. Na základě zjištěných výsledků byly receptury modifikovány a pro další zkoušení byly použity receptury se sníženým maximálním obsahem substituční složky na 20 % a 15 % u slévárenského písku a škváry. V případě popílku byly podle očekávání zaznamenány nižší hodnoty počáteční přídržnosti k nesavému adherendu, což lze vysvětlit sklovitým charakterem částic popílku a také absencí hrubších frakcí plniva, které mají pozitivní vliv na přídržnost. S ohledem na stanovené hodnoty bylo tedy zvoleno nižší procento náhrady 10 %. K dalšímu pokročilému zkoušení byly vybrány receptury, které splnily požadovanou limitní hodnotu počáteční přídržnosti 1 MPa a taktéž hmoty s nejvyšším obsahem alternativního plniva, které splnily snížený požadavek na počáteční přídržnost a překročily 0,5 MPa. Výstupem této etapy byl výběr deseti nejvhodnějších receptur lepicích malt s obsahem druhotných surovin pro další testování.

Při pokročilém testování v rámci čtvrté etapy byla pozornost v první řadě zaměřena na testování přídržnosti k podkladu, a to po ponoření do vody, po tepelném stárnutí a po 28 dnech uložení v laboratorních podmínkách. Pozitivním poznatkem je zjištění možnosti náhrady primárního plniva škvárou do 25 % ve všech případech s výjimkou aplikací, kde je vyžadována normová hodnota tahové přídržnosti po tepelném stárnutí 1 MPa. Tuto podmínku splnila pouze receptura s 15% náhradou výchozího křemičitého písku pískem slévárenským. U receptury s 20% náhradou primárního plniva slévárenským pískem nastal stejný problém s nízkou teplotní odolností jako u hmot s obsahem škváry. Následně byly vybrány receptury s co nejvyšším obsahem slévárenského písku či škváry, které splnily snížený požadavek na přídržnost k podkladu 0,5 MPa po 28 dnech uložení v laboratorním prostředí, což platilo pro receptury se 75% obsahem slévárenského písku a 100% obsahem škváry jako plniva. V případě popílku se opět prokázal jeho výrazně negativní účinek na přídržnost malt k podkladu, ovšem i přes tento fakt byly k dalšímu testování vybrány receptury s jeho 50% a 10% zastoupením jakožto plniva. Důvodem byl očekávaný pozitivní vliv na chemickou odolnost a možné porovnání s ostatními hmotami. Pro ověření dalších vlastností vybraných receptur byly namíchány a vyrobeny zkušební laboratorní vzorky 20 x 20 x 100 mm. Polovina vzorků byla uložena ve standardních podmínkách, zbytek zkušebních těles byl exponován v agresivním prostředí 3% roztoku kyseliny sírové po dobu 21 dní.

Z výstupů pevnostních zkoušek vzorků uložených ve standardních podmínkách je patrný negativní vliv škváry na pevnost v tahu za ohybu i pevnost v tlaku. V porovnání s referenční hmotou došlo u receptury s úplnou náhradou křemičitého plniva za škváru (ŠKV-100) k poklesu pevnosti v tahu za ohybu téměř o polovinu. V případě srovnání pevnosti v tlaku je tento pokles ještě výraznější a zmíněná receptura (ŠKV-100) dosáhla pouze třetinové hodnoty pevnosti tlaku referenční malty. Pokles pevnosti v tahu za ohybu byl pozorován i u receptury POP-50, tedy s vyšším zastoupením popílku. Receptura s nižším obsahem popílku POP-10 a obě receptury se slévárenským pískem SLP-15 a SLP-75 dosahovaly srovnatelných hodnot s referencí. Při porovnání pevnostních charakteristik vzorků, které byly uloženy v laboratorních podmínkách a vzorků zkoušených po vystavení působení agresivního prostředí, se výsledky pevnosti v tlaku výrazně nelišily. Naopak při komparaci

