



**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 VYSOCE ODOLNÉHO KOMPOZITU S VYUŽITÍM  
DRUHOTNÝCH SUROVIN A TAVENÉHO ČEDIČE**

DEVELOPMENT OF HIGHLY RESISTANT COMPOSITE USING SECONDARY RAW MATERIALS AND  
CAST BASALT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Pavel Černý**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

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

**BRNO 2019**



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                        |                                                                                 |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Student</b>         | Bc. Pavel Černý                                                                 |
| <b>Název</b>           | Vývoj vysoce odolného kompozitu s využitím druhotných surovin a taveného čediče |
| <b>Vedoucí práce</b>   | prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA                                       |
| <b>Datum zadání</b>    | 31. 3. 2018                                                                     |
| <b>Datum odevzdání</b> | 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 13892-2 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku
- ČSN EN 13892-3 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme
- ČSN EN 993-16 - Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 16: Stanovení odolnosti proti kyselině sírové
- ČSN EN 933-1 - Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor
- MATYKIEWICZ D., BARCZEWSKI M., KNAPSKI D., SKÓRCZEWSKA K. Hybrid effects of basalt fibers and basalt powder on thermomechanical properties of epoxy composites, Composites Part B: Engineering, Volume 125, 2017, Pages 157-164, ISSN 1359-8368,
- KHOISTRAVI H., ESLEAMI-FARSANI R. Enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na<sup>+</sup>-montmorillonite nanoclay, Polymer Testing, Volume 55, P. 135-142, ISSN 0142-9418
- BRANSTON J, DAS S., KENNO S. Y., TAYLOR, C. Mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials, Volume 124, P. 878-886, ISSN 0950-0618,
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci řešení diplomové práce bude vyvinut vysoce odolný kompozit se zastoupením druhotných surovin, který se svými vlastnostmi bude snažit co nejvíce přiblížit vlastnostem prvků z taveného čediče. Nový materiál bude na bázi cementových nebo polymerních pojiv, jenž umožní výrobu mechanicky a chemicky vysoce odolného prvku. Nově vyvinutý kompozit bude posléze možné aplikovat do kanalizací a chemických provozů.

1. Proveďte zhodnocení současného stavu poznání v oblasti produkce materiálů z taveného čediče, popište jejich výrobu a vlastnosti.
2. Najděte na trhu alternativní dostupné materiály s obdobnými vlastnostmi jako materiály z taveného čediče a porovnejte.
3. Definujte požadavky na zásadní vlastnosti nově vyvíjených kompozitních materiálů a s ohledem na tyto požadavky navrhněte vhodné silikátové a polymerní báze pro výrobu vysoce odolných kompozitních materiálů.
4. Navrhněte široké spektrum potenciálně vhodných plniv s důrazem na využití druhotných surovin.
5. Stanovte vlastnosti uvažovaných plniv (zrnitost, tvrdost, stlačitelnost, nutnost předúpravy atd.) a na základě optimalizace získaných výsledků zvolte ideální typy pro další testování.
6. Stanovte optimální křivky zrnitosti plniv pro výrobu vysoce odolného kompozitu.
7. Sestavte receptury vysoce odolných kompozitních materiálů s podílem druhotných surovin vhodných pro aplikaci do kanalizací a chemických provozů.
8. Stanovte optimální postup přípravy a zpracování směsi při výrobě nových materiálů včetně případného tepelného ošetření.
9. Navrhněte soubor laboratorních zkoušek pro ověření vlastností nově vyvinutých materiálů, zejména pevnosti v tlaku a tahu za ohybu, odolnosti proti ohrusu, chemické a teplotní odolnosti.
10. Za použití nejmodernějších laboratorních technologií experimentálně ověřte vlastnosti nově vyvinutých receptur vysoce odolného kompozitu a porovnejte je s vlastnostmi výrobků z taveného čediče.
11. Zhodnoťte nově vyvinuté materiály z technického, ekonomického i ekologického hlediska

## 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**

Diplomová práce se zabývá vývojem vysoce odolného kompozitu, který se svými vlastnostmi přiblíží výrobkům z taveného čediče. Tento fakt umožní substituci čedičových prvků v náročných prostředích jejich expozice nově vyvíjeným materiálem a doplní jejich výrobkovou řadu. Vysoce odolný kompozit obsahuje ve svém materiálovém složení rovněž druhotné suroviny v co nejvyšší možné míře. Vyvíjený kompozit vykazuje vysoké pevnosti, odolnost vůči obrušování a také je chemicky odolný vůči chemicky agresivnímu prostředí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tavený čedič, vlastnosti taveného čediče, kanalizační stoky, vysokopevnostní beton, vysoce odolný kompozit

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with development of high resistant composite, which brings its properties closer to the melted basalt products. This fact will allow substitution of basalt elements in hostile chemical environment by newly developed material and completes its product line. High resistant composite also consists of secondary raw material in highest possible amount. Material that is being evolved carries high strength, abrasion resistance and is also resistable in hostile chemical environment.

## **KEYWORDS**

Melted basalt, properties of melted basalt, sewage sewers, high strength concrete, highly resistant composite

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Pavel Černý *Vývoj vysoce odolného kompozitu s využitím druhotných surovin a taveného čediče*. Brno, 2019. 142 s., 142 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj vysoce odolného kompozitu s využitím druhotných surovin a taveného čediče* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

---

Bc. Pavel Černý  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vývoj vysoce odolného kompozitu s využitím druhotných surovin a taveného čediče* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

---

Bc. Pavel Černý  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu prof. Ing. Rostislavu Drochytkoví, CSc., MBA za odborné rady a připomínky, které mi poskytl při zpracování diplomové práce. Mé poděkování patří také panu Ing. Jindřichu Melicharoví, Ph.D. za odbornou pomoc a poskytnutí materiálů a informací potřebných pro vypracování této závěrečné práce.

Předložená práce byla zpracována v rámci řešení projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15\_019/0004734 - Výzkum a vývoj mechanicky a chemicky odolných kompozitů na bázi cementových a necementových pojiv a druhotných surovin.

# Obsah

|           |                                                                          |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>ÚVOD .....</b>                                                        | <b>13</b> |
| <b>I.</b> | <b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>                                             | <b>14</b> |
| <b>1</b>  | <b>TAVENÝ ČEDIČ JAKO MATERIÁL .....</b>                                  | <b>14</b> |
| 1.1       | Obecné poznatky o čediči .....                                           | 14        |
| 1.2       | Historie tavení hornin .....                                             | 14        |
| 1.3       | Vlastnosti taveného čediče .....                                         | 15        |
| 1.4       | Proces výroby taveného čediče .....                                      | 17        |
| 1.5       | Čedičové výrobky a jejich použití .....                                  | 18        |
| 1.5.1     | Dlaždice .....                                                           | 19        |
| 1.5.2     | Trouby .....                                                             | 22        |
| 1.5.3     | Žlaby .....                                                              | 22        |
| 1.5.4     | Ostatní čedičové výrobky .....                                           | 23        |
| 1.5.5     | Shrnutí použití taveného čediče v praxi s ohledem na místo použití ..... | 28        |
| <b>2</b>  | <b>Prostředí kanalizačních stok .....</b>                                | <b>30</b> |
| 2.1       | Druhy odpadních vod a látky nepřipustné pro kanalizační stoky .....      | 30        |
| 2.1.1     | Nepřipustné látky pro kanalizace .....                                   | 30        |
| 2.1.2     | Druhy odpadních vod .....                                                | 30        |
| 2.2       | Řešení stokových soustav podle způsobu odvádění odpadních vod .....      | 32        |
| 2.2.1     | Jednotná soustava stok .....                                             | 32        |
| 2.2.2     | Oddílná soustava stok .....                                              | 32        |
| 2.3       | Dělení stok podle hnací síly .....                                       | 32        |
| 2.3.1     | Gravitační kanalizace .....                                              | 32        |
| 2.3.2     | Tlaková kanalizace .....                                                 | 34        |
| 2.3.3     | Podtlaková kanalizace .....                                              | 34        |
| 2.3.4     | Pneumatická kanalizace .....                                             | 34        |
| 2.4       | Objekty kanalizační stoky .....                                          | 35        |
| 2.4.1     | Vstupní šachty .....                                                     | 35        |
| 2.4.2     | Spojné šachty .....                                                      | 36        |
| 2.4.3     | Rozdělovací šachty .....                                                 | 36        |
| 2.4.4     | Spadiště a skluzy .....                                                  | 36        |
| 2.4.5     | Dešťové vpusti .....                                                     | 37        |
| 2.4.6     | Domovní přípojky .....                                                   | 38        |
| 2.4.7     | Odlehčovací komory .....                                                 | 38        |
| <b>3</b>  | <b>Vysokohodnotné betony a jejich vlastnosti .....</b>                   | <b>39</b> |
| 3.1       | HSC – vysokopevnostní betony .....                                       | 39        |
| 3.2       | HPC – vysokohodnotný beton .....                                         | 39        |
| 3.3       | VHPC – velmi vysokohodnotný beton .....                                  | 40        |

|            |                                                                                                                               |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4        | UHPC – ultra vysokohodnotný beton.....                                                                                        | 40        |
| 3.4.1      | Materiálové složení UHPC:.....                                                                                                | 41        |
| 3.4.2      | Výroba a použití UHPC .....                                                                                                   | 43        |
| 3.5        | RPC (Reactive Powder Concrete) .....                                                                                          | 44        |
| <b>4</b>   | <b>Vliv propařování .....</b>                                                                                                 | <b>45</b> |
| <b>5</b>   | <b>Zhodnocení výsledků současného stavu poznání kompozitu .....</b>                                                           | <b>46</b> |
| 5.1        | Obecný popis současného stavu kompozitu.....                                                                                  | 46        |
| 5.2        | Složení receptur použitých pro vyvíjený kompozit v prvotním vývoji .....                                                      | 46        |
| 5.2.1      | Epoxidová báze.....                                                                                                           | 46        |
| 5.2.2      | Cementová báze.....                                                                                                           | 47        |
| 5.2.3      | Polymercementová báze.....                                                                                                    | 47        |
| 5.3        | Zkoušení materiálových vlastností při dosavadním výzkumu kompozitu.....                                                       | 47        |
| 5.3.1      | Pevnost v tahu za ohybu.....                                                                                                  | 48        |
| 5.3.2      | Pevnost v tlaku.....                                                                                                          | 49        |
| 5.3.3      | Tvrdost povrchu.....                                                                                                          | 49        |
| 5.3.4      | Odolnost proti teplotním šokům .....                                                                                          | 50        |
| 5.4        | Souhrnné shrnutí materiálových vlastností současného stavu poznání .....                                                      | 50        |
| <b>II.</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                                                                                                   | <b>52</b> |
| <b>6</b>   | <b>CÍL PRÁCE.....</b>                                                                                                         | <b>52</b> |
| <b>7</b>   | <b>METODIKA ŘEŠENÍ.....</b>                                                                                                   | <b>53</b> |
| <b>8</b>   | <b>ETAPA 1 – Identifikace potenciálních pojiv a plniv na základě požadovaných vlastností pro nově vyvíjený kompozit .....</b> | <b>59</b> |
| 8.1        | Analýza možných vstupních surovin.....                                                                                        | 59        |
| 8.2        | Pojivová složka.....                                                                                                          | 59        |
| 8.2.1      | Silikátová pojiva .....                                                                                                       | 60        |
| 8.2.2      | Polymerní pojiva.....                                                                                                         | 60        |
| 8.3        | Plnivová složka.....                                                                                                          | 61        |
| 8.3.1      | Primární plniva .....                                                                                                         | 61        |
| 8.3.2      | Druhotná plniva .....                                                                                                         | 63        |
| 8.4        | Optimalizace a výběr vstupních surovin.....                                                                                   | 68        |
| 8.5        | Chemické složení, granulometrie a nutnost předúpravy vybraných plniv.....                                                     | 70        |
| 8.5.1      | Čedičové odkapy.....                                                                                                          | 70        |
| 8.5.2      | Šamotová drť .....                                                                                                            | 72        |
| 8.5.3      | Korund.....                                                                                                                   | 75        |
| 8.5.4      | Baryt.....                                                                                                                    | 79        |
| 8.6        | Shrnutí etapy 1.....                                                                                                          | 81        |
| <b>9</b>   | <b>ETAPA 2 – Návrh prvotních receptur a volba vhodné křivky zrnitosti .....</b>                                               | <b>83</b> |
| 9.1        | Vliv křivky zrnitosti na vlastnosti kompozitu .....                                                                           | 83        |

|           |                                                                                                                                |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.2       | Plnění nově vyvíjeného kompozitu .....                                                                                         | 85         |
| 9.3       | Charakteristika prvotních receptur .....                                                                                       | 85         |
| 9.4       | Ověření fyzikálně – mechanických vlastností prvotních receptur .....                                                           | 86         |
| 9.5       | Optimalizace výsledků receptur .....                                                                                           | 91         |
| 9.6       | Stanovení optimální křivky zrnitosti plniv.....                                                                                | 96         |
| 9.6.1     | Vhodná křivka zrnitosti plniv pro silikátový kompozit .....                                                                    | 96         |
| 9.6.2     | Vhodná křivka zrnitosti plniv pro polymerní kompozit.....                                                                      | 96         |
| 9.7       | Shrnutí etapy 2.....                                                                                                           | 97         |
| <b>10</b> | <b>ETAPA 3 – Vývoj nového vysoce odolného kompozitu.....</b>                                                                   | <b>98</b>  |
| 10.1.1    | Výroba nového kompozitu na silikátové bázi .....                                                                               | 98         |
| 10.1.2    | Výroba nového kompozitu na polymerní bázi .....                                                                                | 98         |
| 10.2      | Chemická odolnost nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu na silikátové bázi .....                                           | 99         |
| 10.3      | Stanovení vlivu propařování na nově vyvíjený vysoce odolný kompozit ....                                                       | 100        |
| 10.4      | Shrnutí etapy 3 - formulace optimální přípravy nově vyvinutého kompozitu                                                       | 104        |
| <b>11</b> | <b>ETAPA 4 – Vlastnosti a návrh složení finálních receptur pro vyvíjený kompozit .....</b>                                     | <b>105</b> |
| 11.1      | Vlastnosti navrhovaných receptur .....                                                                                         | 106        |
| 11.2      | Optimalizace finálního složení nejvhodnějších receptur .....                                                                   | 106        |
| 11.3      | Shrnutí etapy 4.....                                                                                                           | 109        |
| <b>12</b> | <b>ETAPA 5 – Experimentální ověření vlastností vysoce odolného kompozitu</b>                                                   | <b>110</b> |
| 12.1      | Zhotovení zkušebních těles .....                                                                                               | 110        |
| 12.1.1    | Silikátové receptury .....                                                                                                     | 110        |
| 12.1.2    | Polymerní receptury .....                                                                                                      | 112        |
| 12.2      | Experimentální ověření nejdůležitějších parametrů nově vyvíjeného kompozitu na základě požadavků materiálových vlastností..... | 114        |
| 12.2.1    | Stanovení objemové hmotnosti.....                                                                                              | 114        |
| 12.2.2    | Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnost v tlaku .....                                                                     | 117        |
| 12.2.3    | Stanovení odolnosti proti obruš (obrusnost metodou Böhme) .....                                                                | 119        |
| 12.2.4    | Sledování mikrostruktury pomocí optického mikroskopu .....                                                                     | 121        |
| 12.3      | Shrnutí etapy 5 - zhodnocení dosavadních výsledků experimentálního ověření kompozitu .....                                     | 122        |
| <b>13</b> | <b>ETAPA 6 - Souhrn vlastností nově vyvinutého kompozitu.....</b>                                                              | <b>124</b> |
| 13.1      | Vyhodnocení výsledků laboratorních zkoušek vysoce odolného kompozitu                                                           | 124        |
| 13.2      | Stanovení nejlépe vyhovujícího složení kompozitu .....                                                                         | 125        |

|           |                                                                                                |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.3      | Shrnutí etapy 6 - Porovnání hodnot vysoce odolného kompozitu s hodnotami taveného čediče ..... | 126        |
| <b>14</b> | <b>Závěr .....</b>                                                                             | <b>128</b> |
|           | <b>Seznam použité literatury .....</b>                                                         | <b>131</b> |
|           | <b>Seznam tabulek .....</b>                                                                    | <b>136</b> |
|           | <b>Seznam obrázků .....</b>                                                                    | <b>139</b> |

# 1 ÚVOD

Kompozitní materiály jsou ve stavebnictví velmi diskutované téma, kterým by se tento obor mohl v budoucnu ubírat. Nové možnosti užívaných materiálů umožňují tvorbu odolnějších a vyspělejších produktů, které dokáží vzdorovat mnoha vlivům prostředí. V současné době hraje velkou roli u výroby také cena, kterou lze redukovat použitím druhotného materiálu.

Hlavním uvažovaným prostředím aplikace pro vysoce odolný kompozit v rámci testování v diplomové práci jsou kanalizační stoky. Materiál by měl mít především dlouhodobou životnost nebo trvanlivost, která bude postavena na základních důležitých aspektech. Jedná se o velmi dobré mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti kompozitu.

Jako prioritní hledisko je brána pevnost, která je u nahrazovaného materiálu (taveného čediče) na vysoké úrovni. Mezi další aspekty jednoznačně patří odolnost vůči chemikáliím a také odolnost proti obrušování. Dvě poslední hlediska mají významnou roli u kanalizačních stok vzhledem k výskytu látek, které se v tomto prostředí nachází.

Samotný tavený čedič je získán tavením přírodní horniny v šachtových pecích. Mezi jeho primární vlastnosti jsou brány: vysoká tvrdost, pevnost, chemická odolnost a také vysoká ošetrivost. Z taveného čediče jsou vyráběny tvarovky, trouby, žlaby a další čedičové výrobky.

Spektrum materiálů, které jsou brány jako druhotné suroviny, se v poslední době velmi rozšiřuje. V současném stavu poznání kompozitu byly čedičové odkapy, které vykazují obdobné vlastnosti jako tavený čedič, ze kterého jsou vyrobeny produkty užívané v kanalizačních stokách. I nadále tento druhotný materiál bude v hledáčku uvažovaných plniv pro výrobu vysoce odolného kompozitu. Avšak je velké množství alternativ, které mohou být použity.

Cílem diplomové práce je vývoj vysoce odolného kompozitu, který by se dokázal přiblížit svými materiálovými vlastnostmi produktům vyrobeným z taveného čediče při použití v prostředí kanalizačních stok. Diplomová práce je pokračováním vývoje kompozitu, který byl zpracován v bakalářské práci obhajované v červnu roku 2017.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## **1 TAVENÝ ČEDIČ JAKO MATERIÁL**

### **1.1 Obecné poznatky o čediči**

Čedič je brán v jako jedna z nejtvrdějších hornin. Je možné jej využít pro slévárenské zpracování, ale také i v průmyslovém odvětví. Z ekologického hlediska se řadí mezi velmi šetrné materiály. Jeho technologie výroby nezatěžuje prostředí tolik jako výroba jiných materiálů. I po stránce emisí technologického zpracování vykazuje dobré hodnoty, které jsou zanedbatelné. V případě, že při zpracování přijde člověk do kontaktu s tímto materiálem, nemusí mít vůbec žádné obavy, neboť jde absolutně zdravotně nezávadný materiál. Platí to i při dlouhodobějším kontaktu. Při měření radioaktivity se ukázal čedič jako neškodný, jelikož obsah množství přírodních radionuklidů je minimální. [1]

### **1.2 Historie tavení hornin**

Jako první zkoušel tavit čedič pan D'Arcet na konci 18. století. Jeho pokus tavení čediče v peci na vypalování porcelánu dopadl tak, že získal černé sklo. Od té doby se pokoušelo o tavení čediče spousta dalších.

Hned na začátku 19. století zjistil Skot J. Hall, že teplota tavení čediče je velmi podobná teplotě tavení litiny. Tímto tavením mu vznikla pohyblivá tavenina, kterou zkusil prudce ochladit. Výsledkem bylo vzniklé sklo, které rozpraskalo. Při pokusu o pomalé ochlazení se mu z jeho experimentu vytvořila hmota, která spíše připomínala kámen s krystalickými strukturami. [1]

Další osobou, která se pokoušela o pokrok v tomto odvětví, byl další Skot G. Watt. Watt se snažil taveninu ochlazovat pomalým způsobem po dobu osmi dní pod vrstvou hořícího uhlí. Tímto postupem docílil větší krystalizace, kdy na povrchu byla vrstva černého skla. Pod vrstvou skla se vytvořily šedé kuličky. Hlouběji pak tavenina dosáhla až zrnitého charakteru a utvořily se v ní krystalické destičky. [1]

Významným badatelem tavení čediče se stal koncem 19. století také Francouz Ribbé, který se pokusil o tavení čediče pro praktické účely, jelikož zpozoroval, že přírodní čediče dosahují vysoké mechanické odolnosti. Jeho nápadem bylo, že čedič zkusí roztavit

na taveninu, kterou odleje do forem požadovaných tvarů. Výsledky ze svého zkoumání si nechal patentovat.

Počátkem 20. století byla v Paříži založena společnost Compagnie Générale du Basalte a po skončení první světové války byla roku 1923 zahájena produkce, která dosahovala deset tun výrobků za den. [1]

I v Německu se začala starat o tavení čediče firma Basalt A. G., ke které roku 1928 přibyla sesterská společnost Schmelzbasalt A. G., jejíž produkcí byly především otěruvzdorné a korozivzdorné odlitky. Kapacita produkce této německé firmy byla kolem třiceti tun za den. Tavení čediče se rozšířilo i do Sovětského svazu, kde se používal k tavení diabas a produkce tavení činila 25 tun za den. Výrobu zde reprezentovaly kyselinovzdorné odlitky. [1]

Tavením hornin se začali zabývat i v Československu, zejména pak po druhé světové válce. Technologický postup byl vypracován v roce 1950, samotná výroba byla spuštěna v roce 1951. První firmou na našem území byl závod Stará Voda u Mariánských Lázní. Byly užívány čediče Libochovany a Brehy, ale nakonec se přešlo k používání olivinického čediče Slapany. Československý závod disponoval produkcí okolo deseti tun denně. Na Slovensku vznikl závod v Nové Bani, jehož produkce byla obdobná té československé. Čedič, který byl zpracováván v Nové Bani, byl z blízké lokality Brehy. [1]

Zkušenosti z výroby v Československu využili v sousedním Polsku, jmenovitě ve Starachowicích, kde byl roku 1955 zahájen běžný provoz.