pevností v tahu za ohybu je vidět pokles výsledných hodnot ve všech případech včetně referenční hmoty. Působení agresivního prostředí se výrazněji projevilo u receptur s obsahem škváry (ŠKV-25, ŠKV-100), kde byl pokles pevnosti v tahu ohybem vyšší než u hmot s výchozím plnivem. Výsledné hodnoty získané u receptur s obsahem slévárenského písku se oproti referenci lišily jenom minimálně a lze je označit za vyhovující. Výsledky také potvrdily předpoklad, že nejvyšší odolnost proti chemické zátěži vykazují hmoty s obsahem popílku, přičemž pouhá 10% náhrada křemičitého písku popílkem měla výrazný pozitivní vliv na finální pevnost v tahu ohybem i pevnost v tlaku exponovaných vzorků. Díky použití popílku bylo docíleno vyšší hutnosti materiálu, tedy redukci jeho propustnosti, což vede k omezení průsaku agresivních chemikálií. Jak ovšem výsledky dosažené u receptury POP-50 dokazují, je důležité nepřesáhnout optimální dávku popílku v hmotě, jelikož jeho nepřiměřené množství v čerstvém stavu ovlivňuje potřebnou dávku vody k dosažení požadovaných reologických vlastností malt, což má za následek snížení pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu.

Vybrané vzorky vystavené chemické zátěži (ŠKV-100 a SLP-15) byly podrobeny analýze na rentgenovém tomografu, pomocí kterého bylo možné posoudit míru degradace a vizuálně zhodnotit mikrostrukturu materiálu. Na pořízených CT snímcích nebyly zaznamenány žádné trhliny ani žádné jiné defekty materiálu. Při srovnání snímků obou receptur byla u hmoty s úplným nahrazením výchozího plniva za škváru (ŠKV-100) registrována větší pórovitost než u receptury s 15% náhradou slévárenským pískem (SLP-15), u které je pozorovatelná hutnější a kompaktnější struktura. To je opět zapříčiněno vyšším obsahem vody podobně jako u receptury s vyšším obsahem popílku. Řešením tohoto problému by byla modifikace receptury zvýšením dávky plastifikační přísady, což by ovšem mělo za následek zvýšení ceny konečného produktu, které není v souladu s cílem práce.

Pro lepší posouzení vlivu agresivních látek byly vzorky podrobeny analýze pod optickým mikroskopem. Analýza byla prováděna na lomu vzorků a byly porovnávány malty uložené ve standardních podmínkách a malty vystavené působení agresivního prostředí. Roztok kyseliny sírové měl za následek poměrně významné vizuální změny v případě všech exponovaných vzorků, přičemž nejvýraznější narušení povrchu bylo pozorovatelné u receptur s obsahem jak slévárenského, tak křemičitého písku. Ovšem při jejich kombinaci bylo u receptury SLP-15 docíleno menší hloubky průniku roztoku kyseliny sírové do hmoty. Lze tedy konstatovat, že částečná náhrada křemičitého písku slévárenským přispěje ke zlepšení odolnosti vůči vybranému agresivnímu prostředí, což je patrné i z provedených mechanických zkoušek.

V závěrečné páté etapě byl proveden optimalizační výpočet pro výběr nejvhodnějších receptur pomocí metody kvantitativního párového srovnání. Bylo stanoveno celkově 9 kritérií, přičemž stěžejním parametrem byla přídržnost k podkladu v různém prostředí a chemická odolnost vyvíjených cementových lepidel. Jako nejvhodnější receptura byla vyhodnocena lepicí hmota s 15% obsahem slévárenského písku SLP-15, která vyhověla zvýšenému požadavku 1MPa na počáteční přídržnost k podkladu, přídržnost po 28 dnech, po tepelném stárnutí a po uložení ve vodě.

V případech, kdy není vyžadována odolnost materiálu vůči vyšším teplotám, je přípustná 20% náhrada výchozího plniva slévárenským pískem při splnění limitní hodnoty 1 MPa ve všech případech přídržnosti k podkladu s výjimkou přídržnosti po tepelném stárnutí. Jako druhá nejvíce vyhovující receptura byla určena ŠKV-25. Ve všech případech přídržnosti k podkladu byl splněn snížený požadavek 0,5 MPa pro hmoty ECONOMY. Mimo jiné bylo ověřeno, že substituce primárního plniva škvárou je přípustná do 25 % také do vlhkostně namáhaných prostor při splnění požadavku 1 MPa v případě přídržnosti po ponoření do vody, po 28 dnech uložení v laboratorních podmínkách a rovněž počáteční přídržnosti. Nicméně teplotní rezistence hmot s obsahem škváry se ukázala jako nedostatečná, což mohlo být zapříčiněno možnou přítomností organické složky ve škváře. V případě hmot s obsahem popílku lze poukázat na mnohokrát prověřený pozitivní vliv popílku na trvanlivost materiálu. I přes tuto výhodu vykazovaly tyto hmoty nejnižší přídržnost, jak již bylo referováno výše.

Navzdory tomu, že dosažené výsledky ukázaly, že není možná plná náhrada výchozího plniva plnivem alternativním, je možné zjištěné maximální procentuální zastoupení druhotné suroviny zvýšit, v případě vyřešení problému odolnosti hmot vůči teplotním změnám. Řešením by mohlo být použití jiného druhu cementu, modifikace pojivové složky vhodnou druhotnou surovinou či upravení dávky polymerní přísady. Případnou variantou by bylo zvážení možnosti kombinace uvažovaných surovin a využití přednosti jednotlivých surovin k vytvoření odolné lepicí hmoty na silikátové bázi s vysokou požadovanou přídržností k nesavému povrchu taveného čediče v různých prostředích.

13 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh materiálového složení lepicích hmot na vhodné pojivové bázi určených pro instalaci nenasákavých výrobků z taveného čediče s co nejvyšší možnou náhradou v lepidlech standardně používaného plniva za plnivo z alternativních surovinových zdrojů.

V rámci teoretické části byly shrnuty poznatky z rešerší jak tuzemské, tak zahraniční literatury v oblasti lepicích hmot. Byla popsána charakteristika různých druhů lepidel a jejich složení. Pozornost byla zaměřena taktéž na jejich aplikaci a významné faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje. Dále se teoretická část zabývala samotnými lepenými prvky, tedy výrobky z taveného čediče a jejich materiálovými vlastnostmi.

Průzkum na trhu nabízených lepidel určených k ukládání nenasákavých prvků do náročného prostředí ukázal, že ekonomicky nejvýhodnější jsou hmoty na silikátové materiálové bázi. Jejich předností jsou také jejich lepší tixotropní vlastnosti než u lepidel na bázi polymerní. Navrhovaná cementová lepidla byla vyvíjena ve dvou kvalitativních úrovních: ECONOMY a PREMIUM.

Důležitým krokem byl výběr vhodných druhotných surovin, které svými vlastnostmi byly vhodnými substituenty primárního plnivé složky. Vybranými zástupci surovin z alternativních zdrojů byly slévárenský písek ArcelorMittal, škvára z Mělníku a popílek z Tušimic. Navrhované hmoty se lišily pouze v substituční složce plniva v různém procentuálním zastoupení.