Mezi hlavní světové producenty mohou být řazeny následující státy: Česká republika, Polsko, Indie a Čínská lidová republika. [1]

### **1.3 Vlastnosti taveného čediče**

Tavený čedič je tvořen několika základními minerály, kterými jsou monoklinické a rombické pyroxeny, sferolitické a dendritické struktury. V menší míře pak obsahuje tavený čedič i následující minerály: magnetit, olivín a zbytkovou skelnou fázi. [1]

Z hlediska chemického složení jsou zastoupeny oxidů uvedené v tabulce:

**Tabulka 1:** Tavený čedič z pohledu chemického složení [1]

| Zastoupení oxidů               | % hmotnostní |
|--------------------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 42 – 46      |
| TiO <sub>2</sub>               | 2,0 – 3,5    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11 – 13      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 – 6        |
| FeO                            | 5 – 10       |
| MgO                            | 8 – 11       |
| CaO                            | 10 – 12      |
| Na <sub>2</sub> O              | 2 – 3        |
| K <sub>2</sub> O               | 1 – 2        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,5 – 1,0    |

Radioaktivita u taveného čediče vykazuje následující naměřené hodnoty: pro Ra226  $13,1 \pm 2,4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pro Th228  $20,8 \pm 3,4 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Hodnoty, kterých tavený čedič při tomto měření dosáhl, jsou srovnatelné s běžnými betony. Stejně jako u běžného betonu, hodnoty čediče splňují podmínky pro použití ve výstavbě nebo přestavbě budov, které zahrnují pobytové místnosti. [1]

Velmi užitečný je tavený čedič při použití v zemědělství i potravinářské výrobě, zejména na základě své vysoké chemické odolnosti a také nulové nasákavosti. Další výjimečnou vlastností je mrazuvzdornost, která je velmi vysoká u taveného čediče. Nedochází k porušení ani po padesáti cyklech při střídání teploty od -15 °C do +15 °C. Mrazuvzdornost taveného čediče je na obdobné úrovni jako u keramických obkladových prvků. [1, 2]

Dalšími výbornými vlastnostmi jsou: vysoká otěruvzdornost, vysoká tvrdost, vysoká pevnost a výborná chemická odolnost.

Chemická odolnost je na tak vysokém stupni, že předstihne kovové i cementové materiály. Vykazuje výbornou odolnost v silných anorganických kyselinách. Lepší odolnost v tomto prostředí mají už jen korundové materiály, chemicky odolné sklo

a karbid křemíku. Srovnatelných, ale občas i lepších hodnot oproti již zmíněným materiálům dosahuje tavený čedič v prostředí alkalických roztoků. [1]

Nejvhodnější surovinou pro výrobu čedičových odlitků jsou středně kyselé olivinické čediče. Tyto čediče obsahují okolo 42 až 46 %  $\text{SiO}_2$ . Dále obsahuje určité množství magnetitu, olivínu, augitu a plagioklasu. Zbytek tvoří anizotropní mezostáze. Chemické složení taveného čediče je identické se surovinou, z čehož plyne, že tavený čedič obsahuje magnetit, olivín, romboické a monoklinické pyroxeny, zbytek plagioklasu a také amfibolu. [1]

**Tabulka 2:** Přehled vybraných vlastností taveného čediče [1]

| Přehled vlastností materiálu     |                             | Hodnota taveného čediče                                |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Objemová hmotnost                |                             | 2900 – 3000 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]          |
| Nasákavost                       |                             | 0 [% hmot.]                                            |
| Porezita skutečná                |                             | 1 – 3 [% obj.]                                         |
| Pevnost v tlaku                  |                             | 450 [MPa]                                              |
| Pevnost v ohybu                  |                             | 40 [MPa]                                               |
| Tepelná vodivost                 |                             | 1,9 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] |
| Chemická odolnost                | 70% $\text{H}_2\text{SO}_4$ | 9 [% obj.]                                             |
|                                  | 1% NaOH                     | 1,5 [% obj.]                                           |
| Tvrdost dle Mohse                |                             | 8                                                      |
| Obrusnost DIN 52108              |                             | max. 5 [ $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ]               |
| Odolnost proti opotřebení EN 102 |                             | max. 110 [ $\text{mm}^3$ ]                             |

## 1.4 Proces výroby taveného čediče

Jako výrobek z taveného čediče může být považován odlitek, který vzniká nejprve roztavením, následným vytvarováním a v posledním kroku vychlazením vyhovujících přírodních hornin. Používají se nejčastěji pro tento proces olivinické čediče. [1]

Samotné tavení čedičové suroviny probíhá v šachtových pecích. Teplota tavení taveného čediče je stanovena na 1280 °C. Roztavená tavenina je odlévána buď staticky nebo dynamicky. Staticky je to prováděno do pískových nebo kovových forem. Kovové

formy se nazývají kokily. Dynamické lití je při výrobě trub a je prováděno do rotujících kokil.

Doba chlazení je závislá na druhu odlitku. Odlitky jsou vyndány z forem a jejich další část chlazení probíhá v tunelových chladících pecích. Po ochlazení vyrobených výrobků následuje kontrola, třízení a skladování. [1]



***Obrázek 1:** Tunelová chladící pec [3]*

## **1.5 Čedičové výrobky a jejich použití**

Použití čedičových výrobků je opravdu velké, jelikož je využíváno především v průmyslu vysoké otěruvzdornosti při dopravě a následném skladování abrazivních materiálů. S využitím vysoké pevnosti lze počítat například u mechanicky namáhaných skluzech. A v neposlední řadě chemická odolnost, která umožňuje použití výrobků z taveného čediče v oblastech, kde dochází k manipulaci s chemikáliemi, kyselinami a dalšími agresivními látkami. [1]

Možné druhy čedičových výrobků jsou velmi hojně využívány. Především jako dlaždice, trouby, tvarovky, žlaby, oblouky, přechody, T-kusy a Y-kusy. Dalšími možnými čedičovými výrobky jsou poté radiální desky, cyklony, kanalizační cihly, kantovky a klíny a také speciální dlažba SKID-PAN [1]

Vyrobené produkty, které vznikly tavením čediče, můžeme rozdělit do 3 skupin: staticky lité odlitky do kovových forem (kokil), odstředivě lité trouby a ostatní odlitky lité do pískových forem. [1]

### 1.5.1 Dlaždice

Dlažby na základě použití můžeme rozdělit na:

1. průmyslové,
2. interiérové,
3. protiskluzné,
4. variabilní,
5. atypické. [4]

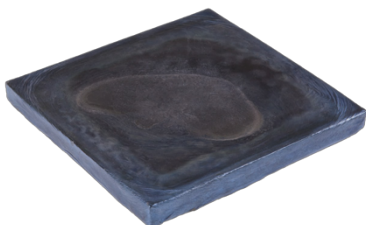
Dlaždice vznikají roztavením horniny a následným odlitím taveniny do kovových forem (kokil). Využití čedičové dlažby je mnohostranné, dá se využít v interiérech, halách obytných domů, restauracích, prodejnách, autosalonech a podlahy zdravotnických zařízení. Dále jsou využívány u podlah potravinářských provozů. Potravinářskými provozy lze chápat mlékárny, pekárny, pivovary, vinné sklepy. Další použití dlažby je u podlah průmyslových provozů, žlabů a tvarovek [1, 4]

Ve zdravotnických zařízeních a potravinářských provozech je možno dlažbu použít vzhledem k její hygienické nezávadnosti a nulové nasákavosti. Žlaby a tvarovky jsou nejčastěji používány pro kanalizace a čistírny odpadních vod. V průmyslových provozech jsou využity dlaždice z důvodu, jelikož jsou tyto místa chemicky a mechanicky namáhané. [1, 4]

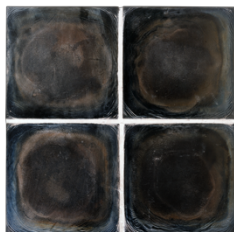


**Obrázek 2:** Čedičová podlaha v průmyslovém provozu [4]

Pravouhlé dlaždice mají obvykle rozměry  $200 \times 200 \times 30$  mm a odlévají se do kovových forem. Tloušťka dlaždic také může být 18, 20, 22, 25, 40, 50 mm a někdy dokonce 60 mm. V plošných rozměrech mohou být tyto dlaždice  $300 \times 400$  mm. [1]



**Obrázek 3:** Klasická dlaždice o rozměru  $200 \times 200 \times 30$  mm [4]



**Obrázek 4:** Pohled na pravouhlé čedičové dlaždice [4]

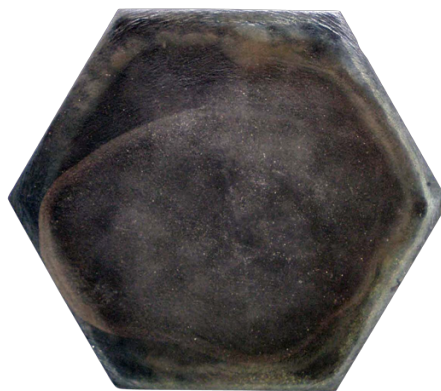


**Obrázek 5:** Protiskluzová dlaždice z taveného čediče [4]

Druhým typem jsou půlové dlaždice, které se odlévají taktéž do kovových forem o rozměrech  $100 \times 200$  a  $125 \times 250$  mm. Dalším hojně využívaným typem jsou šestihranné dlaždice, které jsou zhotovovány v obdobných tloušťkách jako pravouhlé dlaždice. Jejich poloměr opsané kružnice je 100 mm a 125 mm. [1]



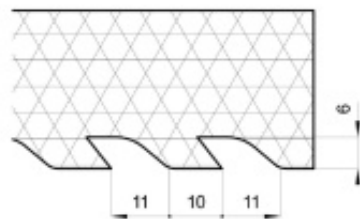
**Obrázek 6:** Pohled na poskládané šestihranné dlaždice [4]



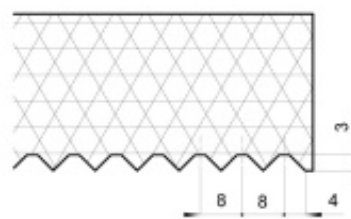
**Obrázek 7:** Klasická šestihranná dlaždice [4]

Dlaždice jsou produkovány s hladkým povrchem, ale i protiskluzové. Z důvodu lepší přilnavosti jsou na rubové straně opatřeny rastrováním. Rozlišujeme především 3 základní druhy rubové strany:

1. s hrubým drážkováním – značí se R,
2. s jemným drážkováním – značí se JR,
3. bez rastrování (hladké) – značí se H. [4]



**Obrázek 8:** Profilový pohled na dlaždici s hrubým rýhováním [4]



**Obrázek 9:** Profilový pohled na dlaždici s jemným rýhováním [4]

Dlaždice s hrubým drážkováním mohou být pokládány do lůžka z betonové směsi, která musí být zavlhlá. Druhý způsob je lepení tmelem. Betonový podklad musí být očištěný, vyztužený a soudržný. Obvykle jsou dlaždice s hrubým drážkováním používány v průmyslových provozech, zejména na dlažby určené pro šikmé a svislé plochy zásobníků. Kategorie dlaždic s jemným drážkováním se lepí tmelem stejně jako první typ na očištěný, vyztužený a soudržný podklad z betonu. Na tento typ je možné použít i speciálních lepidel a tmelů. Dlaždice s jemným drážkováním jsou využívány na podlahy. Poslední kategorií jsou hladké dlaždice, které jsou lepeny malou tloušťkou lepidla. Tento typ není používán často. [4]

Při pokládání dlaždic dojde nejdříve k očištění od prachu. V následujícím kroku je dlaždice pokládána do maltové lože, nebo do lože ze zavlhlé betonové směsi. Při lepení musí být lepidlo nanášeno na celou plochu podkladu.

Dlaždice jsou řezány pomocí diamantových pil. Řezání je doprovázeno intenzivním chlazením, které je prováděno vodou. Používají se diamantové segmentové kotouče. [4]



**Obrázek 10:** Zjednodušená diamantová pila s vodním chlazením [5]

### 1.5.2 Trouby

Většina těchto čedičových výrobků (trub) je vyrobena způsobem odstředivého lití. Obvyklá délka těchto odlitků je půl metru. Trouby se liší i tloušťkou stěn, která se pohybuje v rozmezí 12 až 25 mm. Tloušťka stěn závisí na průměru trub, který je 75 až 700 mm. U největších průměrů je tloušťka stěn dokonce 40 mm. [1]

Stejně jako u dlažeb je možný rozdílný povrch. Ten může se odvíjet od přání zákazníka a může být: hladký nebo pískovaný [1]



*Obrázek 11: Čedičové trouby [4]*

Čedičové trouby mají také mnohostranné použití. Potrubí lze použít například pro: hydraulickou i pneumatickou dopravu, foukanou a plavenou zakládku v dolech, spádovou dopravu hlušiny a kamene, odpovídání, odstruskování, pneumatickou dopravu sklářské vsázky, potrubí pro odsávací zařízení a dopravu chemicky agresivních látek. [1]

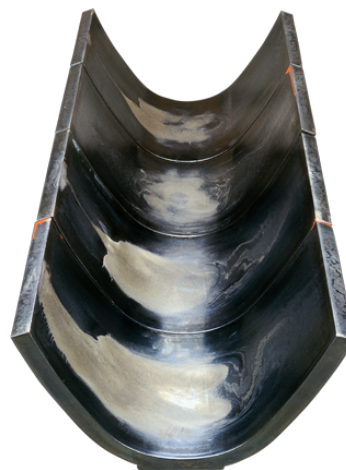
Nejhojnějším využitím trub je prostředí kanalizačních stok, jelikož mají zvýšenou odolnost proti oděru a také chemickou odolnost. [4]

### 1.5.3 Žlaby

I tento typ čedičového výrobku je hojně využíván v kanalizačních stokách, kdy jsou těmito žlaby vykládány granulační žlaby. [4]



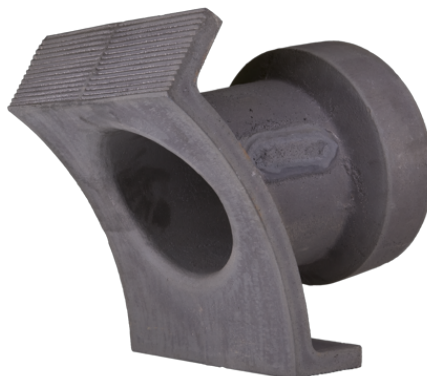
**Obrázek 12:** Vejčitý žlab [4]



**Obrázek 13:** Žlab pro vejčité stoky pražského formátu [4]

#### 1.5.4 Ostatní čedičové výrobky

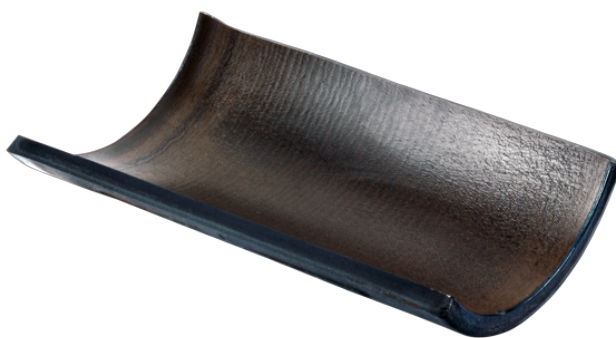
- domovní přípojka



**Obrázek 14:** Domovní přípojka DN200 R1100 [4]

Domovní přípojky se řadí mezi speciální odlitky, které jsou charakterizovány jako tvarovky pro stoky. Je doporučována speciální malta pro lepení tvarovek do kanalizačních stok. Domovní přípojky se dělí na dva typy: domovní přípojka DN200 R1100 a domovní přípojka DN200 R400. [4]

- pukané žlaby



**Obrázek 15:** Žlab pukaný z trub [4]

Pukané čedičové žlaby jsou využívány jako dnové žlaby, které jsou použity pro šachtová dna nebo také pro vyložení tras. Obvykle jsou rozpukány z odstředivě litých trub na 120° nebo 180°. [4]

- radiální tvarovky



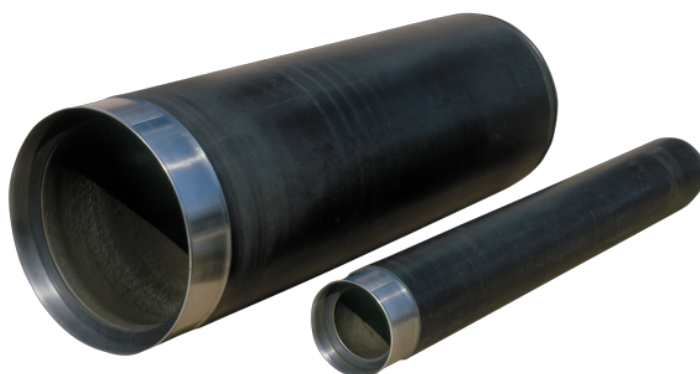
**Obrázek 16:** Klasická radiální tvarovka pro vyložení kanalizačních stok [4]



**Obrázek 17:** Radiální tvarovka v tl. 23 mm [4]

Radiální tvarovky jsou vyráběny obvykle v tloušťce 23 mm a jsou užívány především pro vyložení kanalizačních stok kruhových průřezů. Délka vyráběné tvarovky je nejvíce 250 mm, průměr je v rozmezí 700 – 1600 mm a úhel tvarovky dle typu od 7,5° - 45°. [4]

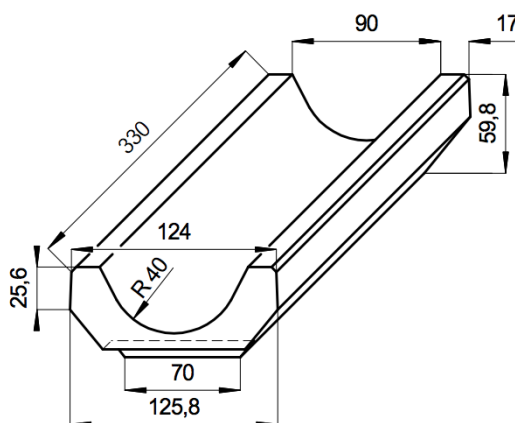
- trouby IN LINE



**Obrázek 18:** Trouby pro ražení IN LINE [4]

Trouby IN LINE jsou vyráběny v délce 0,5 metru, jsou to bezhrdlové trouby. Na místě hrdla jsou spojeny pomocí nerezové spojky, která obsahuje pryžové těsnění. Využívají se pro opravy kanalizačních sítí, aniž by došlo k bourání. [4]

- žlábek pro odvodnění mostů

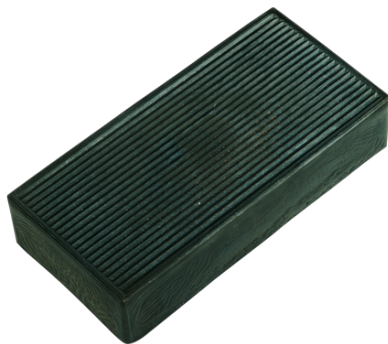


**Obrázek 19:** Žlábek pro odvodnění mostních konstrukcí [4]

**Obrázek 20:** Technický náčrtek mostového žlábků [4]

Žlábků pro odvodnění mostů jsou vyráběny na míru. Jsou určeny do míst nejvíce namáhaných pro odvodnění konstrukcí mostů. Obvykle jsou uloženy na povrchu úložných prahů mostních opěr. V těchto prostorech sídlí podél líce závěrné zídky. [4]

- čedičové cihly



**Obrázek 21:** Chemicky odolná čedičová kanalizační cihla [4]

Nejběžněji jsou čedičové cihly využity pro vyzdívky šachet, stěn a dalších částí v kanalizačních stokách. Hmotnost čedičové cihly je 5,10 kg. Rozměry čedičových cihel jsou obvykle 240/115/65 mm. [4]

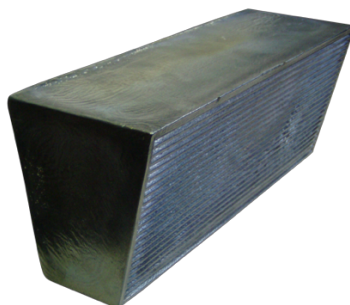
- čedičové kantovky



**Obrázek 22:** Kanalizační čedičová kantovka [4]

Použití je obdobné jako u čedičových cihel. Hmotnost oproti čedičovým cihlám je mírně nižší a činí hodnotu 4,90 kg. Rozměry kantovek je stejné jako u čedičových cihle, tedy 240/115/65 mm. Poloměr kantovky má hodnotu  $R = 60$  mm. [4]

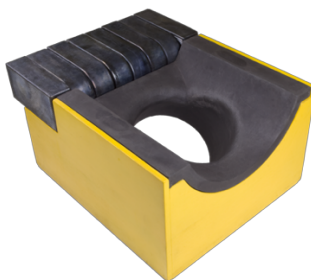
- čedičový klín



**Obrázek 23:** Klín z taveného čediče [4]

Klíny z taveného čediče jsou velmi chemicky odolné a slouží k vyzdívání klenby ve stokové síti. Hmotnost čedičového klínu se udává 5,00 kg. Po rozměrové stránce má délku a šířku stejných rozměrů jako čedičové cihly, tloušťka horní částí je 85 mm a tloušťka spodní části činí 50 mm. [4]

- tvarovka pro spadiště



**Obrázek 24:** Nátoková hlava spadišťového vtoku [4]

Tvarovka pro spadiště je čedičová tvarovka odlitá na míru z jednoho nebo více dílů. Při montáži této tvarovky je použito nastavení pomocí čedičových kantovek či čedičových cihel. Výhody tohoto výrobku jsou: nízká cena, malá hmotnost, snadná montáž a také vysoká životnost čedičových dílů. [4]

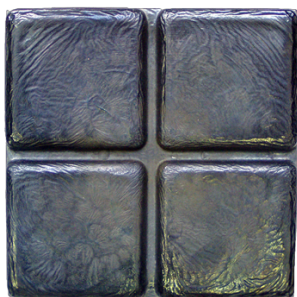
- čedičový sokl



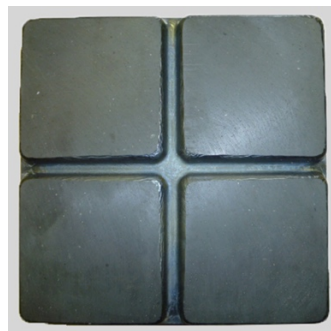
**Obrázek 25:** Soklová tvarovka z taveného čediče [4]

Čedičové sokly jsou hlavně využívány pro zakončení čedičových podlah ke stěně. Jsou vyráběny L-kusy a soklové pásky. L-kusy se vyznačují rádiusem, který představuje vnitřní roh tvarovky. Dále rádius umožňuje výbornou údržbu, z čehož vychází i kladný požadavek na hygienu podlahy. [4]

- speciální dlažba SKID-PAN



**Obrázek 26:** *Klasická dlaždice SKID-PAN [4]*



**Obrázek 27:** *Leštěná dlaždice SKID-PAN [4]*

Dlažba SKID-PAN je využívána v automobilovém průmyslu, kdy na tomto povrchu jsou zkoušeny jízdní vlastnosti automobilů a jejich brzdných systémů. Obvyklý rozměr této dlažby je 200 × 200 mm. [1, 4]

### **1.5.5 Shrnutí použití taveného čediče v praxi s ohledem na místo použití**

- těžba uhlí a nerostů: řetězové dopravníky, pneumatická a hydraulická přeprava uhlí, rud a hlušiny

Vysoká chemická odolnost a korozivzdornost jsou hlavní parametry při použití výrobku z taveného čediče v odvětví těžby uhlí. [1]

- koksárenství, hutnictví, slévárenství: skluzy, zásobníky a odstruskovací žlaby [1]
- cementárství, teplárenství a energetika: cyklony, odlučovače a přeprava práškového uhlí, popílku [1]
- podlahy – z hlediska provozu: průmyslové provozy, chemicky zatížené podlahy, krmné žlaby a podlahy a stěny v zemědělské živočišné výrobě

U podlah se využívá v první řadě nenasákavosti, kterou tavený čedič disponuje. [1]

interiérové podlahy: hotely, restaurace, pivovary, vinné sklepy a společenské místnosti. [1]

- vodohospodářství, kanalizace: stokové sítě, spadiště, retardéry, čistírny odpadních vod, kalová hospodářství, speciální stokové žlaby a protlačovací trouby

V tomto odvětví se využívá především nulové nasákavosti taveného čediče, dále pak vysoké ošetruvzdornosti, pevnosti v tlaku a absolutní korozivzdornosti. [1]

- ostatní použití: výstelka mlecích mlýnů, mlékárenství, potravinářství a automobilový průmysl [1]

## **2 Prostředí kanalizačních stok**

Kanalizační stoky mají význam při odvádění odpadních vod z obcí a měst. První veřejná kanalizační stoka byla vytvořena v Praze ve druhé polovině 18. století. Tyto stokové sítě měly délku 44 km. Zhruba v druhé polovině 19. století začaly vznikat moderní kanalizace.

Kanalizační řád – zajišťuje provoz kanalizace pro veřejnou potřebu. Dalším významem kanalizačního řádu je stanovení nejvyšší přípustné míry znečištění povrchových vod. Stoková síť pro veřejnou potřebu odvádí následující druhy vod: splaškové, odpadní a průmyslové odpadní. [6]

### **2.1 Druhy odpadních vod a látky nepřípustné pro kanalizační stoky**

#### **2.1.1 Nepřípustné látky pro kanalizace**

Kanalizacemi pro veřejnou potřebu je nepřípustné odvádění určitých látek. Těmito látkami jsou například vysoce chemicky agresivní látky, látky radioaktivní a infekční, hořlavé nebo výbušné látky, jedy, žíraviny, omamné látky a pesticidy. Dalším nepřípustným druhem odváděných látek jsou odpadní vody o vysokých teplotách. [6]

#### **2.1.2 Druhy odpadních vod**

Odpadní vody jsou rozděleny do několika druhů, u kterých záleží na jejich výskytu. Tyto vody jsou rozděleny na:

1. splaškové odpadní vody,
2. dešťové odpadní vody,
3. průmyslové odpadní vody,
4. infekční odpadní vody,
5. oplachové vody,
6. ostatní odpadní vody. [7]

### **2.1.2.1 Splaškové odpadní vody**

Splaškové odpadní vody neboli komunální odpadní vody vznikají vypouštěním odpadních vod do veřejné kanalizace především z bytů a rodinných domů. Do sekce splaškových vod patří i odpadní vody, které vznikají ve školách, restauracích, hotelech, kulturních zařízeních a jiných, kde mají charakter odpadních vod od obyvatel. [8]

### **2.1.2.2 Dešťové odpadní vody**

Do tohoto typu odpadních vod patří veškeré typy atmosférických srážek. Lze rozdělit dešťové odpadní vody na dvě kategorie: dešťové vody znečištěné – vznikají na silnicích s vysokou intenzitou provozu, z průmyslových areálů a dešťové vody neznečištěné – z pěších zón, parků, střech a ze silnic, kde je menší intenzita provozu. [6, 9]

### **2.1.2.3 Průmyslové odpadní vody**

Průmyslové odpadní vody mají hodně rozdílný charakter oproti splaškovým odpadním vodám. Další odlišnou vlastností, kterou se liší, je také jejich škodlivost při vypouštění. Podle obsahu znečišťujících látek se průmyslové vody dělí na:

- organické znečištění

Organické znečištění vzniká v mnoha průmyslových odvětvích – potravinářství, farmacie, papírenství, textilnictví, koželužnictví a tepelné zpracování uhlí. Forma organických látek může být rozpuštěná nebo nerozpuštěná.

- anorganické znečištění

Anorganické znečištění vzniká při těžbě a úpravě uhlí a rud, výrobě hnojiv, povrchové úpravě kovů a anorganické chemii. Vzniká také v hutním, sklářském a keramickém průmyslu. Obdobně jako u organického znečištění jsou i anorganické látky v rozpuštěné nebo nerozpuštěné formě. Mohou patřit mezi látky toxické či netoxické. [8]

### **2.1.2.4 Infekční odpadní vody**

Před čištěním infekčních odpadních vod dojde ke zbavení choroboplodných zárodků. Prostředí, ze kterých tento typ odpadních vod pochází jsou: infekční oddělení nemocnic, mikrobiologické zařízení, sanatoria na léčbu tuberkulózy a specializované oddělení výroby očkovacích látek. [9]

## **2.2 Řešení stokových soustav podle způsobu odvádění odpadních vod**

Stokové soustavy se dělí na dva typy v rámci řešení stokových soustav: jednotná soustava stok a oddílná soustava stok.

### **2.2.1 Jednotná soustava stok**

Pomocí jednotné soustavy stok jsou odváděny splaškové a dešťové vody, které odchází do stokových sítí společně. Tato soustava obsahuje jednu nevýhodu, při které je nutné dimenzování na součet průtoků všech odpadních vod. [7]

### **2.2.2 Oddílná soustava stok**

Naopak oproti jednotné soustavě stok je u oddílné soustavy odváděna zvlášť splaškové odpadní vody a zvlášť dešťové odpadní vody. Dělí se tedy na tyto soustavy: splašková stoková soustava a dešťová stoková soustava. [7]

## **2.3 Dělení stok podle hnací síly**

1. gravitační kanalizace,
2. tlaková kanalizace,
3. podtlaková kanalizace,
4. pneumatická kanalizace. [7]

### **2.3.1 Gravitační kanalizace**

Nejběžněji je tento systém použit pro transport splaškových vod. Průměr potrubí při odvádění odpadní vody gravitačně potrubím nesmí být méně než DN 250 mm. Spád nesmí být menší než 0,6 %. Uložení potrubí gravitační kanalizace činí minimálně 1,5 m. Revizní kanalizační šachty musí být uloženy maximálně ve vzdálenosti 50 m. [7, 10]

Mezi hlavní výhody gravitační kanalizace patří provozně velmi jednoduchý systém, minimální nároky na obsluhu při provozu, nejlevnější řešení kanalizace, snadná lokalizace případné poruchy ve stokové síti – kamerová prohlídka, jednoduchá revize a čištění.

Naopak mezi nevýhody gravitační kanalizace patří, že při nerovnosti terénu se musí potrubí zahlubovat a dojde tím k prodražení. Další nevýhodou je min. hloubka výkopu, která činí 1,9 – 2,0 m. Podzemní voda prodražuje výstavbu, větší hloubky výstavby -> zemní práce zasáhnou do skalního podlaží ve většině lokalitách, nízká manévrovatelnost při vyhýbání se ostatním inženýrským sítím, náročná pokládka – dodržení minimálního spádu, nutnost deratizace gravitačních stok a vysoká pořizovací cena za 1 m kanalizace. [10]

### 2.3.1.1 Tvary a rozměry stok

Gravitační stoky jsou rozděleny do tří tvarů – kruhový, vejčitý a tlamový. Nejlépe ze tří uvedených tvarů vyhovuje vejčitý tvar, nejméně ovšem vyhovuje tlamový tvar.



**Obrázek 28:**  
*Stoková síť  
vejčitého tvaru [4]*



**Obrázek 29:** *Stoková síť  
kruhového tvaru [11]*



**Obrázek 30:** *Stoková síť  
tlamového tvaru [12]*

Při výrobě je to jednoduše vyráběný prefabrikát. Kruhové stoky se používají v rozměrech DN 250 až 2400 a dále po 200 mm. Rozměry vejčitých stok se liší dle druhu použitých vejčitých stok. U vídeňského tvaru je nejmenší rozměr 600/900 mm, největší dosahuje 1600/2400 mm. U pražského normálu je dána stoka nejmenším rozměrem 600/1100 mm a naopak největším 1500/2300 mm. U tlamových stok jsou použity profily nejméně 1400/890 mm, nejvíce však 2600/1650, atd. [10, 11]

Materiály pro výstavbu stokových sítí jsou: kamenina, čedič, litina, sklolaminát, některé plasty, kanalizační cihly, dlažební kameny a beton. [7]

### **2.3.2 Tlaková kanalizace**

Do čerpacích šachet na pozemku vlastníka každé nemovitosti jsou gravitačně svedeny splaškové odpadní vody z nemovitostí, ze kterých vedou přípojky tlakové kanalizace do veřejné tlakové kanalizace. V čerpací šachtě se nachází objemovým čerpadlem. Toto čerpadlo obsahuje drtič a dopravní tlak cca 0,6 MPa. Součástí tlakové kanalizace je tedy domovní přípojka, která má gravitační svod do sběrné jímky. Dále je to pak akumulární a čerpací jímka, výtlačné tlakové potrubí mezi čerpací jímkou a sběrným potrubím a v poslední fázi sběrné tlakové potrubí. [7, 10]

Do výhod tlakového potrubí lze zařadit malý průměr potrubí. Dále to, že není potřeba údržba stok, snadné zjištění poruch, menší objem zemních prací při výstavbě trubních rozvodů, hloubka uložení cca 1,6 m a hloubka výkopu skoro vždy 1,7 m, není potřeba dodržet přesný jednotný spád, menší náročnost výstavby a také to, že oproti gravitační kanalizaci je nižší pořizovací cena za 1 m kanalizace.

Nevýhodami tlakového potrubí je vyšší provozní nákladnost než u gravitační kanalizace – např. větší spotřeba energie, pravidelná údržba a revize čerpadel, možnost poruch čerpadel, ale také omezená životnost technologického vybavení – oprava/výměna. [10]

### **2.3.3 Podtlaková kanalizace**

Podtlaková kanalizace se skládá z několika částí. Tyto části tvoří domovní přípojka s gravitačním svodem do akumulární šachty, které obsahují podtlakový ventil. Následuje podtlakové přípojné potrubí, které vede z kumulační šachty do sběrného potrubí. Poslední součástí je také vakuová stanice. [7]

Nevýhody podtlakové kanalizace: může dojít k ucpání ventilů, vysoká spotřeba elektrické energie a nelehká proveditelnost – vyšší požadavky. [7]

### **2.3.4 Pneumatická kanalizace**

Splašky se pohybují pomocí alternativního způsobu tlakovým vzduchem, které mohou být i ve větších vzdálenostech. Je možná doprava i velmi znečištěného média, které nepřijde do kontaktu s rotujícím zařízením. [7]

Výhody pneumatické kanalizace: nízké nároky na údržbu, odpadá odvětrání a odkalení. [7]

## 2.4 Objekty kanalizační stoky

Aby bylo dosaženo správné funkce stokových sítí a pro provoz, údržbu a čištění stok jsou tvořeny objekty, které mají pro stokové sítě určitý význam. Těmito objekty jsou vstupní šachty, spojné šachty, spojné a rozdělovací komory, spadiště a skluzy, dešťové vpusti, lapače splavenin, kanalizační přípojky, kanalizační shybky, křížení stok a jiných vedení, proplachovací objekty, odlehčovací komory, dešťové nádrže a jiné.

Pro zakrytí vstupních otvorů do objektů jsou využívány poklopy, které mají kruhový tvar. Jejich minimální průměr činí 600 mm. Nesmí vystupovat nad úroveň terénu na komunikaci a maximálně mohou být 5 mm pod úrovní komunikace. [7]

### 2.4.1 Vstupní šachty

Vstupní šachty, jak již název naznačuje, slouží pro vstup pracovníků na kontrolu, ke zjištění funkce stokových sítí, pro revize a údržby. Dalším významem vstupních šachet je také pro větrání. [7]



*Obrázek 31: Vstupní šachta [13]*

### 2.4.2 Spojné šachty

Místo, kde se stékají 2 a více stok, se nazývá spojná šachta. Ke spojení dochází pomocí žlábkovitého spojení jednotlivých stok. [7]



*Obrázek 32: Spojná komora kanalizační stoky [14]*

### 2.4.3 Rozdělovací šachty

Rozdělovací šachty jsou opakem spojných šachet. Z jedné stoky se odpadní vody roztékají do 2 a více stok na odtoku z komory. Lepší regulaci odtoku zajišťují do jednotlivých stok často stavítka. Může dojít i k úplnému odstavení jednotlivých větví, aby bylo možné provést revizi či opravu stoky. [7]

### 2.4.4 Spadiště a skluzu

Hlavním úkolem spadiště a skluzu je překonání určitých výškových rozdílů. Spadiště mají význam při překonávání velkých rozdílů pomocí stupně ve dně stoky, který dosahuje maximální výšky 4 metrů. Skládá se z následujících součástí: vstupní šachta, přítokové potrubí, odtokové potrubí a vlastní spadiště. [7]



**Obrázek 33:** Čedičová tvarovka pro spadiště ve stokové síti [14]

Skluz je charakteristický strmým skluzem a také velkými rychlostmi. Skluz je zakončen částí, kde dochází k tlumení energie a odvedení vzduchu. [7]

#### 2.4.5 Dešťové vpusti

Slouží především k odvodnění vozovek, chodníků a také zpevněných ploch. Na jednu vpust náleží zhruba 400 m<sup>2</sup> odvodněných ploch. Vzdálenost těchto vpustí je kolem 40 metrů, nemělo by to však přesáhnout 60 metrů. Na dálnicích a rychlostních silnicích se umísťují mimo jízdní pruhy, na komunikacích jsou obvykle situovány u obrubníku. Dešťové vpusti se dělí dle druhu na: uliční, chodníkové a horské. [7]



**Obrázek 34:** Dešťová vpust na komunikaci [15]

## 2.4.6 Domovní přípojky

Domovní přípojky slouží k odvodu odpadních vod do stokových sítí, a to zejména z nemovitostí. Jakákoliv nemovitost by měla mít vlastní domovní přípojku. Nejmenší průměr těchto přípojek je dán DN 150 mm. Sklony mohou dosahovat maximálně 40 %, u DN 150 mm je sklon 2 %. Revizní šachty domovních přípojek jsou situovány na pozemku nebo také v daném objektu. Přípojka by měla splňovat tyto kritéria a měla by být: co nejkratší, přímá, v jednom sklonu a stejného profilu v celé délce. [7]

## 2.4.7 Odlehčovací komory

Používají se například při zvýšeném zatížení stok po přívalových deštích a oddělují části průtoku – omezují průtok přitékající vody, která proudí do ČOV. Odlehčovací komory mají spoustu konstrukčních typů, které mohou být například: komory s přímým nebo bočním přelivem, komory se škrťací tratí, komory s přepadajícím paprskem, komory s horizontální dělicí stěnou, násoskové typy, stavítkové typy a vírový regulátor. [7]



**Obrázek 35:** Odlehčovací komora [14]

### **3 Vysokohodnotné betony a jejich vlastnosti**

Vysokohodnotné betony hrají významnou roli v této práci ve vývoji vysoce odolného kompozitu. Kompozit by měl dosahovat vysokých pevností, proto vysokohodnotné betony mají vhodné parametry pro jejich vývoj. U vysokohodnotných betonů je známé použití mikrosiliky, kterou lze využít i pro vysoce odolný kompozit.

Je známo několik typů vysokohodnotných betonů, které se liší několika parametry. Tyto betony můžeme rozdělit na: vysokopevnostní betony, vysokohodnotné betony, velmi vysokohodnotné betony a ultra vysokohodnotné betony.

Betony, které jsou nazývány vysokopevnostní betony, se označují jako HSC – High Strenght Concrete. Vysokohodnotné betony mají označení HPC – High Performance Concrete. Betony, které dosahují vyšších pevnostních tříd než u HPC, jsou označovány jako velmi vysokohodnotné betony (VHPC – Very High Performance Concrete). Nejvyšších pevnostních tříd ovšem z této kategorie dosahují ultra vysokohodnotné betony. Tyto betony se značí zkratkou UHPC – Ultra High Performance Concrete. [16]

#### **3.1 HSC – vysokopevnostní betony**

Vysokopevnostní beton je zastoupen pevnostními třídami od C 55/67 do C 105/115. Předními vlastnostmi tohoto typu betonu je samozřejmě vysoká pevnost, která je doplněna vysokou odolností proti působení CHRL a také vysokou vodotěsností. Menší slabinou tohoto typu betonu je nižší odolnost proti obrusu. Cena HSC dosahuje vzhledem ke složení vyšších hodnot než běžný beton, ale je dosažena úspora kameniva, která činí zhruba 30 %. Dalšími dobrými vlastnostmi u tohoto betonu jsou také poměrně rychlý nárůst pevností, trvanlivost a odolnost. HSC je po kvalitativní, ekologické a ekonomické stránce velmi výhodný. [16, 17]

#### **3.2 HPC – vysokohodnotný beton**

Stejně jako u vysokopevnostního betonu, tak i vysokohodnotný beton dosahuje vysokých pevností, které jsou také podpořeny výbornou trvanlivostí a odolností proti pronikání tlakové vody. HPC dosahuje také dobrých pohledových vlastností. Vodní součinitel těchto betonů nepřesahuje hodnotu 0,40. Pevnost by měla dosahovat

po 28 dnech nad 70 MPa. Splněním určitých podmínek je dosaženo navržení betonu, který má vysokou pevnost a trvanlivost.

Zmíněné podmínky jsou: pevnost – po 4 hodinách alespoň 17,5 MPa, po 1 dni 35 MPa a po 28 dnech alespoň 70 MPa, trvanlivost – hodnota součinitele trvanlivosti větší než 0,8 po 300 rozmrazovacích cyklech a vodní součinitel – pod 0,35. [16, 18, 19]

### **3.3 VHPC – velmi vysokohodnotný beton**

Pevnostní třídy velmi vysokohodnotného betonu jsou od C 105/115 do C 135/150. Oproti HPC se dále liší vodním součinitelem, ten je v rozmezí 0,25 – 0,35. U velmi vysokohodnotného betonu je vhodné využít: ztekucující přísady, latentně-hydraulické příměsi, zpomalující přísady a kamenivo, které má vysokou pevnost – maximální velikost zrna do 12 mm. [16, 19]

### **3.4 UHPC – ultra vysokohodnotný beton**

Ultra vysokohodnotný beton se vyznačuje pevnostní třídou, jejíž hodnota je nad C 135/150. Jak je z pevnostní třídy zřejmé, pevnost v tlaku dosahuje minimálně 150 MPa. Pevnost v tahu za ohybu je minimálně 15 MPa. Vodní součinitel má velmi nízké hodnoty, které jsou v rozmezí 0,15 – 0,30, tudíž pro vhodnou zpracovatelnost je využito superplastifikačních přísad. Struktura UHPC je obvykle bez pórů, pomocí níž je zajištěna vysoká pevnost, odolnost proti korozi a také odolnost proti agresivnímu prostředí. [16, 17, 20, 21, 22, 23]

Po stránce vlastností lze říct, že UHPC je materiál, který je obvykle vyztužený vlákny. Tyto vlákna vyztužují velmi pevnou, ale křehkou matici. Jednou z velmi důležitých a primárních vlastností je pevnost. Pevnost charakterizujeme jako schopnost, kdy je materiál odolný vůči působení vnějších sil. Pevnost je vždy ovlivněna mnoha faktory, které mohou měnit její hodnotu.

Základem vysoké pevnosti u ultra vysokohodnotného betonu je eliminování vzduchových pórů, které musí být nahrazeny pevným materiálem. Vhodným materiálem pro vyplnění vzduchových pórů jsou jemné materiály, do kterých lze zahrnout mikrosiliku či nanosiliku. [24]

Modul pružnosti dosahuje u UHPC hodnot 45 – 55 GPa. Pro tyto vysoké hodnoty (pevnosti, modul pružnosti) je využíváno nejlepších surovin za podpory vhodných

chemických přísad. Dále je pro dosažení vysoké pevnosti nutné dodržet přesné dávkování. [25]

Pevnost v tahu za ohybu je u UHPC kolem 6 – 11 MPa, obvykle je ovšem uváděna hodnota 15 MPa. Použitím ocelových vláken je dosaženo mnohem vyšších pevností. Tato pevnost se pohybuje kolem 40 MPa. [22, 23, 26, 27]

Jelikož je ultra vysokohodnotný beton používán především v extrémních podmínkách, je důležité zaručit jeho dlouhou životnost, která je založena na vysoké kompaktnosti materiálu. Hutná struktura zabraňuje průniku vody do struktury, to má za následek výborné výsledky zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. [28]

Cena UHPC je vysoká z důvodu použití kvalitních materiálů, vyššího podílu cementu, cenová náročnost přísad, ale také náročnost samotné technologie výroby. I přes vysokou cenovou náročnost je primárním výsledkem vysoká odolnost a životnost daného materiálu. [30]

Složení UHPC je velmi odlišné oproti obyčejnému betonu. UHPC se skládá především vysokou dávkou cementu, mikrosiliky a také množstvím ocelových vláken, které beton vyztužují. Obvyklé složení je z portlandského cementu, jemného písku, křemičitého úletu, superplastifikační přísady a vody [23, 29]

Cementový tmel a kvalita přechodové zóny jsou základním předpokladem pro dobré mechanické vlastnosti UHPC. Přechodová zóna (tzv. tranzitní zóna) je slabá zóna mikrostruktury betonu, která je situována mezi kamenivem a cementovým tmelem. U obyčejného betonu je tato zóna hodně pórovitá. Oproti běžným betonům je u UHPC vyšší objem C-S-H gelů, který vychází z pucolánové reakce. Pucolánová reakce vzniká mezi  $\text{Ca(OH)}_2$  a příměsí, z čehož vzniká vysoce homogenní mikrostruktura. [30]

### **3.4.1 Materiálové složení UHPC:**

U materiálového složení UHPC je rozebráno složení z pohledu cementu, příměsí, kameniva, vody, přísad, ocelových vláken a pigmentů.