Jako nejvhodnější receptura byla vyhodnocena hmota s 15 % náhradou primárního plniva za slévárenský písek (ArcelorMittal). Ve všech sledovaných případech přídržnosti k podkladu dosahovaly hodnoty do 1,3 MPa s výjimkou přídržnosti po tepelném stárnutí, u které byla zaznamenána hodnota 1 MPa, což stále splňovalo normový požadavek. Receptura také vykazovala mírně zvýšenou chemickou odolnost oproti referenční směsi. Jedná se o recepturu kvalitativní úrovně s označením PREMIUM. Jako druhá varianta, hmota ECONOMY, byla zvolena receptura s 25% substitucí výchozí plnivé složky za škváru (Mělník). U tohoto lepidla bylo vyhověno všem stanoveným limitním hodnotám s výjimkou přídržnosti po tepelném stárnutí, kde byl splněn pouze snížený požadavek 0,5 MPa. Nicméně ve všech ostatních sledovaných případech přídržnosti k pokladu v různém prostředí se hodnoty pohybovaly v intervalu od 1,1 do 1,2 MPa.

Předmětem práce bylo především ověření možnosti náhrady primárního křemičitého plniva zvolenou druhotnou surovinou při zachování fyzikálně mechanických parametrů a odolnosti vůči nepříznivým podmínkám, čehož bylo docíleno. Ukázalo se, že již menší obsah popílku v hmotě negativně ovlivňuje zcela klíčový parametr, čímž je přídržnost k adherendu. I přesto, že popílek propůjčuje materiálu lepší chemickou odolnost, bez zvýšení dávky polymerní přísady, která by měla za následek zvýšení nákladů na výrobu malt, je jeho použití v nově vyvíjených hmotách nemožné. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u lepidel se slévárenským pískem. Ten se ukázal jako vhodnější náhrada křemičitého plniva než škvára, která měla

nepříznivý vliv na zpracovatelnost hmot v čerstvém stavu. Navíc bylo v případě malt obsahujících škváru dosaženo horších trvanlivostních a pevnostních charakteristik.

Závěrem lze podotknout, že veškeré stanovené cíle práce byly beze zbytku naplněny. V budoucích etapách výzkumu by bylo vhodné zaměřit se na zlepšení přídržnosti cementových lepidel po tepelném stárnutí, dále na studium dosud sledovaných vlastností hmot v delším časovém horizontu a pozornost by měla být taktéž zaměřena na ostatní podstatné materiálové charakteristiky lepicích hmot (doba zavadnutí, skluz aj.).

Seznam použitých zdrojů

- [1] BERGEROVÁ, Kamila. *Vývoj průmyslového lepidla pro ukládání nenasákavých prvků*. Brno, 2017, 75 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [2] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1982. Polytechnická knihovna (SNTL).
- [3] EBNESAJJAD, Sina a Cyrus EBNESAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. Second edition. Amsterdam: William Andrew, an imprint of Elsevier, 2014. ISBN 978-032-3264-358.
- [4] DROCHYTKA, Rostislav. *Keramické obklady a dlažby*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000. ISBN 80-900-8605-5.
- [5] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [6] SOKOLÁŘ, Radomír. *Technológia obkladania II: Obkladanie v interiéri*. Praha: Silikátový svaz, 2005, 75 s. ISBN 80-868-2109-9.
- [7] 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.
- [8] MA, Hongyan a Zongjin LI. Microstructures and mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms. *Construction and Building Materials*. 2013, **47**, 579-587.
- [9] AGGARWAL, L., P.C. THAPLIYAL a S.R. KARADE. Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsion. *Construction and Building Materials*. 2007, **21**(2), 379-383.
- [10] Polymer-modified mortars: Dow Construction Chemicals. In: *Concrete Construction* [online]. b.r. [cit. 2018-06-11]. Dostupné z: http://www.concreteconstruction.net/how-to/polymer-modified-mortars_o
- [11] ČSN EN 12004+A1. *Lepidla pro obkladové prvky - Požadavky, posuzování shody, klasifikace a označování*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [12] FELIXBERGER, J. *Polymer-modified thin-bed tile adhesives*. Augsburg: BASF SE, 2008.
- [13] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.