#### **3.4.1.1 Cement**

Hlavním cementem, který je využíván pro technologickou výrobu je portlandský cement CEM I, který je využit v pevnostních třídách 42,5 nebo 52,5. Obsah slínku u CEM I je více než 95 %. Vysokých pevností u UHPC je možné také dosáhnout použitím

vysokopecního cementu CEM III, ovšem nárůst pevností je pozvolnější. Obsah cementu ve směsi UHPC je 550 – 1000 kg/m<sup>3</sup>. Výrazné ovlivnění obsahu cementu může být na základě maximálního zrna kameniva, ale také na obsahu ostatních jemných příměsí. [25, 31]

#### **3.4.1.2 Kamenivo**

UHPC využívá vždy kameniva, které dosahuje vysokých pevností kameniva a je uváděna hodnota nad 200 MPa. Z pohledu maximální velikosti zrna je uváděno maximálně 16 mm, nejběžněji je ovšem používáno 8 mm. Na základě těchto jemných frakcí je dosaženou vynikající soudržnosti s pojivovou složkou. Kamenivo je nutné před použitím vysušit, jelikož by mohlo dojít ke kolísavosti konzistence a je vhodné, aby bylo bez nečistot. [23, 24, 31, 32]

#### **3.4.1.3 Voda**

Voda, která je všeobecně používána do všech typů betonu, by neměla být žádným způsobem znečištěna. Tím je myšleno, aby neobsahovala různé oleje, kyseliny, chloridy a jiné. Obvyklá hodnota vodního součinitele je u UHPC uváděna v množství 0,2. Vyjadřuje nám poměr vody a pojivové složky betonu. Hodnota vodního součinitele je často ovlivněna přidáním superplastifikační přísady. [23, 24, 29, 32]

#### **3.4.1.4 Příměsi**

Nejběžněji používanou příměsí je mikrosilika, která dává výslednému betonu odolnost a trvanlivost. Dávkování je vyjádřeno procentuálně z množství cementu a činí 10 – 30 %. Velmi často je využíván křemičitý úlet, ale také křemičitý písek velmi jemných frakcí. Příměsi celkově zlepšují hutnost výsledné struktury materiálu. Je tím samozřejmě ovlivněna i pevnost, která dosahuje vyšších hodnot. Další využívanou příměsí dnešní doby je metakaolin, který má pozitivní účinky na výsledné hodnoty materiálu, s výjimkou pevnosti v tlaku. Jeho výhodou je především cena a bílá barva (estetika). [16, 30, 31, 33]

#### **3.4.1.5 Přísady**

Stejně jako u obyčejných betonů, tak i u UHPC je využíváno plastifikačních a superplastifikačních přísad pro redukci vodního součinitele, a také pro zlepšení výsledných vlastností. Nejlepší účinnost u ultra vysokohodnotného betonu mají přísady

na bázi polykarboxylátů. Dávkování plastifikačních a superplastifikačních přísad je kolem 5 % z hmotnosti cementu a obvykle to vychází na 25 – 30 kg na kubík směsi. [24, 29]

#### **3.4.1.6 Ocelová vlákna**

Je spousta druhů vláken, ale ocelová vlákna jsou nejčastěji používanými vlákny do tohoto typu betonu. Do obyčejného betonu jsou užívány drátky různých průměrů, jinak tomu je ovšem u UHPC, kdy jsou využívány drátky o průměru 0,2 – 0,3 mm. Dávkování se pohybuje kolem 2 %. Využitím drátků se zlepšuje pevnost v tlaku, ale také pevnost v tahu za ohybu a to nemalým poměrem. Velmi důležité je při užití ocelových vláken dosáhnout dobrého rozmísení ve směsi. [23, 24, 27, 31, 32]

#### **3.4.1.7 Pigmenty**

UHPC je možné barvit pigmenty, které mohou být práškové nebo tekuté. Jejich dávkování je 1 – 2 % z celkové hmotnosti všech suchých složek, záleží na typu. Při vyšším procentu pigmentu v UHPC může dojít k negativnímu ovlivnění výsledného betonu. [29]

### **3.4.2 Výroba a použití UHPC**

Pro samotnou výrobu UHPC je nutné použít míchačku, u které lze nastavit vysokou intenzitu míchání. Při technologii výroby tohoto typu betonu je velmi důležité dbát na přesné dávkování jednotlivých složek v přesném sledu. Materiál, který dosahuje skvělých výsledných vlastností, má také menší negativní vlastnosti a v tomto případě je to dlouhá doba míchání. Ovšem ve srovnání s běžnými betony dosahuje kratší doby míchání. Výhodou je, že doba míchání může být redukována na základě některých změn: optimalizace velikosti zrn ve směsi, cement nahradí hrubé kamenivo, křemičitý písek nebo úlet nahradí hrubé kamenivo a cement nebo superplastifikační přísada je přizpůsobena typu betonu.

Postup výroby záleží také na orientaci drátků v ultra vysokohodnotném betonu. Na pevnost v tlaku a modul pružnosti betonu nemá vliv orientace vláken, nemá vliv ani na vznik trhlin, které vznikají namáháním.

Využití UHPC je například na lávky, mosty, stropní konstrukce, fasády, fasádní prvky a designové prvky. [34]

### **3.5 RPC (Reactive Powder Concrete)**

RPC je beton ultra vysokých pevností, ve kterém jsou zastoupeny jemnozrné složky. Výrobní proces, který se spojuje z několika technologií do jednoho jednoduše vykonatelného procesu, umožní výrobu betonu, který dosahuje vysokých pevností v tahu za ohybu a také vysoké pevnosti v tlaku. [34]

## 4 Vliv propařování

Vytvrzovací proces betonu lze urychlit vytvrzováním při vysoké teplotě. Parní vytvrzování významně zvýšilo počáteční pevnost cementové malty. Pevnost betonu se urychluje vytvrzováním vodní párou. Vytvrzování párou je výhodnější v betonárnách vyrábějících prefabrikované dílce, stejně jako při zrychlení dosahování pevnosti betonu. Dále je možné říct, že je při atmosférickém tlaku kombinací vlhkého vytvrzování a vytvrzování při vysoké teplotě, kdy je k dispozici souběžná dodávka vodní páry, jako je vlhkost a vytvrzování při teplotě vyšší než 100 °C. Je důležité ho používat s opatrností. Většina prefabrikovaného průmyslu nanášela betonový vzorek okamžitě po vylití betonu. Během vytvrzeného procesu cementu se uvolní hydratační teplo. Externí teplo, které se na beton nanáší před nastavením času, povede k tepelné roztažnosti a vnitřním trhlinám a tím sníží pevnost. Předtím, než se beton vytvrdí, je zapotřebí čas, aby se teplo přeneslo z vnějšího povrchu do vnitřní části betonu. V této fázi je vnitřní část betonu stále plastická. Když se do betonu přivádí vnější teplo, urychluje proces vytvrzování na vnějším povrchu a ponechá vytvrzenou skořepinu, která obklopuje plastové vnitřní jádro. Když vnější teplo a hydratační teplo dosáhnou vnitřní struktury jádra, nadměrné teplo by způsobilo vnitřní roztažení a vznikly praskliny z vnitřního na vnější povrch. Pro eliminaci takového problému je třeba při betonáži použít vytvrzování párou. [35]

Výhody vytvrzování párou jsou následující: jednoduchý proces, pohodlný provoz, výroba s vysokou počáteční pevností, krátký výrobní cyklus a vynikající ekonomické výhody. Proces vytvrzování parou zahrnuje následující čtyři stupně: stupně zředění, ohřívací stupeň, termostatický stupeň a stupeň chlazení.

Technologie vytvrzování párou se používá spíše pro čistý cementový beton než pro beton s velkým podílem minerálních příměsí, protože mnozí výzkumníci a vývojáři vyjádřili obavu, že pevnost betonu v tlaku s velkou částí minerálních příměsí je nízká.

Jedná se o překážku použití vytvrzování pro beton, která obsahuje velkou část minerálních příměsí. Přestože je počáteční pevnost betonu s velkým množstvím minerálních příměsí nízká při pokojové teplotě, vysoké teploty mohou podpořit časnou hydrataci pojiva. Nastavením termostatického času a termostatické teploty v podmínkách vytvrzování párou může beton s velkou částí minerálních příměsí dosáhnout požadované pevnosti při odstraňování. [36]

## **5 Zhodnocení výsledků současného stavu poznání kompozitu**

### **5.1 Obecný popis současného stavu kompozitu**

Kompozit na bázi taveného čediče jako druhotné suroviny byl již vyvíjen v bakalářské práci, kde měl 3 podoby pojivové báze: cementová báze, polymercementová báze a polymerní báze.

Nejdříve byly stanoveny možné pojivové složky a byla provedena jejich optimalizace – cementová a polymerní pojiva, ze kterých byl vybrán jeden používaný cement a jeden používaný epoxid. Následně bylo provedeno také uvedení širšího okruhu primárních surovin, ale i druhotných surovin, které byly tím hlavním. Po sestavení širokého spektra druhotných surovin následovala optimalizace, ze které vzešla jedna používaná surovina.

Na základě optimalizace pojiv byl zvolen pro pojivovou cementovou bázi portlandský struskový cement třídy 42,5 R. Pro polymerní bázi byla zvolena epoxidová pryskyřice LENA P 130. Jako druhotná surovina byly zvoleny na základě požadovaných vlastností odkapy z výroby taveného čediče neboli čedičová frita. Byla sestavena ještě jedna receptura, která byla na polymercementové bázi. U této třetí receptury byl použit prášek kopolymeru EVA. [2]

### **5.2 Složení receptur použitých pro vyvíjený kompozit v prvotním vývoji**

#### **5.2.1 Epoxidová báze**

- pojivová složka – epoxidová pryskyřice LENA P 130,
- plnivová složka – odkapy z výroby taveného čediče.

U epoxidové báze byly použity odkapy z taveného čediče frakce 0,125 – 2 mm. Jednotlivé zastoupení množství frakce bylo vypočítáno dle Fullera. V této bázi se vyvíjený kompozit lišil i množstvím druhotné suroviny (plněním).

Toto plnění bylo v následujícím množství:

1. plnění 50 %,
2. plnění 60 %,
3. plnění 70 %.

Pro ověření materiálových vlastností bylo využito plnění 70 %. U epoxidového kompozitu došlo k sedimentaci částic, která mohla být způsobeno vyšší objemovou hmotností čedičových odkapů oproti epoxidové pryskyřici. [2]

### **5.2.2 Cementová báze**

- pojivová složka – portlandský struskový cement (CEM II/B-S 42,5 R),
- plnivová složka – odkapy z výroby taveného čediče.

U cementové báze byla frakce odkapů z výroby taveného čediče jiná oproti epoxidové bázi. Tato frakce byla v rozmezí 0 – 4 mm. [2]

### **5.2.3 Polymercementová báze**

- pojivová složka – portlandský struskový cement (CEM II/B-S 42,5 R),
- plnivová složka – odkapy z výroby taveného čediče,
- příměs – redispergovatelný prášek kopolymeru EVA.

Tato receptura byla obdobná jako u cementové báze, navíc bylo přidáno malé množství redispergovatelného prášku kopolymeru EVA, který měl zlepšit vlastnosti kompozitu. Z hlediska dávkování byly přidány 3 % kopolymeru EVA z hmotnosti cementu. [2]

## **5.3 Zkoušení materiálových vlastností při dosavadním výzkumu kompozitu**

Cementový, polymercementový i epoxidový kompozit byl zkoušen po 7 dnech a dosáhl u polymerní báze výrazně lepších výsledků než u dalších dvou.

Všechny typy kompozitu byly testovány následujícími zkouškami: pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, tvrdost povrchu a odolnost proti teplotním šokům.

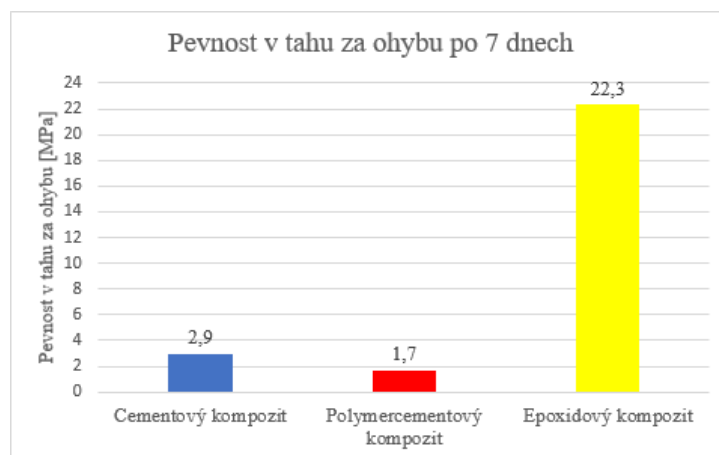
Zkoušky materiálových vlastností vyvíjeného kompozitu byly prováděny na základě příslušných norem, které jsou uvedeny v následující tabulce. [2]

**Tabulka 3:** Zkoušky prováděné na zkušebních tělesech cementového, polymercementového a epoxidového kompozitu a jejich normy [2]

|                                       |                                                                                                          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pevnost v tahu za ohybu</b>        | ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti                                        |
| <b>Pevnost v tlaku</b>                | ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti                                        |
| <b>Tvrдость povrchu</b>               | ČSN EN 13892-2 Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku |
| <b>Odolnost proti teplotním šokům</b> | DIN 52313 Testing of glass; determination of the resistance of glass products to thermal shock           |

### 5.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno na základě normy ČSN EN 196-1 namáháním tříbodovým ohybem. Na základě výpočetního vzorce byla stanovena pevnost v tahu za ohybu, který byl definován na základě normy. [2]

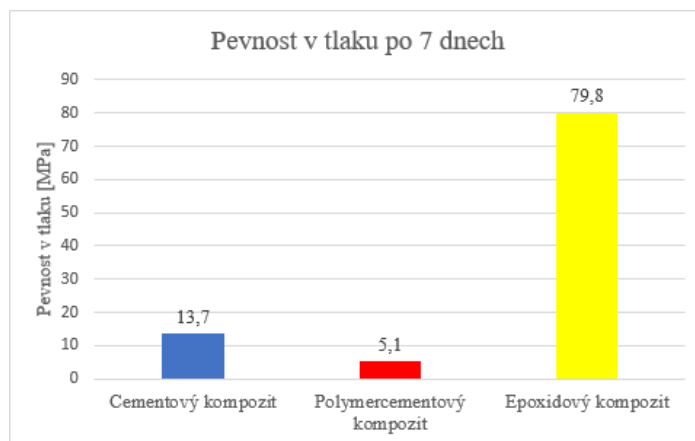


**Obrázek 36:** Grafické vyhodnocení pevností v tahu za ohybu u dříve vyvíjených kompozitů [2]

Z grafického vyhodnocení je zřejmé, že nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu vykazoval kompozit na epoxidové bázi. U kompozitu na cementové a polymercementové bázi bylo dosaženo nižších hodnot z důvodu pouhého sedmidenního zrání. [2]

### 5.3.2 Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno dle normy ČSN EN 196-1 tlakovým namáháním do porušení zkušebního tělesa. Dle výpočetního vzorce uvedeného v normě byla stanovena pevnost v tlaku. [2]

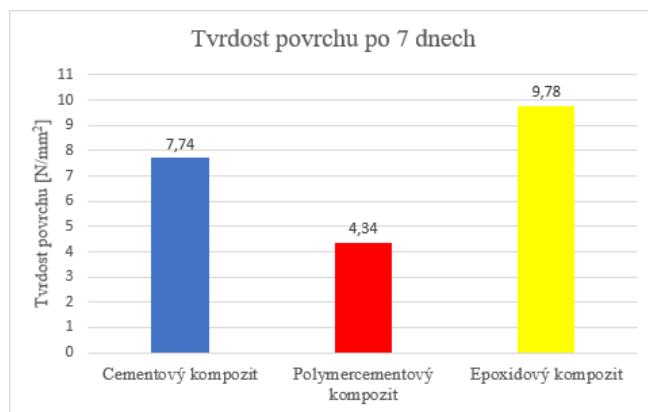


**Obrázek 37:** Grafické vyhodnocení pevností v tlaku u dříve vyvíjených kompozitů [2]

Obdobně jako u pevnosti v tahu za ohybu dosahoval nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku kompozit na epoxidové bázi, který dosáhl výrazně vyšších hodnot v řádech desítek MPa než kompozit na cementové a polymercementové bázi po 7 dnech zrání. [2]

### 5.3.3 Tvrdost povrchu

Ze získaných rozměrových a hmotnostních parametrů byla vypočtena objemová hmotnost. Poté došlo k provedení stanovení tvrdosti povrchu dle normového postupu normy ČSN EN 13892-6. Pomocí výpočetního vztahu byla stanovena tvrdost povrchu kompozitu. Pomocí normového výpočetního vztahu byla stanovena tvrdost povrchu kompozitu. [2]



**Obrázek 38:** Grafické vyhodnocení tvrdosti povrchu u dříve vyvíjených kompozitů [2]

Hodnoty naměřené při zkoušce tvrdosti u dříve vyvíjených kompozitů nebyly tolik odlišné, zejména pak u kompozitu na epoxidové bázi a kompozitu na cementové bázi. [2]

#### 5.3.4 Odolnost proti teplotním šokům

Poslední zkouškou bakalářské práce při vývoji vysoce odolného kompozitu byla odolnost proti teplotním šokům, která byla provedena na základě normy DIN 52313.

Teplota ochlazení činila 18 °C a teplota ohřátí činila:

1. 150 °C,
2. 180 °C.

Výstupem hodnocení bylo vizuální posouzení, při kterém se posuzovalo, jestli nedošlo k trhlinám či porušení kompozitu.

Ani v jednom z případů nedošlo k žádné vizuální změně a kompozit tedy odolal zahřátí a následnému ochlazení bez jakéhokoliv porušení. [2]

### 5.4 Souhrnné shrnutí materiálových vlastností současného stavu poznání

V následující tabulce jsou shrnuty výsledky, kterých bylo u bakalářské práce dosaženo. Především epoxidový kompozit dosáhl výborných pevností. [2]

**Tabulka 4:** Souhrnné výsledky všechází současného stavu kompozitu [2]

|                            | Jednotka             | Kompozit<br>na<br>cementové<br>bázi | Kompozit na<br>polymercementové<br>bázi | Kompozit<br>na<br>epoxidové<br>bázi |
|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| Pevnost v tlaku            | [MPa]                | 13,7                                | 5,1                                     | 79,8                                |
| Pevnost v tahu<br>za ohybu | [MPa]                | 2,9                                 | 1,7                                     | 22,3                                |
| Tvrdość<br>povrchu         | [N/mm <sup>2</sup> ] | 7,74                                | 4,34                                    | 9,78                                |
| Objemová<br>hmotnosť       | [kg/m <sup>3</sup> ] | 2180                                | 1850                                    | 1900                                |

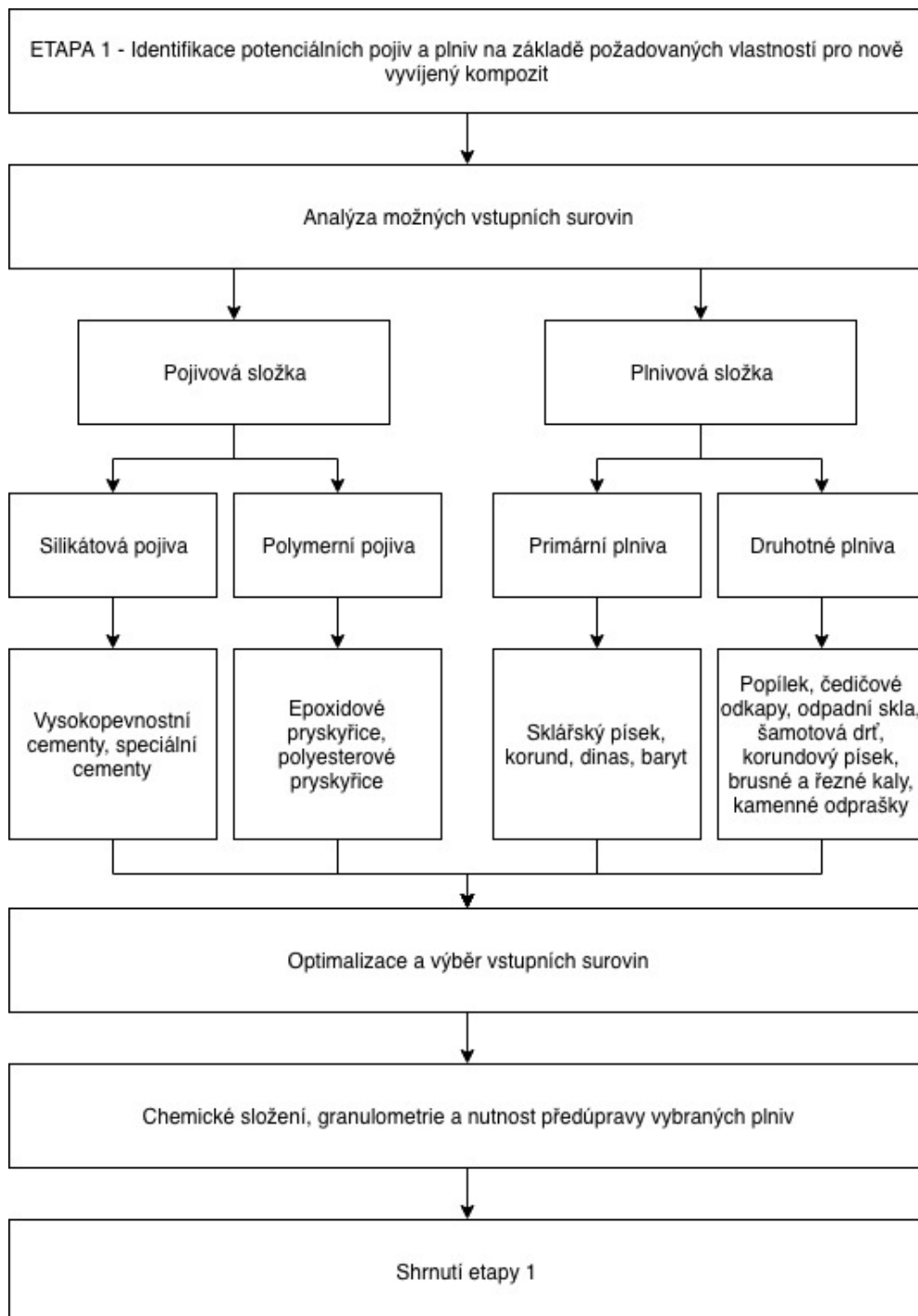
## II. PRAKTICKÁ ČÁST

### 6 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je vývoj vhodných receptur pro výrobu vysoce odolného materiálu, který by se svými materiálovými vlastnostmi měl blížit vlastnostem výrobků z taveného čediče. Tento materiál by měl být využit v oblasti stokových sítí, kde je tavený čedič hojně používaným materiálem. V těchto aplikacích nově vyvíjený materiál zastoupí funkci čedičových prvků v rozměrově atypických místech. V práci bude charakterizována široká škála hmot s výjimečnými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi, které umožní jejich zakomponování v recepturách vysoce odolného materiálu. Rovněž bude kladen důraz na využití druhotných surovin vykazujících požadované vlastnosti, a to v co nejvyšší míře. Následně dojde k sestavení spektra zkušebních metod pro ověření vlastností nově vyvinutých receptur, které by měly být schopné obstát v prostředích s extrémními expozičními podmínkami, stejně tak jako prvky z taveného čediče. Ve finální části řešení diplomové práce budou prostřednictvím optimalizace všech dosažených výsledků vybrány receptury s nejvhodnějšími vlastnostmi. Finální receptury by měly vykazovat nejen vysoké hodnoty pevností, ale také chemickou odolnost a odolnost vůči mechanickému poškození. Hodnoty ověřovaných vlastností budou porovnány s hodnotami, které jsou deklarovány pro výrobky z taveného čediče a zhodnoceno, do jaké míry se k nim podařilo přiblížit.

## 7 METODIKA ŘEŠENÍ

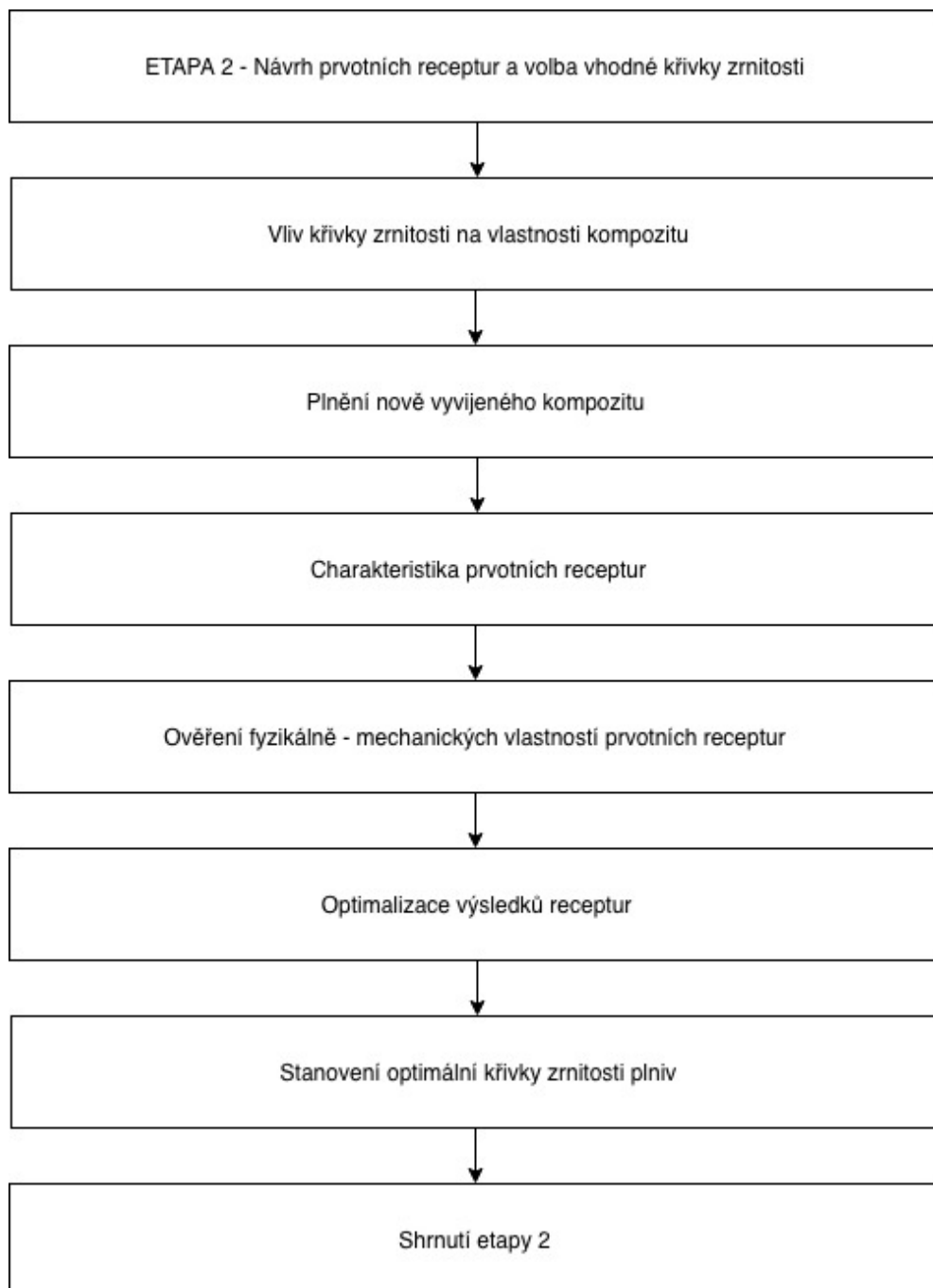
### ETAPA 1 – Identifikace potenciálních pojiv a plniv na základě požadovaných vlastností pro nově vyvíjený kompozit



První etapa diplomové práce se bude zaměřovat na identifikaci potenciálních pojiv a plniv, kde budou rozděleny u pojivové složky na silikátová pojiva a polymerní pojiva. U plnivové složky budou rozděleny na primární plniva a druhotná plniva. Všechny

pojivové a plnivové složky budou následně charakterizovány svými zástupci. V rámci první etapy bude provedena optimalizace vstupních surovin. Závěrem této etapy bude zjišťováno chemické složení, granulometrie, nutnost předúpravy surovin a celkové shrnutí etapy.

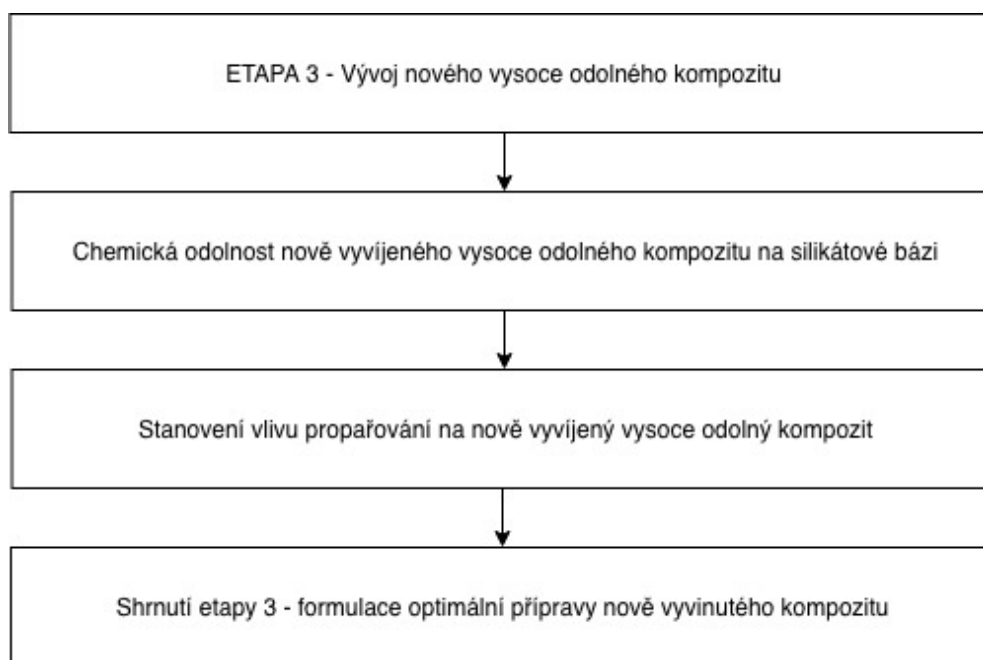
## **ETAPA 2 – Návrh prvotních receptur a volba vhodné křivky zrnitosti**



Druhá etapa se bude zabývat návrhem prvotní receptur a určením vhodné křivky zrnitosti plniv. Stanoví se samotný vliv křivky na vlastnosti kompozitu. Dále bude rozebráno plnění nově vyvíjeného kompozitu. Následně bude provedena charakteristika

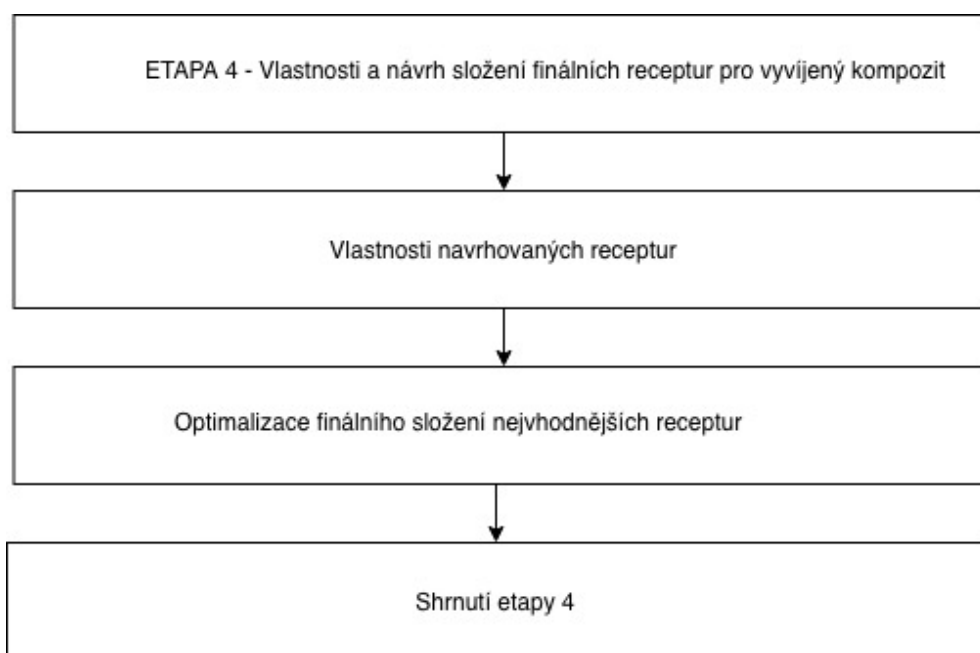
prvotních receptur. Dojde také k ověření fyzikálně – mechanických vlastností prvotních receptur. Cílem této etapy bude prvotní optimalizace receptur, jejich formulace, finální stanovení optimální křivky zrnitosti pro výrobu vysoce odolného kompozitu a shrnutí druhé etapy.

### **ETAPA 3 – Vývoj nového vysoce odolného kompozitu**



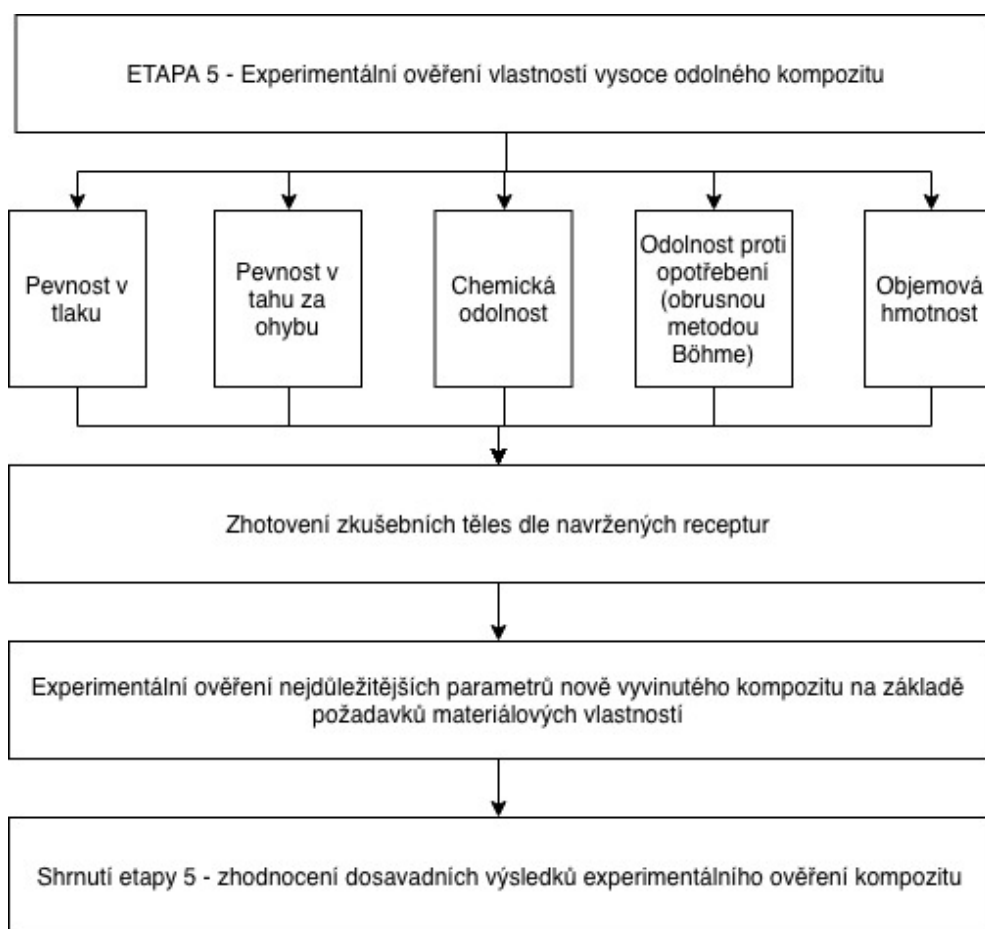
Třetí etapa naznačí samotný vývoj nového vysoce odolného kompozitu, kde bude provedeno stanovení chemické odolnosti u kompozitu na silikátové bázi. Následovat bude stanovení vlivu propařování. Shrnutím této etapy bude formulace optimální přípravy nově vyvíjeného kompozitu.

#### **ETAPA 4 – Vlastnosti a návrh složení finálních receptur pro vyvíjený kompozit**



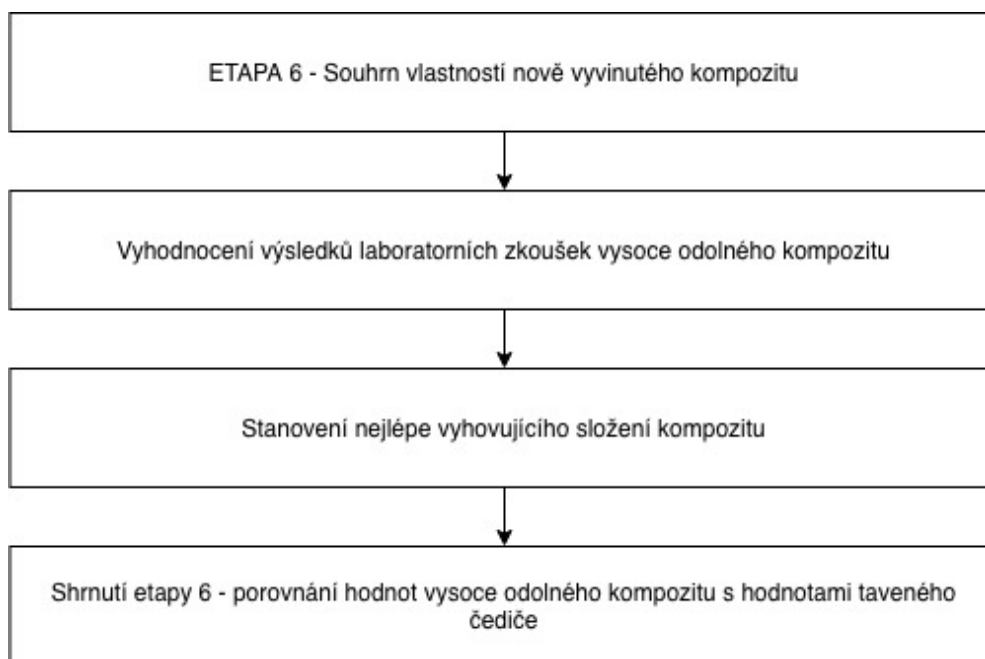
Čtvrtá etapa bude mít za úkol zobrazit návrh finálních receptur pro vyvíjený kompozit, kde budou podrobně určeny vlastnosti těchto navrhovaných receptur. Posledním bodem této etapy bude optimalizace finálního složení nejvhodnějších receptur a následné shrnutí čtvrté etapy.

## ETAPA 5 – Experimentální ověření vlastností vysoce odolného kompozitu



Etapa číslo 5 bude mapovat experimentální ověření vlastností vysoce odolného kompozitu, kdy v prvním kroku budou definovány prováděné zkoušky. Následovat bude zhotovení zkušebních těles, které budou vycházet z navržených receptur a poté dojde k ověření nejdůležitějších materiálových vlastností. Závěrem etapy bude shrnutí, kde budou zhodnoceny dosavadní výsledky experimentálního ověření kompozitu.

## ETAPA 6 – Souhrn vlastností nově vyvinutého kompozitu



V poslední etapě dojde k popsání souhrnu vlastností, kterých nově vyvinutý kompozit dosáhne. Následně budou tyto výsledky vyhodnoceny a bude stanoveno nejvhodnější složení kompozitu, které bude vykazovat nejlepší hodnoty. Cílem této etapy bude shrnutí, kde dojde ke srovnání hodnot vysoce odolného kompozitu s hodnotami taveného čediče.

## **8 ETAPA 1 – Identifikace potenciálních pojiv a plniv na základě požadovaných vlastností pro nově vyvíjený kompozit**

Při identifikaci potenciálních pojiv a plniv jsou rozděleny obě skupiny na dvě dílčí kategorie. Pojiva se dělí na silikátová pojiva a polymerní pojiva.

Silikátová pojiva obsahují různé druhy cementů, které by danému kompozitu mohly zlepšit vlastnosti vyvíjeného kompozitu. U polymerních pojiv jsou hlavním zástupcem dva druhy pryskyřic a to zejména epoxidová pryskyřice a také polyesterová pryskyřice.

Rozdělení plniv je obdobné, jako tomu bylo v rámci předcházejících vývojových prací – primární a druhotná plniva. Primární plniva jsou zastoupeny materiály, jako je korund, baryt, dinas a další. Do druhotných plniv jsou zahrnuty: odkapy z výroby taveného čediče, popílek, struska, betonová drť, brusné a řezné kaly a jiné.

### **8.1 Analýza možných vstupních surovin**

U pojivových složek je analýza možných vstupních surovin určena na základě dostupných informací od výrobců. To je provedeno zejména z technických listů dané suroviny. Naopak analýza plnivových složek je prováděna pomocí základních zkoušek. Jsou zjišťovány především tyto údaje:

- chemické složení,
- granulometrie,
- nutnost předúpravy surovin,
- RTG analýza,
- křivka zrnitosti.

### **8.2 Pojivová složka**

Pojivovou složku činí dvě možné formy zástupců této oblasti, kterými jsou silikátová pojiva a polymerní pojiva. Tyto pojiva mají jiné složení a celou podstatu pojení s plnivem a dalšími přísadami.

### 8.2.1 Silikátová pojiva

Silikátová pojiva představují různé druhy cementů, kde to mohou být například:

- běžné cementy,
- vysokopevnostní cementy,
- speciální cementy.

Silikátová pojiva patří mezi hydraulická pojiva. Rozdělují se především podle složení cementu a podle pevnostní třídy. Vhodná je pro vyvíjený kompozit zcela jistě pevnostní třída. Pevnostní třídy silikátového pojiva se dělí na:

- 32,5 N/32,5 R,
- 42,5 N/42,5 R,
- 52,5 N/52,5 R.

Silikátová pojiva obsahují spoustu oxidů a mezi ty hlavní patří:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Mezi běžné cementy spadají cementy nižších pevnostních tříd. Mezi speciální cementy patří druhy, které mají své specifické vlastnosti. Po pevnostní stránce to není nejlepší volba. Jako hlavní zástupce silikátové varianty se tedy jeví pro výrobu vysoce odolného kompozitu volba vysokopevnostního cementu. Vysokopevnostní cementy zvyšují pevnost výsledného materiálu. Nejvyšší dostupná pevnostní třída na českém trhu u silikátového pojiva je cement s pevnostní třídou 52,5.

### 8.2.2 Polymerní pojiva

Polymerní pojiva představují složky na bázi pryskyřic. Pryskyřice vykazují velmi dobré vlastnosti. Škála pryskyřic je velmi široká a pro vývoj vysoce odolného kompozitu se jako nejvhodnější jeví epoxidová pryskyřice. Epoxidové pryskyřice byly předmětem dřívějšího vývoje vysoce odolného kompozitu.

#### 8.2.2.1 Epoxidová pojiva – epoxidové pryskyřice (EP)

Epoxidové pryskyřice obsahují 2 složky, z nichž jedna je ve formě tvrdila. Epoxidové pryskyřice dosahují vysokých pevnostních hodnot a malého smrštění při vytvrzování. Pevnosti v tlaku činí nad 50 MPa. Na základě dřívějšího zkoumání kompozitu z epoxidových pryskyřic je prokazatelná tepelná odolnost a také výborná chemická odolnost materiálu. Z chemického hlediska odolávají kyselinám, zásadám, rozpouštědlům, solím a dalším chemikáliím.

## 8.3 Plnivová složka

Jako plnivo je bráno kamenivo různého druhu a různé frakce. Plnivová složka je rozdělena do dvou podskupin - primární plniva a druhotná plniva. Primární plnivo je kamenivo, které je dostupné pro použití. Druhotná plniva vznikají například jako vedlejší produkt jiné výroby, lze jimi nahradit primární suroviny a znovu použít do výroby prvků.

### 8.3.1 Primární plniva

Mezi primární plniva patří suroviny, které jsou dostupné a vznikly při vývoji Země. Jsou používány ve stavebnictví. Do této skupiny plniv je v našem případě zahrnut sklářský písek, dinas, korund a baryt.

#### 8.3.1.1 Sklářský písek

Sklářský písek spadá do křemenných surovin (křemičitá hornina), jejichž hlavní místo ve složení zaujímá oxid křemičitý. Z toho tedy plyne název křemičitý písek. Má světlou až bílou barvu. Jakožto primární surovina se využívá pro výrobu skla a jako plnivo ve stavebním průmyslu. Přírodní hornina musí být v prvním kroku vyčištěna, podrcena a následně vytříděna na určité frakce. [37]



***Obrázek 39:** Sklářský písek [38]*

#### 8.3.1.2 Korund

Korund jako materiál ve stavebnictví se dělí na dva různé druhy – bílý a hnědý korund. Bílý korund vzniká roztavením čistého oxidu hliníku v indukčních pecích. Po roztavení bílý korund vychladne, následně je opracován a roztříděn. Tento typ korundu vykazuje

výborné brusné vlastnosti. Minimální obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  činí 99,6 %. Naopak hnědý korund je produkován pálením bauxitu, k čemuž dochází také v indukčních pecích při teplotě 1600 °C. Následuje ochlazení, drcení a roztřizení.