- [14] VAVŘÍN, František. *Maltoviny*. 3. vyd. Brno: skriptum VUT FAST, 1979.
- [15] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2015 [cit. 2018-04-25]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [16] WONG, Wei. *A Study on the Engineering and Durability Properties of Polymer Modified Mortar (PMM)*. 2016. PhD Thesis. UTAR.
- [17] KONG, Xiang-Ming, Chun-Chao WU, Yan-Rong ZHANG a Jiao-Li LI. Polymer-modified mortar with a gradient polymer distribution: Preparation, permeability, and mechanical behaviour. *Construction and Building Materials*. 2012, **38**, 195–203. ISSN 0950-0618.
- [18] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [19] PETERS, S.T. *Handbook of composites*. 2nd ed. London, 1998. ISBN 978-041-2540-202.
- [20] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [21] DROCHYTKA, Rostislav. *Plastické látky ve stavebnictví*. Brno: CERM, 1998. ISBN 80-214-1148-1.
- [22] ROTHON, R. *Particulate fillers for polymers*. Shawbury, U.K.: Rapra Technology, 2002. Rapra review reports, v. 12, no. 9.
- [23] WYPYCH, George. *Handbook of fillers*. 4rd ed. Toronto: ChemTec Pub, 2016. ISBN 978-1-895198-91-1.
- [24] PETRÁNEK, Vít a Gabriela MICHALCOVÁ. Vliv průmyslových odpadních materiálů na tepelnou odolnost polymerních správkových hmot. *Konstrukce* [online]. 2009, 2009 [cit. 2018-05-28]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-prumyslovych-odpadnich-materialu-na-tepelnou-odolnost-polymernich-spravkovych-hmot/>
- [25] ŽIŽKOVÁ, Nikol. Druhotné suroviny v systému hmot pro přípravu a úpravu povrchů. In: *XIII. mezinárodní symposium Sanace - sborník přednášek*. Brno: SSBK, 2003, s. 258. ISBN 1211- 3700.
- [26] SAIKIA, Nabajyoti a Jorge DE BRITO. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*. 2012, **34**, 385-401. ISSN 09500618.

- [27] TRHOŇ, Vojtěch. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*. b.r. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Kubíček.
- [28] MACHALICKÁ, K., P. POKORNÝ a M. VOKÁČ. Influence of the adhesive type and metal substrate on adhesion of bonded joints after salt spray test. *Koroze a ochrana materialu*. 2018, **62**(2), 54–64.
- [29] EBNEAJAD, Sina. *Adhesives technology handbook*. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2008. ISBN 08-155-1533-2.
- [30] AYDIN, Serdar. Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. *Fire Safety Journal*. 2008, **43**.
- [31] JENNI, Andreas,. Changes in Microstructures and Physical Properties of Polymer-modified Mortars during Wet Storage. *Cement and Concrete Research*. 2006, **36**(1), 79–90.
- [32] WETZEL, A.,. Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings. *Construction and Building Materials*. 2012, **37**, 335-348. ISSN 09500618.
- [33] VITEŠNÍKOVÁ, Anna. *Vlastnosti lepidel používaných v muzejní praxi*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Ivan Berger.
- [34] BRIŠ, Petr, Jiří KUBĚNA a Jan ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0247-1.
- [35] BENDA, J. *Keramické obklady a dlažby: [rady pro spokojené bydlení]*. Hradec Králové: Paradise Studio, 2002. ISBN 80-238-9138-3.
- [36] Construction/VINNAPAS: Shape the Future today with modern tile adhesives - Brochure 6226. In: *Wacker* [online]. b.r. [cit. 2018-06-09]. Dostupné z: https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6226_EN~1.pdf
- [37] DROCHYTKA, Rostislav a Radomír SOKOLÁŘ. Správná montáž keramických obkladů a dlažeb. In: *ABS-portal.cz: Odborný portál pro profesionály v oblasti stavebnictví* [online]. b.r. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/obklady-a-dlazby/spravna-montaz-keramickych-obkladu-a-dlaze>
- [38] KACHLÍK, Petr. *Vady v lepených spojích, jejich simulace a počítačové modelování*. Brno: Vysoké učení technické, 2008, 28 s. ISBN 978-80-214-3728-9. Dizertační práce [zkrácená verze]. VUT Brno.
- [39] KLOČUREK, Vladimír, Jan NEUSTUPNÝ a Jiří VALENTA. *EUTIT®: kámen nad ocel: 60 let výroby taveného čediče ve Staré Vodě = stone over steel: 60 years of cast basalt production in Stará Voda*. Stará Voda: EUTIT, s.r.o., 2011. ISBN 978-80-270-0490-4.