Využití korundu je různorodé. Oba korundy jsou využívány pro výrobu brusných nástrojů a pro výrobu žáromateriálů. Hnědý korund má pak význam při výrobě betonových a pryskyřicových podlah. [39]



**Obrázek 40:** Bílý korund [39]



**Obrázek 41:** Hnědý korund [40]

#### 8.3.1.3 Dinas

Dinas se vyrábí z křemenců, křemencových písků, drceného dinasového odpadu a vápna. Výroba probíhá tvarováním na hydraulických nebo vibračních lisech. Druhý způsob je sušením a třetí způsob je výpalem při teplotě 1400 °C. Dinas vyniká svými vlastnostmi, především vysokou pevností, odolností proti kyselým taveninám a dlouhodobou životností v žáru. Nevýhodou je malá odolnost, když klesne teplota pod 600 °C. Je využíván pro stavbu pecí ve sklářství, hutnictví a také v keramické výrobě. [41]

#### 8.3.1.4 Baryt

Baryt je ve stavebnictví využíván jako barytová drť, která představuje přírodní těžké kamenivo, které vykazuje vyšší obsah barytu a je směsí následujících minerálů:

- baryt  $\text{BaSO}_4$ ,
- siderit  $\text{FeCO}_3$ ,
- křemen  $\text{SiO}_2$ ,
- ostatní doprovodné horniny.

Výroba je provázena drcením a třízením barytové suroviny. Tato barytová surovina obsahuje jako hlavní složku síran barnatý  $\text{BaSO}_4$ . Barytová drť je především používána jako kamenivo do malt a betonů. Tyto malty a betony jsou určeny pro výrobu betonových prvků, které mají požadavek vyšší objemové hmotnosti. Dále jsou tyto malty využívány na omítky, které zabezpečují radiační ochranu osob před zdroji ionizujícího záření. [42]

### **8.3.2 Druhotná plniva**

Druhotná plniva jsou materiály, kterými je možné nahradit primární suroviny. Vznikají jako vedlejší produkt výroby nebo jsou charakterizovány jako odpad z výroby. Mohou být tedy opětovně použity do výroby. V některých případech je možné nepovedený výrobek použít na výrobu nového kusu.

Mezi druhotné suroviny tak ještě řadíme popílek, odkapy z taveného čediče, odpadní skla, šamotová drť, korundový písek, brusné a řezné kaly, kamenné odprašky.

#### **8.3.2.1 Popílek**

Popílek je jemný prášek šedé barvy, který vzniká při spalování černého uhlí nebo spalováním hnědého uhlí v elektrárnách. Prášek je tvořen sklovitými částicemi, které mají kulovitý tvar. Hlavní oxidy v chemickém složení jsou  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Popílek jako takový vykazuje pucolánové vlastnosti. [43]

Nejčastější dva typy popílků jsou: vysokoteplotní popílký a fluidní popílký. Vysokoteplotní popílký vznikají při teplotách  $1200 - 1700^\circ\text{C}$ , naopak fluidní popílký vznikají při nižších teplotách, které jsou v rozmezí  $800 - 850^\circ\text{C}$ .

Obecně jsou popílký nehomogenní a jsou složeny z jemných prachových částic. Měrná hmotnost popílků je v rozmezí  $2,1 - 3,0$ , měrný povrch je od  $170$  do  $1000 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ . Jemnost mletí ovlivňuje měrný povrch a granulometrii. Velikost zrn popílků je  $0,001 - 0,1 \text{ mm}$ .

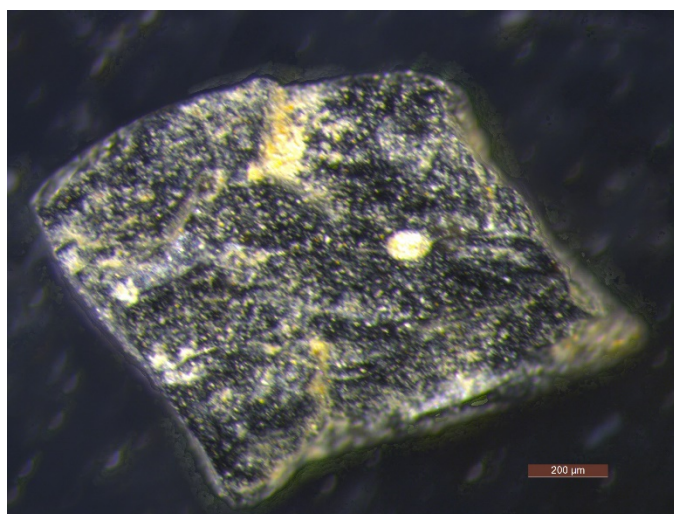
Použití popílků má velký význam pro stavebnictví. Jeho využití zahrnuje mnoho odvětví, dá se použít následovně: příměs do betonu, stavba komunikací, surovina do cementu, směsné cementy, pórobeton a plnivo. [43]

**Tabulka 5:** Běžné chemické složení popílku [43]

| Chemický vzorec oxidu          | Procentuální zastoupení<br>ox. – vysokoteplotní<br>popílky | Procentuální zastoupení<br>ox. – fluidní popílky |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 52,22 %                                                    | 42,34 %                                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28,01 %                                                    | 19,44 %                                          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,66 %                                                     | 5,79 %                                           |
| CaO                            | 3,09 %                                                     | 20,79 %                                          |
| MgO                            | 1,38 %                                                     | 2,49 %                                           |
| K <sub>2</sub> O               | 1,59 %                                                     | 1,41 %                                           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,51 %                                                     | 0,37 %                                           |
| SO <sub>3</sub>                | 0,6 %                                                      | 5,26 %                                           |
| TiO <sub>2</sub>               | 2,37 %                                                     | 1,55 %                                           |
| ztráta žíháním                 | 5,9 %                                                      | 10,7 %                                           |

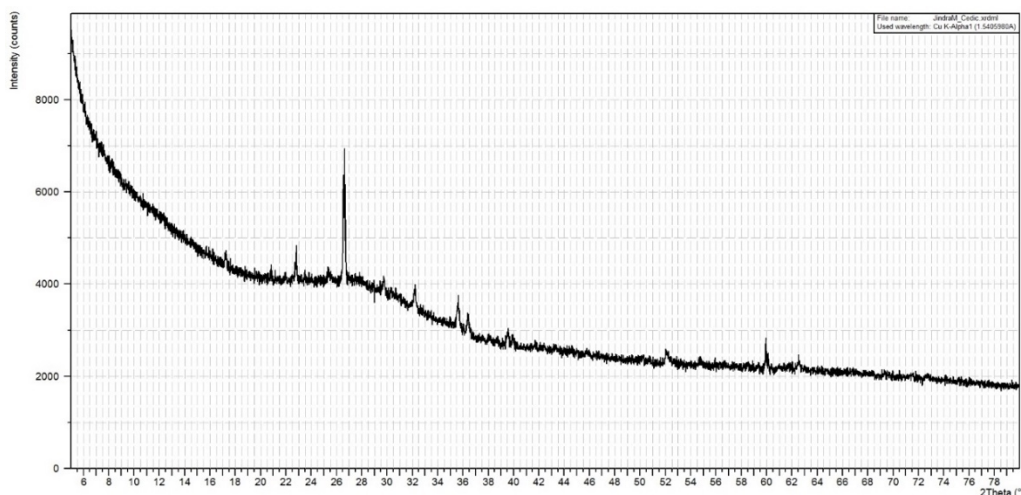
### 8.3.2.2 Čedičové odkapy

Čedičové odkapy jsou černé barvy. Vznikají při tavení čediče jako vedlejší produkt. Čedičová hornina je odlévána po roztavení do formy, zbývající čedičová tavenina odkapává do studené vody, kde dochází k rychlému chlazení a tímto vznikají čedičové odkapy. Vlastnosti čedičových odkapů jsou odpovídající jako u taveného čediče.



**Obrázek 42:** Snímek mikrostruktury čedičového odkapu z optického mikroskopu [2]

Dřívější analýzy čedičových odkapů na rastrovacím elektronovém mikroskopu odhalilo vyšší podíl amorfní fáze, který byl výsledkem rychlého chlazení. Po mineralogické stránce byla na RTG analýze odhalena přítomnost křemenu a gehlenitu. [2]



**Obrázek 43:** Záznam z RTG analýzy provedené na čedičových odkapech [2]

### 8.3.2.3 Odpadní skla

Odpadní sklo je jedním z materiálů, který je využíván ve stavebnictví. Odpadní sklo je recyklováno a vstupuje znovu do výroby jako druhotná surovina, která neztrácí jakoukoliv vlastnost. Sklo může být recyklováno, aniž by ztratilo své chemické a fyzikální vlastnosti. Výhodou recyklace skla je to, že nemusí být nijak upraveno. Jedinou úpravou je drcení na skelný písek. Druhy odpadního skla: odpadní obalové sklo, autosklo, odpadní sklo ze solárních panelů a odpadní sklo obrazovkové. Odpadní sklo slouží jako izolační materiál, kamenivo v betonu nebo také jako náhrada cementu. [44]

Předpokládaná produkce odpadního autoskla je kolem 20 tisíc tun ročně, životnost solárních panelů zhruba 15 let. Odpadní sklo musí být do cementové matrice upraveno. Nejprve dojde k podrcení vstupní suroviny v čelistovém drtiči na hrubost cca 2 mm, poté k mletí v kulovém mlýnu na hrubost pod 0,068 mm, přesetí na síť oka 0,068 mm a vznikne finální produkt.

Nevýhodou použití odpadního skla je možnost vzniku alkalicko – křemičité reakce, která má za důsledek vznik trhlin a následný rozpad materiálu.

**Tabulka 6:** Běžné chemické složení odpadního skla [44]

| Chemický vzorec oxidu                | Procentuální zastoupení oxidu (hm. %) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                     | 68 – 74 %                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 0,5 – 3 %                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | < 1 %                                 |
| CaO                                  | 7 – 12 %                              |
| MgO                                  | 1 – 4 %                               |
| Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O | 12 – 15 %                             |
| MnO                                  | < 0,3 %                               |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | < 0,25 %                              |
| PbO                                  | < 3 %                                 |
| SrO                                  | < 3 %                                 |
| BaO                                  | < 3 %                                 |

#### 8.3.2.4 Šamotová drť

Samotný šamot je materiál, který spadá do žáruvzdorných materiálů. Je vyráběn z pálených jílu, lupků nebo kaolinů (ostřiva), dále pak z nepálených jílu (pojiva) a vody. Výroba probíhá mletím, mísením, zvlhčením, vytvářením (ručně, strojně), sušením a finálním vypalováním. Šamot má malou odolnost proti zásaditým agresivním látkám. Pevnost v tlaku se pohybuje v rozmezí 10 – 40 MPa. Nevýhodou je nasákavost, která činí 8 – 16 %, naopak výhodou je žáruvzdornost. [41]

Šamotová drť vzniká jako druhotný materiál z nevyhovujících šamotových výrobků – např. šamotové kotouče a šamotové tvarovky. Tyto výrobky je nutné rozdrtit, vytrít na požadované frakce a lze je použít jako plnivo. [41]



**Obrázek 44:** *Nevyhovující šamotové výrobky – kotouče*

#### **8.3.2.5 Korundový písek**

Korundový písek má odpovídající bázi korundu a vlastnosti stejné jako samotný korund. Využití může být také jako plnivo do betonových prvků nebo dalších kompozitů.

#### **8.3.2.6 Brusné a řezné kaly**

Brusné kaly jsou řazeny mezi nebezpečné odpady a obvykle bývají skládkovány. Vznik brusných kalů pochází z metalurgické výroby – broušení oceli. Obsah kovu činí 70 %. Kaly jsou ve většině případů znečištěny. V ČR činí roční produkce brusných kalů tisíce tun za rok. Nevýhodou jsou náklady s tím spojené, které jsou finančně náročné. [45]

#### **8.3.2.7 Kamenné odprašky**

Kamenné odprašky jsou základním produktem pro získání jemně mletého aktivního kamenného prachu, který se řadí mezi cenné druhotné materiály. Vznik kamenných odprašků je charakterizován z drcení a řezání kameniva. Hromadí se tu jako vedlejší podíl, tedy jako odpad. Jsou to velmi jemné částice, které jsou zachyceny na filtrech produkčních linek. Velikost zrn je opravdu malá a pohybuje se v rozmezí 0,0005 – 0,1 mm. Využití aktivního kamenného prachu přináší tyto kladné poznatky:

- náhrada plniva v cementových směsích,
- snížení teploty hydratace,
- zlepšení zpracovatelnosti směsi,

- ochrana životního prostředí,
- snížení výrobních nákladů při zachování vysoké kvality materiálu.

Vzhledem k použití se dá využít jako plnivo do cementových směsí (lepidla, malty, omítky), plnivo do tvárnic a stavebních bloků. Mimo stavebnictví lze využít v zemědělství jako přírodní minerální plniva. [46]

## 8.4 Optimalizace a výběr vstupních surovin

Prvotní optimalizace vstupních surovin slouží pro zúžení okruhu uvažovaných zkoušených materiálů. Před návrhem receptur muselo dojít k výběru těch nejvhodnějších.

Mezi zohledněná kritéria pro optimalizaci vstupních surovin bylo zvoleno: maximální velikost zrn, objemová hmotnost, nutnost předúpravy a zpracovatelnost.

Velmi důležitou částí optimalizace bylo stanovení váhy jednotlivých kritérií, které představovalo stěžejní část výpočtu multikriteriální optimalizace.

*Tabulka 7: Preference jednotlivých kritérií - suroviny*

|                    | Rozhodnutí o preferování jednoho kritéria před jinými |                |                    |                 |
|--------------------|-------------------------------------------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| Kritérium          | Cena                                                  | Maximální zrna | Nutnost předúpravy | Zpracovatelnost |
| Cena               | 1,00                                                  | 0,75           | 1,25               | 0,75            |
| Maximální zrna     | 1,33                                                  | 1,00           | 1,00               | 0,75            |
| Nutnost předúpravy | 0,8                                                   | 1,00           | 1,00               | 0,75            |
| Zpracovatelnost    | 1,33                                                  | 1,33           | 1,33               | 1,00            |

Vlastnosti, které se v tabulce nacházejí, mají odlišné váhy kritérií, podle nichž dojde k ohodnocení vlastností materiálu. Následovalo vyčíslení jednotlivých kritérií.

Pro jednotlivé materiály bylo voleno číslo pro tabulkové zaznamenání, kde rozdělení je následovné: sklářský písek – 1, korund – 2, dinas – 3, baryt – 4, popílek – 5, čedičové odkapy – 6, odpadní skla – 7, šamotová drť – 8, korundový písek – 9, brusné a řezné kaly – 10, kamenné odprašky - 11.

**Tabulka 8:** Vyčíslení daných kritérií - suroviny

|                           | Vyčíslení daných kritérií |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kritérium                 | 1                         | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| <b>Cena</b>               | 1,5                       | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 1,2 | 0,5 | 1,1 | 1,0 | 1,1 |
| <b>Maximální zrno</b>     | 1                         | 2   | 2   | 3   | 1   | 4   | 5   | 4   | 1   | 1   | 1   |
| <b>Nutnost předúpravy</b> | 0                         | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| <b>Zpracovatelnost</b>    | 5                         | 8   | 4   | 7   | 5   | 9   | 4   | 8   | 3   | 4   | 4   |

V závěru multikriteriální optimalizace bylo rozhodnuto, zda se jednalo o minimum či maximum. Poté došlo k výpočtu a výsledkem bylo procentuální vyjádření, kde nejvhodnější možnost byla nejbližší hodnotě 100 %.

**Tabulka 9:** Výsledné hodnoty preference - suroviny

|                           | Výsledek [%] |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|---------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Kritérium                 | 1            | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          | 11          |
| <b>Cena</b>               | 0,0          | 14,8        | 3,8         | 13,3        | 18,6        | 18,6        | 5,7         | 18,6        | 7,6         | 9,3         | 7,6         |
| <b>Maximální zrno</b>     | 0,0          | 4,7         | 4,7         | 9,3         | 0,0         | 14,0        | 18,6        | 14,0        | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| <b>Nutnost předúpravy</b> | 18,6         | 18,6        | 18,6        | 18,6        | 18,6        | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 18,6        | 18,6        | 18,6        |
| <b>Zpracovatelnost</b>    | 6,2          | 15,5        | 3,1         | 12,4        | 6,2         | 18,6        | 3,1         | 15,5        | 0,0         | 3,1         | 3,1         |
| <b>Suma</b>               | <b>24,8</b>  | <b>53,6</b> | <b>30,2</b> | <b>53,6</b> | <b>43,4</b> | <b>51,2</b> | <b>27,4</b> | <b>48,1</b> | <b>26,2</b> | <b>31,0</b> | <b>29,3</b> |

Z výsledků optimalizace bylo zřejmé, které vstupní suroviny se jeví jako nejvhodnější. Pro vývoj vysoce odolného kompozitu byly vybrány 4 z nich. Mezi tyto suroviny bylo zvoleno: korund, baryt, čedičové odkapy a šamotová drť. Jejich preference a uspořádání jsou zřejmé z výsledků tabulky č. 9.

## 8.5 Chemické složení, granulometrie a nutnost předúpravy vybraných plniv

Po optimalizaci surovin, především plnivové složky, je nutné charakterizovat chemické složení, granulometrii a také zda je nutná předúprava před použitím těchto plniv. Z optimalizace vzešly jako nejvhodnější plniva: čedičové odkapy, šamotová drť, korund a baryt.

### 8.5.1 Čedičové odkapy

Čedičové odkapy byly po této stránce analyzovány již v dřívějším vývoji – v bakalářské práci. Jejich složení, obsah minerálů a další je již tedy známé. Z nových podkladů je nejspíš lehce odlišná pouze křivka zrnitosti.

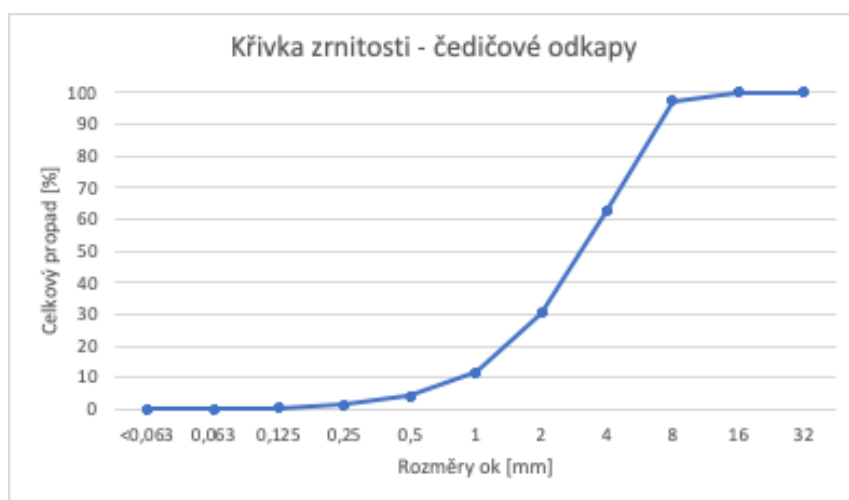
U čedičových odkapů je důležitá nutnost předúpravy, aby byl získán dostatek nejjemnějších frakcí. Tato předúprava je umožněna pomocí drtiče.



**Obrázek 45:** Předupravené čedičové odkapy

**Tabulka 10:** Celkový propad síty - čedičové odkapy

| Rozměr ok na sítích [mm] | Celkový propad [%] |
|--------------------------|--------------------|
| <0,063                   | 0,0                |
| 0,063                    | 0,2                |
| 0,125                    | 0,6                |
| 0,25                     | 1,4                |
| 0,5                      | 4,2                |
| 1                        | 11,7               |
| 2                        | 30,4               |
| 4                        | 62,6               |
| 8                        | 97,3               |
| 16                       | 100,0              |
| 32                       | 100,0              |



**Obrázek 46:** Křivka zrnitosti - čedičové odkapy

**Tabulka 11:** Chemické složení čedičových odkapů

| Chemický vzorec oxidu          | Procentuální zastoupení oxidu (hm. %) |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 45,4                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,8                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,6                                  |
| CaO                            | 9,85                                  |
| MgO                            | 9,39                                  |
| K <sub>2</sub> O               | 1,08                                  |
| MnO                            | 0,273                                 |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,74                                  |
| TiO <sub>2</sub>               | 2,63                                  |

### 8.5.2 Šamotová drť

Šamotová drť byla získána z nevhodných šamotových výrobků, které měly tvar kotoučů. Tyto výrobky nebylo možné použít pro jejich účel, z důvodu kazu samotného výrobku. Jako kaz byly brány mírné odštěpky na šamotovém kotouči. Šamotové kotouče musely být ručně předupraveny na menší kusy. Pro následnou úpravu vzniklých kusů je možné opět použít čelistový drtič, který velké frakce zdrobní do menších.



**Obrázek 47:** Prvotní předúprava šamotového kotouče



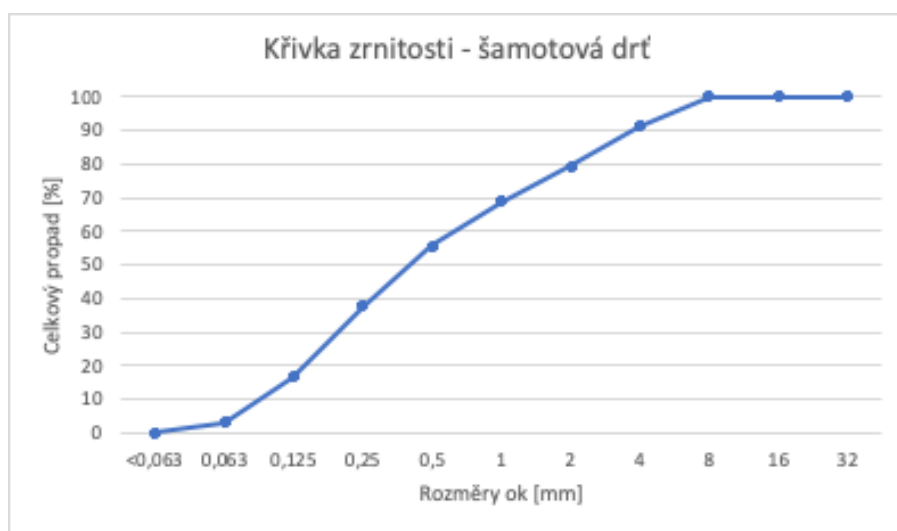
**Obrázek 48:** Kusy šamotových kotoučů určených pro drcení



**Obrázek 49:** Předupravená šamotová drť

**Tabulka 12:** Celkový propad sítý - šamotová drť

| Rozměr ok na sítích [mm] | Celkový propad [%] |
|--------------------------|--------------------|
| <0,063                   | 0,0                |
| 0,063                    | 3,0                |
| 0,125                    | 16,7               |
| 0,25                     | 37,7               |
| 0,5                      | 55,7               |
| 1                        | 68,9               |
| 2                        | 79,3               |
| 4                        | 91,2               |
| 8                        | 100,0              |
| 16                       | 100,0              |
| 32                       | 100,0              |



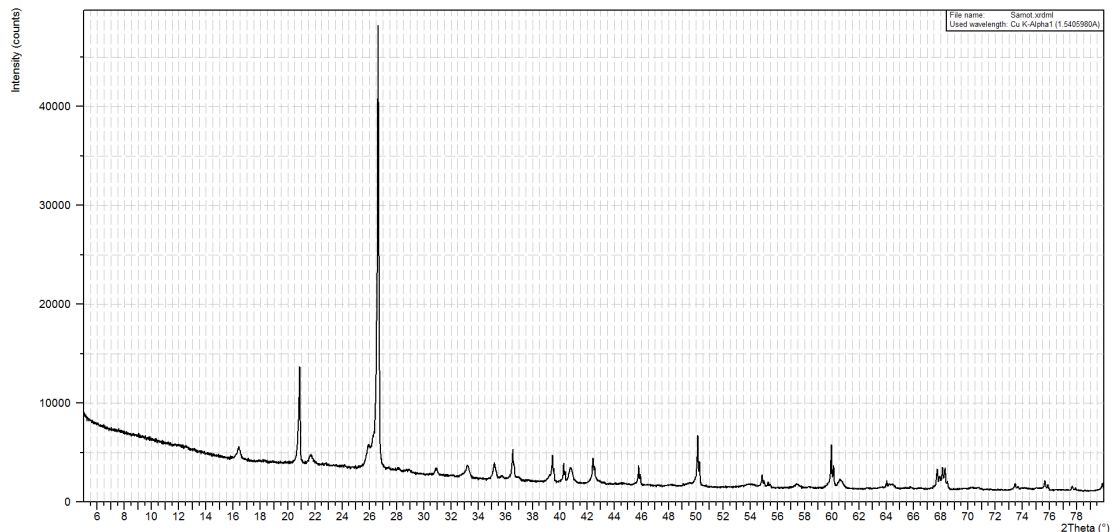
**Obrázek 50:** Křivka zrnitosti - šamotová drť

Složení šamotové drti je velmi blízké šamotu. Toto složení je vyjádřeno v následující tabulce.

**Tabulka 13:** Chemické složení šamotové drti

| Chemický vzorec oxidu          | Procentuální zastoupení oxidu (hm. %) |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 73,8                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18,7                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,3                                   |
| CaO                            | 0,542                                 |
| MgO                            | 0,596                                 |
| K <sub>2</sub> O               | 1,46                                  |
| MnO                            | 0,0162                                |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,0849                                |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,0                                   |

U šamotové drti byla provedena také RTG analýza, kterou bylo zjištěno mineralogické složení vzorku. Výsledné záznamy jsou uvedeny v následujícím záznamu.



**Obrázek 51:** Záznam z RTG - šamotová drť

Ve vzorku šamotové drti, na kterém byla provedena RTG analýza, byly nalezeny tyto minerály: mullit, křemen a cristobalit.

### 8.5.3 Korund

Korund jakožto primární surovina byl požíván ve frakci F14 (1,00 – 2,36 mm), F30 (0,425 – 1,00 mm) a F60 (0,18 – 0,425 mm). Chemické složení vykazuje skoro stoprocentní  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Toto složení je v obou případech obdobné – bílý i hnědý korund.

Vzhledem k dodání určitých frakcí nebyla provedena předúprava před použitím tohoto materiálu z důvodu energetické náročnosti. I u korundu byl proveden síťový rozbor materiálu, kde jednotlivé propady jsou zaznamenány do tabulek a následně vytvořena křivka zrnitosti. Jednotlivé frakce téměř stoprocentně odpovídají rozmezí, které firma zaručuje.



***Obrázek 52:** Korund  
frakce F14*



***Obrázek 53:** Korund  
frakce F30*



***Obrázek 54:** Korund  
frakce F60*

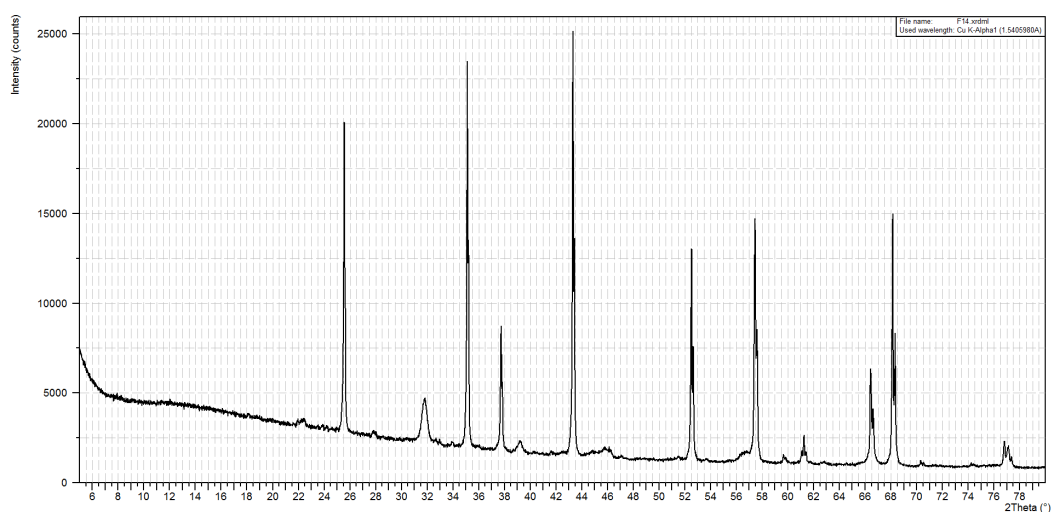
***Tabulka 14:** Celkový propad síty - korund F14*

| <b>Rozměr ok na sítích [mm]</b> | <b>Celkový propad [%]</b> |
|---------------------------------|---------------------------|
| <0,063                          | 0,0                       |
| 0,063                           | 0,0                       |
| 0,125                           | 0,0                       |
| 0,25                            | 0,0                       |
| 0,5                             | 0,0                       |
| 1                               | 0,2                       |
| 2                               | 99,9                      |
| 4                               | 100,0                     |
| 8                               | 100,0                     |
| 16                              | 100,0                     |
| 32                              | 100,0                     |



**Obrázek 55:** Křivka zrnitosti - korund F14

Nejprve je uvedena zrnitost pro F14 a záznam z RTG analýzy. Největší zastoupení má frakce 1 – 2 mm, což odpovídá rozmezí od výrobce.



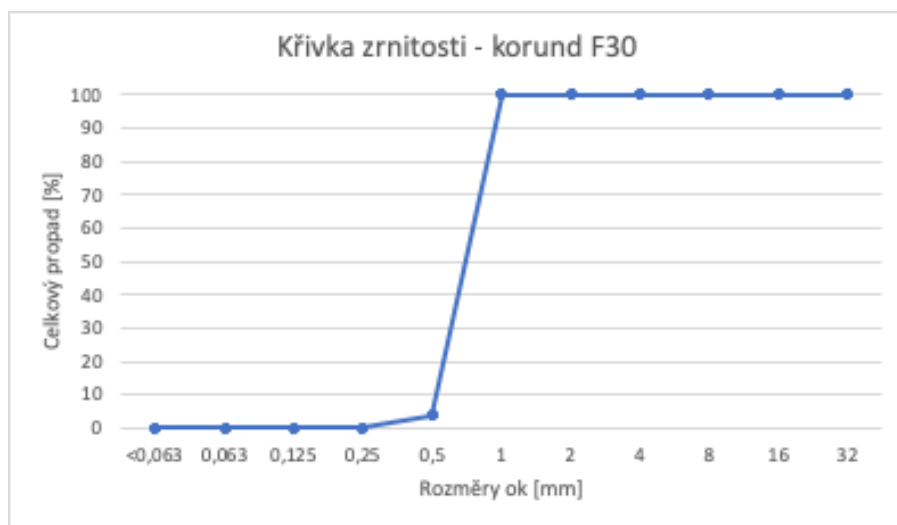
**Obrázek 56:** Záznam z RTG - korund F14

RTG analýza, která byla provedena na vzorku korundu F14, prokázala přítomnost těchto minerálů: korund a cristobalit. Přítomnost cristobalitu může být způsobena prašností v místě uložení, jelikož poblíž byla šamotová drť, v níž je cristobalit obsažen.

Dalším zkoumaným vzorkem byl korund frakce F30, u kterého byl taktéž proveden síťový rozbor a RTG analýza.

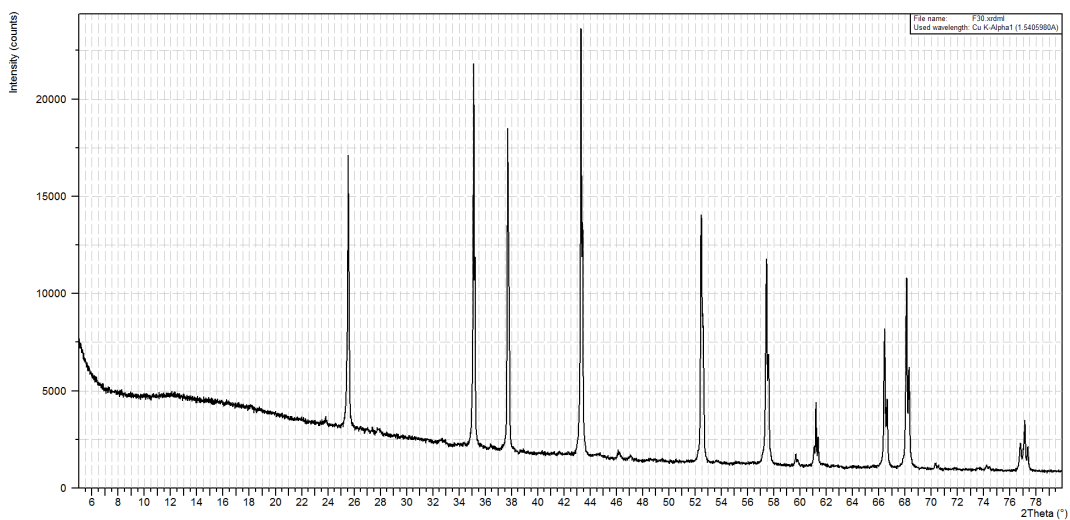
**Tabulka 15:** Celkový propad síty - korund F30

| Rozměr ok na sítích [mm] | Celkový propad [%] |
|--------------------------|--------------------|
| <0,063                   | 0,0                |
| 0,063                    | 0,0                |
| 0,125                    | 0,0                |
| 0,25                     | 0,0                |
| 0,5                      | 3,7                |
| 1                        | 100,0              |
| 2                        | 100,0              |
| 4                        | 100,0              |
| 8                        | 100,0              |
| 16                       | 100,0              |
| 32                       | 100,0              |



**Obrázek 57:** Křivka zrnitosti - korund F30

Z křivky zrnitosti je možné vidět, že nejvíce zastoupená frakce u korundu F60 je frakce v rozmezí 0,5 – 1 mm. I toto rozmezí odpovídá tomu, co udává výrobce.



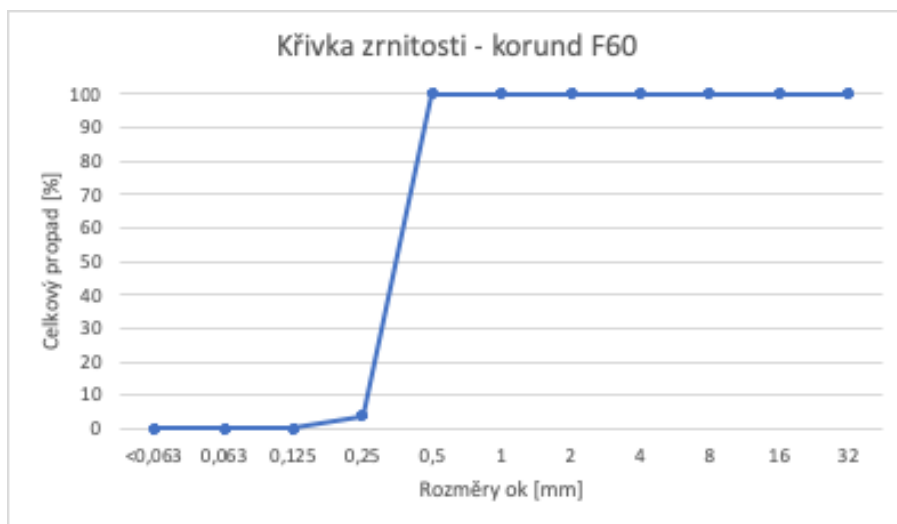
**Obrázek 58:** Záznam z RTG - korund F30

Na základě RTG analýzy byla zjištěna po mineralogickém hledisku přítomnost pouze korundu. Typický výsledek RTG analýzy pro korundový materiál.

Jako poslední u korundového plniva byla stanovena křivka pro korund frakce F60, následně také RTG analýza.

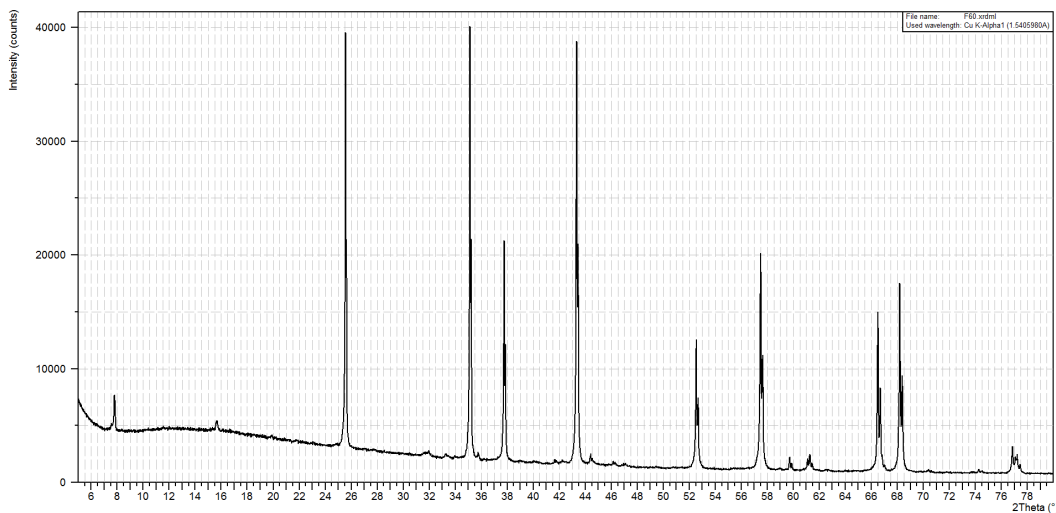
**Tabulka 16:** Celkový propad sítý - korund F60

| Rozměr ok na sítích [mm] | Celkový propad [%] |
|--------------------------|--------------------|
| <0,063                   | 0,0                |
| 0,063                    | 0,0                |
| 0,125                    | 0,0                |
| 0,25                     | 3,9                |
| 0,5                      | 100,0              |
| 1                        | 100,0              |
| 2                        | 100,0              |
| 4                        | 100,0              |
| 8                        | 100,0              |
| 16                       | 100,0              |
| 32                       | 100,0              |



**Obrázek 59:** Křivka zrnitosti - korund F60

Z křivky zrnitosti je čitelné největší zastoupení frakce 0, 25 – 0,5 mm. Toto rozmezí opět garantuje výrobce.



**Obrázek 60:** Záznam z RTG - korund F60

RTG analýza u korundu frakce F60 prokazuje opět přítomnost jediného minerálu, tedy korundu.

### 8.5.4 Baryt

Posledním analyzovaným materiálem byla barytová drť. Po stránce chemického složení se testovaná barytová drť skládá převážně z BaSO<sub>4</sub>. Předúprava byla nutná, baryt

byl sice dodán v požadované frakci 0 – 4 mm, ale bylo nutné ho vysušit. Nasákavost barytové drti činila 19,5 %.

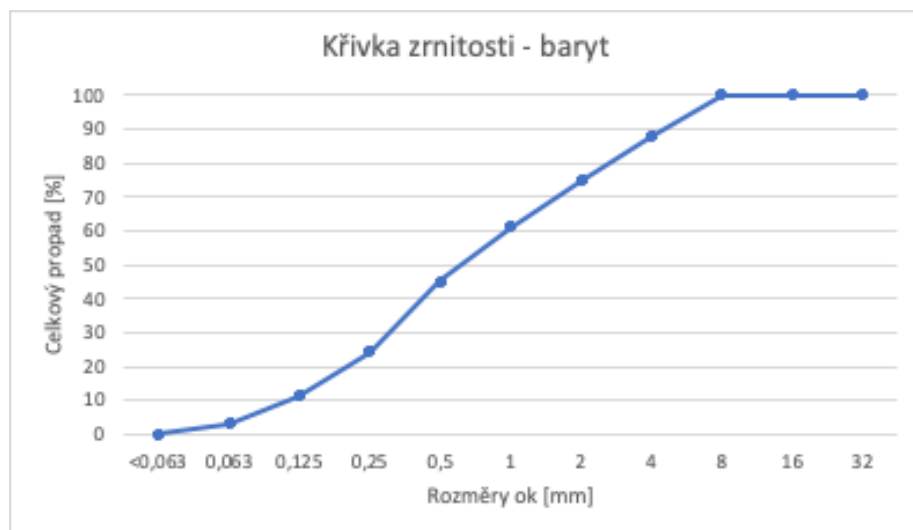
Sítový rozbor pomohl vytvořit křivku zrnitosti, která byla vytvořena z celkového propadu sítem, který je procentuálně vyjádřen v následující tabulce.



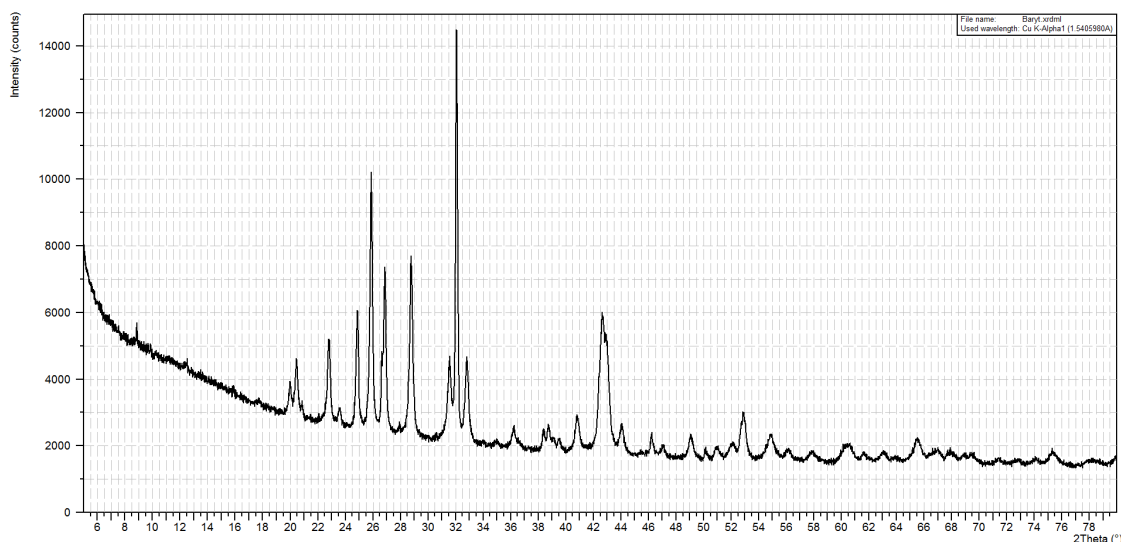
**Obrázek 61:** Barytová drť vhodná pro výrobu kompozitu

**Tabulka 17:** Celkový propad síty - baryt

| Rozměr ok na sítích [mm] | Celkový propad [%] |
|--------------------------|--------------------|
| <0,063                   | 0,0                |
| 0,063                    | 3,0                |
| 0,125                    | 11,4               |
| 0,25                     | 24,4               |
| 0,5                      | 45,2               |
| 1                        | 61,3               |
| 2                        | 74,7               |
| 4                        | 87,6               |
| 8                        | 100,0              |
| 16                       | 100,0              |
| 32                       | 100,0              |



**Obrázek 62:** Křivka zrnitosti – baryt



**Obrázek 63:** Záznam z RTG - baryt

RTG záznam barytové drti byl po mineralogické stránce velmi obsáhlý. Byl zde nalezen výskyt barytu, křemene, sideritu, fluoridu a muskovitu.

## 8.6 Shrnutí etapy 1

V první etapě bylo zvoleno jedno polymerní pojivo a jedno silikátové pojivo. Tato pojiva byla použita při sestavování receptur vysoce odolného kompozitu. Z polymerních poživ byla vybrána epoxidová pryskyřice IN-EPOX 2050. Ze silikátového pojiva, byl vybrán typ cementu vyšší pevnostní třídy 52,5 R, který byl díky svým vlastnostem

nejvhodnější pro vývoj vysoce odolného kompozitu. Tímto druhem cementu tedy byl portlandský cement CEM I 52,5 R Mokrý.

Ve výběru plniv se kromě druhotných surovin objevily i primární suroviny, které by mohly pomoci dosáhnout požadovaných hodnot. Z primárních surovin budou do receptur zahrnuty:

- korund,
- baryt.

Naopak druhotné suroviny zastupují tyto plniva:

- čedičové odkapy,
- šamotová drť.

V úplném závěru první etapy byly charakterizovány samotné plniva a na nich byla určena granulometrie, nutnost předúpravy a také chemické složení.

## **9 ETAPA 2 – Návrh prvotních receptur a volba vhodné křivky zrnitosti**

Druhá etapa praktické části je věnována návrhu prvotních receptur pro vývoj vysoce odolného kompozitu, který může mít mnoho podob na základě uvažovaných pojiv a plniv. Po výběru pojivových složek a optimalizaci plnivových složek bylo sestaveno několik verzí potenciálních receptur, které budou na konci této etapy poprvé optimalizovány. Zastoupení plnivové složky bylo uvažováno z primárních i druhotných plniv, především na základě kvality a vlastností daného materiálu vzhledem k budoucímu využití.