- [40] *Materia: global network in the area of innovative materials* [online]. b.r. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://materia.nl/material/basalt-tiles/>
- [41] *EUTIT s.r.o.: Dlaždice, kanalizace a potrubí z taveného čediče - EUTIT - slévárna čediče* [online]. 2010 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.eutit.cz/>
- [42] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 3. vyd. Praha, 2013 [cit. 2018-04-16]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>
- [43] *CEM I 52,5 R [Technický list]* [online]. b.r. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi525r>
- [44] MEYER, C. a S. BAXTER. *Use of recycled glass and fly ash for precast concrete, Final Report to New York State Energy Research and Development Authority*. NY: Albany, 1998, , 98–18.
- [45] ČSN EN 1348. *Malty a lepidla pro keramické obkladové prvky - Stanovení přídržnosti cementových malt tahovou zkouškou*. ÚNMZ, 2008.
- [46] ČSN EN 12004-2. *Lepidla pro keramické obkladové prvky - Část 2: Zkušební metody*. 2018.
- [47] ČSN EN 1015-10. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty*. 2000.
- [48] ČSN EN 1015-11. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. 2000.
- [49] M., DVOŘÁKOVÁ, ČERNÝ V., DROCHYTKA R., BYDŽOVSKÝ J., MELICHAR J. a KREJČÍ P. *EPV2B: Ošetření povrchu pro zvýšení chemické rezistence* [online]. 2016 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: http://thd.fce.vutbr.cz/prilohy/91_ta04010143-2016v003
- [50] HOBST, L., P. BÍLEK, O. ANTON a T. ZIKMUND. Sledování anomálního rozmístění drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha, b.r., 2014(3). ISSN 1213-3116.
- [51] KARASOVÁ, Alexandra a Andra NISTOR. Optická (světelná) mikroskopie. In: *FCHI - všcht* [online]. b.r. [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0043~8_eNDwtRSE3JLAEA.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vztah lepidla k lepenému materiálu [1]	14
Obrázek 2 Příklad úplného a neúplného smáčení povrchu [3]	15
Obrázek 3 Proces vytváření polymerního filmu [12]	20
Obrázek 4 Vytvrzovací reakce epoxidové pryskyřice (složka A) tvrdidlem (složka B) [12]	21
Obrázek 5 Vliv střídání vlhkého a suchého cyklu na pevnost lepeného spoje [32]	27
Obrázek 6 Lepicí hmota nanesená v tenké vrstvě pomocí zubové stěrky [36]	31
Obrázek 7 Pokládka dlažby na tekuté lože [37]	31
Obrázek 8 Vady vyskytující se ve vrstvě lepidla [38]	32
Obrázek 9 Čedičová dlažba s rozdílnou úpravou povrchu [40]	34
Obrázek 10 Drážkování pro zlepšení adheze – hrubé (vlevo) a jemné (vpravo) [41]	35
Obrázek 11 Substituce primárního plniva druhotnou surovinou	56
Obrázek 12 Nanesená vrstva malty na čedičovou dlaždicí pro stanovení přídržnosti k podkladu	57
Obrázek 13 Nalepené terče k vrstvě malty před stanovením počáteční přídržnosti k podkladu	58
Obrázek 14 Stanovený obsah druhotných surovin v jednotlivých recepturách pro pokročilé testování	61
Obrázek 15 Digitální optický mikroskop VHX-950F	64
Obrázek 16 Porovnání zkušebních těles po expozici chemicky agresivního prostředí roztoku kyseliny sírové	68
Obrázek 17 Snímky CT pro recepturu s 15% náhradou výchozí plniva slévárenským pískem (vlevo – příčné řezy, vpravo – podélný řez vzorkem)	70
Obrázek 18 Snímky CT pro recepturu s úplnou náhradou výchozího plniva škvárou (vpravo – příčné řezy, vlevo – podélný řez vzorkem)	71
Obrázek 19 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici referenční hmoty s křemičitým pískem	72
Obrázek 20 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot se 100% obsahem škváry	73
Obrázek 21 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 25% obsahem škváry	73
Obrázek 22 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot se 75% obsahem sl. písku	74
Obrázek 23 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 15% obsahem sl. písku	74
Obrázek 24 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 50% obsahem popílku	75
Obrázek 25 Snímky před (vlevo) a po (vpravo) expozici u hmot s 10% obsahem popílku	75

Seznam grafů

Graf 1 Křivky zrnitosti dle Fullera pro $D_{\max} = 1 \text{ mm}$	49
Graf 2 Počáteční přídržnost k podkladu	59
Graf 3 Souhrnné výsledné hodnoty počáteční přídržnost k podkladu	59
Graf 4 Výsledné hodnoty přídržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících škváru.....	66
Graf 5 Výsledné hodnoty přídržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících slévárenský písek	66
Graf 6 Výsledné hodnoty přídržnosti k podkladu u lepicích hmot obsahujících popílek.....	67
Graf 7 Souhrnné výsledky přídržnosti k podkladu všech zkoušených receptur	67
Graf 8 Objemové hmotnosti vybraných testovacích hmot.....	68
Graf 9 Pevnost v tahu za ohybu vybraných testovacích hmot.....	69
Graf 10 Pevnost v tlaku vybraných testovacích hmot.....	69

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení jednotlivých druhů lepicích hmot [4].....	16
Tabulka 2 Označení lepicích hmot [11].....	18
Tabulka 3 Porovnání lepicích hmot [12]	18
Tabulka 4 Lepicí hmoty používané na základě savosti materiálů [1]	25
Tabulka 5 Specifikace jednotlivých druhů podkladů a vhodných spojovacích hmot [4].....	29
Tabulka 6 Porovnání vlastností přírodního a taveného čediče [39]	33
Tabulka 7 Požadavky na vyvíjené lepicí hmoty na silikátové bázi [1]	44
Tabulka 8 Požadavky na vyvíjené lepicí hmoty na bázi reaktivních pryskyřic [1]	44
Tabulka 9 Vybrané produkty lepicích hmot do náročných podmínek dostupných v ČR a jejich báze...45	
Tabulka 10 Cenové srovnání vybraných lepicích hmot do náročných podmínek k roku 2018.....	46
Tabulka 11 Chemické složení CEM I 52,5 R Mokrý [43].....	48
Tabulka 12 Fyzikální a mechanické vlastnosti [43]	48
Tabulka 13 Škvára – údaje	51
Tabulka 14 Slévárenský písek – údaje.....	52
Tabulka 15 Popílek Tušimice – údaje	53
Tabulka 16 Základní materiálové složení lepicí hmoty na silikátové bázi.....	55
Tabulka 17 Procentuální náhrada primárního plniva druhotným a označení receptur	56
Tabulka 18 Možné typy porušení při stanovení přídržnosti.....	58
Tabulka 19 Procentuální náhrada primárního plniva druhotným a označení receptur	62
Tabulka 20 Souhrnné výsledné hodnoty přídržnosti k podkladu.....	65
Tabulka 21 Rozhodující kritéria při optimalizačním výpočtu	76
Tabulka 22 Výpočet váhy - Sattiho matice.....	77
Tabulka 23 Rozhodovací matice	77
Tabulka 24 Výpočtová matice	78