Na základě požadovaných vlastností nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu byla stanovena optimální křivka zrnitosti. V této etapě je také zohledněno procentuální množství plnění, které v kompozitu hraje výraznou roli.

### **9.1 Vliv křivky zrnitosti na vlastnosti kompozitu**

Křivka zrnitosti je důležitou součástí při volbě zastoupení jednotlivých frakcí kameniva. Je vyjádřena křivkou, která udává vztah mezi velikostí zrn kameniva a propadem hmoty zrn, které propadávají zvolenou sadou sít. Jednotlivé hodnoty jsou vykresleny bodově do grafu a následně spojeny souvislou čarou. Na svislé ose je vyjádřen propad sítím v procentech a na vodorovné ose je udáván průměr oka síta v milimetrech.

Křivky zrnitosti mají například vliv na mezerovitost matrice a také na hydratační proces cementu. Pro získání křivky zrnitosti nemusí být použit pouze síťový rozbor, ale může být využito i metody, která spočívá v sedimentaci částic ve vhodné tekutině. Další metodou je difrakce světla.

Na základě optimalizace surovin, zejména plniv byl proveden síťový rozbor používaných plnivových složek, kterými jsou:

- čedičové odkapy,
- šamotová drť,
- korund F14,
- korund F30,
- korund F60,
- baryt.

U všech surovin byla použita navážka 200 g vysušeného materiálu, která byla dle normy ČSN 993-1 prosévána sítí. Jednotlivé zbytky na sítích byly zváženy a následně došlo k výpočtu celkového propadu sítí. Tyto údaje byly zapsány do uvedených tabulek a poté bodově vyneseny do grafu. Spojnice bodů vytvořily křivky zrnitosti. Tyto křivky zrnitosti jsou vyhodnoceny v závěru první etapy u rozboru vstupních surovin. [47]

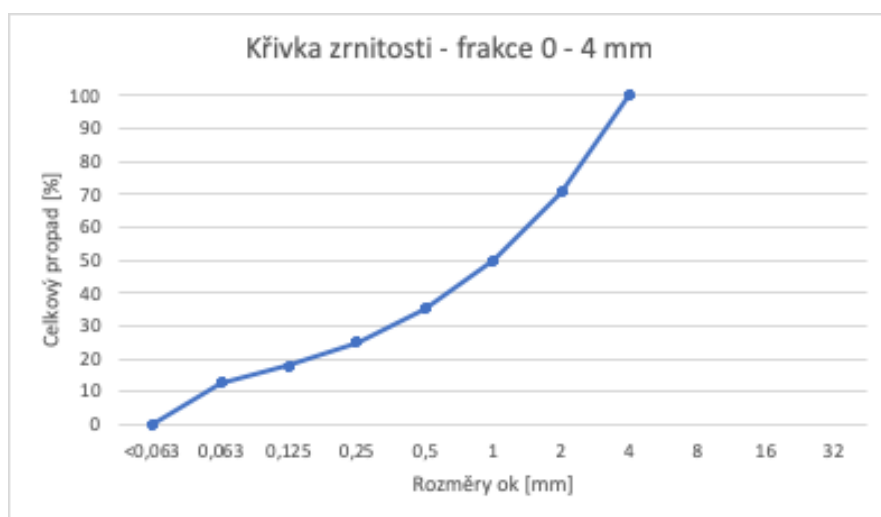
V rámci vývoje vysoce odolného kompozitu byly testovány dvě různé křivky zrnitosti, které se používaly pro výrobu nového kompozitu. Jednalo se o plnivové složky rozdílných frakcí. Tyto frakce byly rozdílného rozmezí. Lišilo se to pouze u dvou plnivových složek (čedičové odkapy a šamotová drť), které jsou druhotného původu. Ostatní plnivové složky se braly jako primární surovina a byly dány frakcí uváděnou výrobcem. Frakce čedičových odkapů a šamotové drti byly uvažovány:

- frakce 0 – 2 mm,
- frakce 0 – 4 mm.

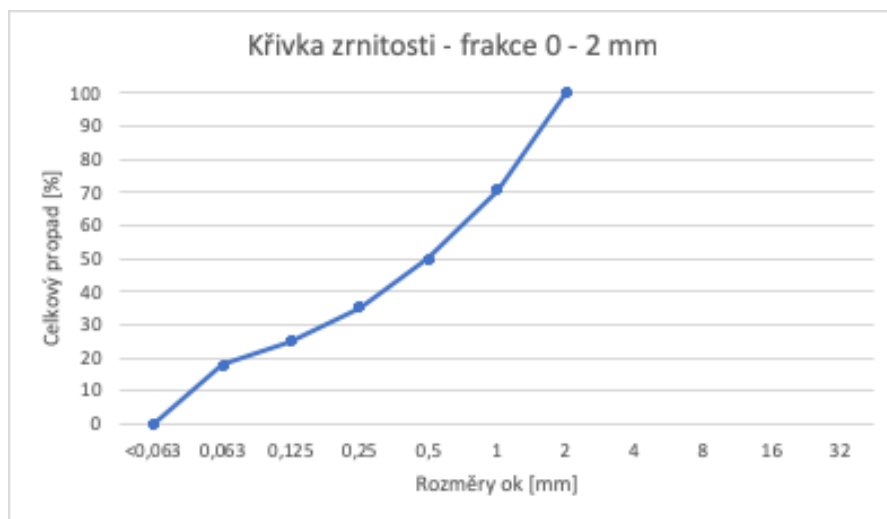
Dále se rozlišovaly frakce korundového plniva, které byly dodány výrobcem. Tyto frakce jsou jemné i hrubější. Typy dodaných a testovaných frakcí jsou:

- F14 – dle výrobce odpovídá rozměrům 1,00 – 2,36 mm,
- F30 – dle výrobce odpovídá rozměrům 0,425 – 1,00 mm,
- F60 – dle výrobce odpovídá rozměrům 0,18 – 0,425 mm.

Pro frakci 0 – 2 mm a frakci 0 – 4 mm byla křivka stanovena na základě výpočtu dle Fullera.



**Obrázek 64:** Křivka zrnitosti čedičových odkapů a šamotové drti frakce 0 - 4 mm dle Fullera



**Obrázek 65:** Křivka zrnitosti čedičových odkapů a šamotové frakce 0 - 2 mm dle Fullera

## 9.2 Plnění nově vyvíjeného kompozitu

Ve vývoji vysoce odolného kompozitu bylo důležité brát v úvahu i množství plniva v daném kompozitu. Toto plnění se lišilo na základě použitého pojiva a také vzhledem k vlastnostem materiálu.

Množství plnění vycházelo i z předešlého vývoje kompozitu, kdy byla hodnota u silikátového kompozitu v míře 75 % a u polymerního byla tato hodnota 70 %. Jednotlivé plnění je znázorněno v návrhu prvotních receptur. Plnění bylo u silikátového kompozitu od 65 % do 85 %, které odpovídalo pro každý druh plniva. U polymerního kompozitu je plnění od 60 % do 90 %. Horní i dolní hranice byla použita vždy pouze v jednom případě. Odlišné plnění bylo určeno z důvodu zpracovatelnosti nově vyvíjeného kompozitu.

Například u šamotové drti bylo zvoleno nízké množství plnění z důvodu nasákavosti materiálu. Naopak struktura materiálu u korundu frakce F14 a F30 má za následek vysokou možnost plnění. Reakce plniva a pojiva bude známa při zhotovení kompozitu.

## 9.3 Charakteristika prvotních receptur

V této části druhé etapy byly navrženy konkrétní návrhy potenciálních receptur pro vývoj nového vysoce odolného kompozitu. Receptury byly sestaveny na základě etapy

1 a bylo také uvažováno s křivkou zrnitosti a množstvím plnění, které bylo předmětem začátku druhé etapy. Tyto receptury byly rozděleny na silikátové a polymerní v následujících dvou tabulkách.

**Tabulka 18:** Složení prvotních receptur na silikátové bázi

| Typ receptury | Pojivová složka                       | Plnivová složka                 | Plnění [%] |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Silikátová 1  | portlandský<br>cement CEM I<br>52,5 R | čedičové odkapy frakce 0 – 2 mm | 65, 75, 85 |
| Silikátová 2  |                                       | čedičové odkapy frakce 0 – 4 mm |            |
| Silikátová 3  |                                       | šamotová drť frakce 0 – 2 mm    |            |
| Silikátová 4  |                                       | šamotová drť frakce 0 – 4 mm    |            |
| Silikátová 5  |                                       | korund F14                      |            |
| Silikátová 6  |                                       | korund F30                      |            |
| Silikátová 7  |                                       | korund F60                      |            |
| Silikátová 8  |                                       | barytová drť                    |            |

**Tabulka 19:** Složení prvotních receptur na polymerní bázi

| Typ receptury | Pojivová složka                          | Plnivová složka                 | Plnění [%] |
|---------------|------------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Polymerní 1   | epoxidová<br>pryskyřice IN-<br>EPOX 2050 | čedičové odkapy frakce 0 – 2 mm | 70, 75, 80 |
| Polymerní 2   |                                          | šamotová drť frakce 0 – 2 mm    | 60, 65, 70 |
| Polymerní 3   |                                          | korund F14                      | 80, 85, 90 |
| Polymerní 4   |                                          | korund F30                      | 80, 85, 90 |
| Polymerní 5   |                                          | korund F60                      | 70, 75, 80 |
| Polymerní 6   |                                          | barytová drť                    | 70, 75, 80 |

## 9.4 Ověření fyzikálně – mechanických vlastností prvotních receptur

Prvotní receptury byly podrobeny experimentálnímu ověření fyzikálně – mechanických vlastností, které představovaly stanovení pevností. Stanovení pevností vychází z normy ČSN EN 196-1. V rámci silikátových receptur byly vyrobeny zkušební

tělesa o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm, u polymerních receptur byly zhotoveny zkušební tělesa o rozměrech  $20 \times 20 \times 100$  mm. Zkušební tělesa byly podrobeny zatěžování a na základě výpočetních vztahů byla vyhodnocena pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Hodnoty pevností a objemové hmotnosti jsou zaznamenány v následující tabulce. [48]

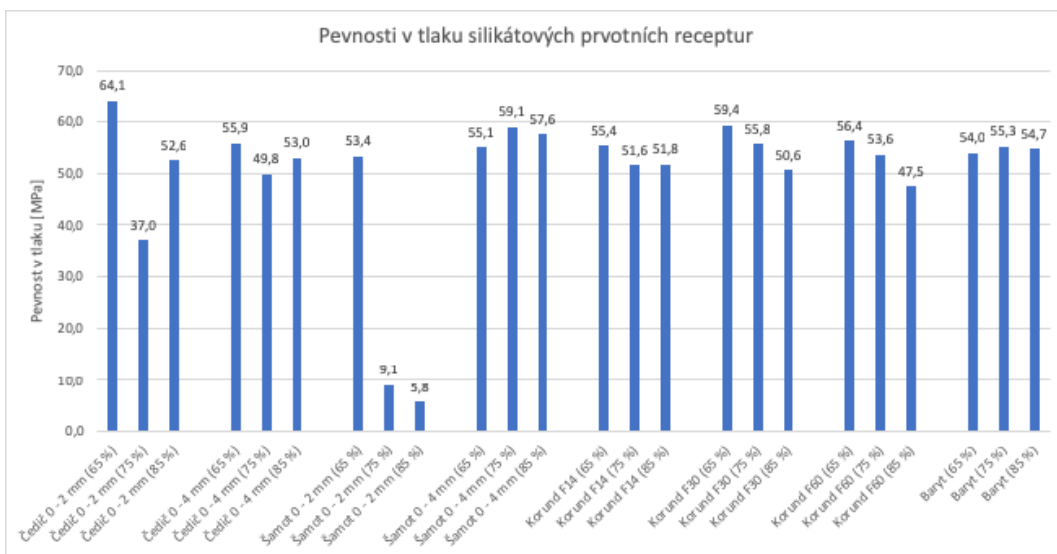
**Tabulka 20:** *Průměrné hodnoty objemových hmotností a pevností silikátových těles prvotních receptur*

| Zkušební těleso |                       | Ø OH [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| 1               | Čedič 0 - 2 mm (65 %) | 2230                      | 6,3                    | 64,1                   |
| 2               | Čedič 0 - 2 mm (75 %) | 2150                      | 6,8                    | 37,0                   |
| 3               | Čedič 0 - 2 mm (85 %) | 2230                      | 6,6                    | 52,6                   |
| 4               | Čedič 0 - 4 mm (65 %) | 2270                      | 6,3                    | 55,9                   |
| 5               | Čedič 0 - 4 mm (75 %) | 2250                      | 6,9                    | 49,8                   |
| 6               | Čedič 0 - 4 mm (85 %) | 2280                      | 6,0                    | 53,0                   |
| 7               | Šamot 0 - 2 mm (65 %) | 1830                      | 6,8                    | 53,4                   |
| 8               | Šamot 0 - 2 mm (75 %) | 1460                      | 2,2                    | 9,1                    |
| 9               | Šamot 0 - 2 mm (85 %) | 1390                      | 0,7                    | 5,8                    |
| 10              | Šamot 0 - 4 mm (65 %) | 1910                      | 6,4                    | 55,1                   |
| 11              | Šamot 0 - 4 mm (75 %) | 2020                      | 6,1                    | 59,1                   |
| 12              | Šamot 0 - 4 mm (85 %) | 1920                      | 6,6                    | 57,6                   |
| 13              | Korund F14 (65 %)     | 2640                      | 6,2                    | 55,4                   |
| 14              | Korund F14 (75 %)     | 2590                      | 6,2                    | 51,6                   |
| 15              | Korund F14 (85 %)     | 2650                      | 5,8                    | 51,8                   |
| 16              | Korund F30 (65 %)     | 2640                      | 7,2                    | 59,4                   |
| 17              | Korund F30 (75 %)     | 2580                      | 7,1                    | 55,8                   |
| 18              | Korund F30 (85 %)     | 2580                      | 7,1                    | 50,6                   |
| 19              | Korund F60 (65 %)     | 2510                      | 8,2                    | 56,4                   |
| 20              | Korund F60 (75 %)     | 2520                      | 8,4                    | 53,6                   |
| 21              | Korund F60 (85 %)     | 2490                      | 8,2                    | 47,5                   |
| 22              | Baryt (65 %)          | 2660                      | 7,9                    | 54,0                   |
| 23              | Baryt (75 %)          | 2720                      | 7,8                    | 55,3                   |
| 24              | Baryt (85 %)          | 2780                      | 7,2                    | 54,7                   |

Navážka cementu zůstávala vzhledem k plnění neměnná. Měnila se pouze hmotnostní zastoupení plniva dle uvedeného procentuálního množství.



**Obrázek 66:** Graf pevnosti v tahu za ohybu silikátových prvotních receptur



**Obrázek 67:** Graf pevnosti v tlaku silikátových prvotních receptur

Stanovení pevnosti bylo také ověřováno u polymerních prvotních receptur, které podléhaly vyhodnocení pomocí stejných vztahů jako silikátové prvotní receptury. Vzdálenost podpor u stanovení pevnosti v tahu za ohybu byla 80 mm, u pevnosti v tlaku byla plocha destiček 400 mm<sup>2</sup>.

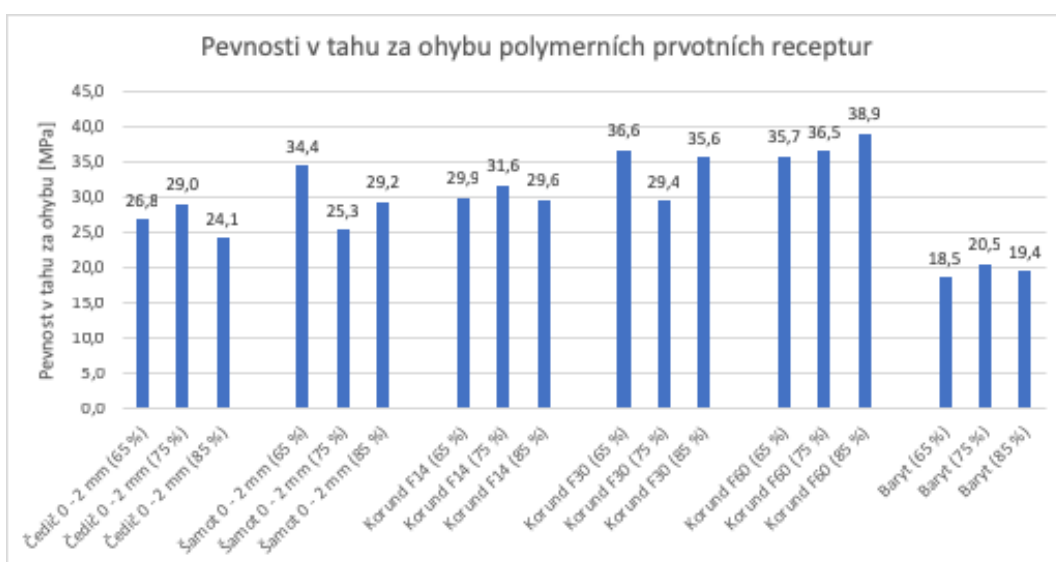
**Tabulka 21:** Průměrné hodnoty objemových hmotností a pevností polymerních těles prvotních receptur

| Zkušební těleso |                       | Ø OH [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø R <sub>f</sub> [MPa] | Ø R <sub>c</sub> [MPa] |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| 1               | Čedič 0 - 2 mm (70 %) | 1940                      | 26,8                   | 62,5                   |
| 2               | Čedič 0 - 2 mm (75 %) | 1840                      | 29,0                   | 69,7                   |
| 3               | Čedič 0 - 2 mm (80 %) | 1900                      | 24,1                   | 64,4                   |
| 4               | Šamot 0 - 2 mm (60 %) | 1690                      | 34,4                   | 72,0                   |
| 5               | Šamot 0 - 2 mm (65 %) | 1660                      | 25,3                   | 50,5                   |
| 6               | Šamot 0 - 2 mm (70 %) | 1710                      | 29,2                   | 70,4                   |
| 7               | Korund F14 (80 %)     | 2230                      | 29,9                   | 51,5                   |
| 8               | Korund F14 (85 %)     | 2280                      | 31,6                   | 52,9                   |
| 9               | Korund F14 (90 %)     | 2260                      | 29,6                   | 50,4                   |
| 10              | Korund F30 (80 %)     | 2200                      | 36,6                   | 61,7                   |
| 11              | Korund F30 (85 %)     | 2230                      | 29,4                   | 43,3                   |
| 12              | Korund F30 (90 %)     | 2190                      | 35,6                   | 57,1                   |
| 13              | Korund F60 (70 %)     | 2060                      | 35,7                   | 62,3                   |
| 14              | Korund F60 (75 %)     | 2130                      | 36,5                   | 45,2                   |
| 15              | Korund F60 (80 %)     | 2240                      | 38,9                   | 54,3                   |
| 16              | Baryt (70 %)          | 1930                      | 18,5                   | 50,6                   |
| 17              | Baryt (75 %)          | 2090                      | 20,5                   | 54,6                   |
| 18              | Baryt (80 %)          | 2140                      | 19,4                   | 54,3                   |

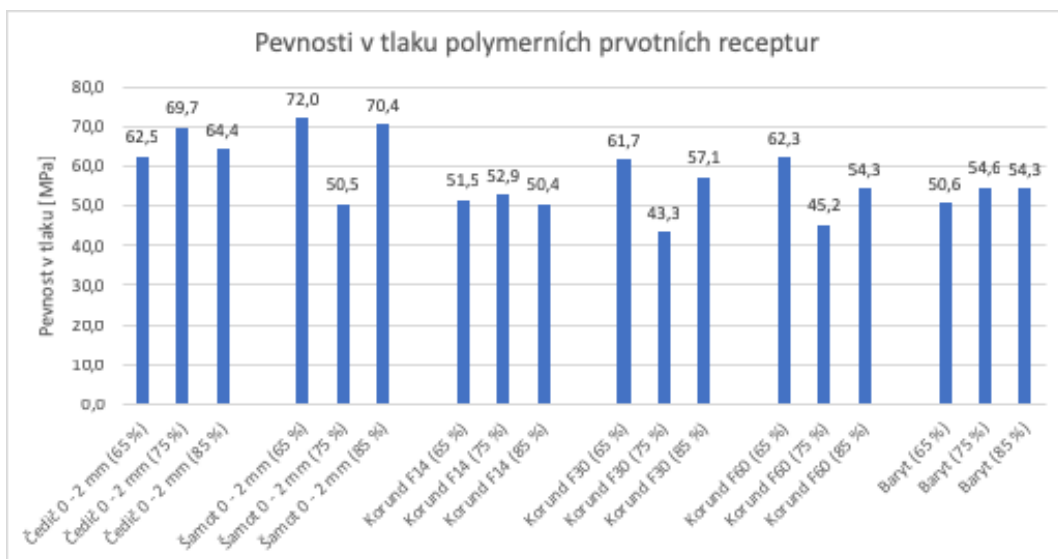
I u polymerní verze vysoce odolného kompozitu se navážka epoxidové pryskyřice neměnila. Měnila se pouze míra plnění, jednotlivé navážky byly odlišné. To mělo vliv na samostatnou konzistenci namíchaného kompozitu.



**Obrázek 68:** Zkušební tělesa polymerních receptur, které byly podrobeny stanovení pevnosti



**Obrázek 69:** Graf pevnosti v tahu za ohybu polymerních prvotních receptur



**Obrázek 70:** Graf pevnosti v tlaku polymerních prvotních receptur

V grafech byly zaznamenány všechny pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Jejich hodnoty byly směrodatné pro optimalizaci, která následovala.

## 9.5 Optimalizace výsledků receptur

Za účelem vytržení prvotních receptur byla provedena optimalizace výsledků, kde byly vybrány nejvhodnější receptury pro finální práci a ověřování.

Tyto receptury byly zvoleny na základě výsledků stanovení pevnosti v tlaku, na vlastnostech materiálů (vlastnosti plniv), na zpracovatelnosti směsi a také na vhodné kompatibilitě pojivové složky spolu s užívaným plnivem.

Byly stanoveny váhy uvažovaných kritérií, které optimalizaci ovlivnily. Optimalizace byla řešena multikritériálním výpočtem.

**Tabulka 22:** Preference jednotlivých kritérií - silikátové receptury

|                           | Rozhodnutí o preferování jednoho kritéria před jinými |                      |                 |                         |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| Kritérium                 | Pevnosti v tlaku                                      | Vlastnosti materiálu | Zpracovatelnost | Kompatibilita materiálu |
| <b>Pevnosti v tlaku</b>   | 1,33                                                  | 1,33                 | 1,00            | 1,00                    |
| <b>Vlastnosti mat.</b>    | 1,00                                                  | 1,00                 | 0,75            | 0,75                    |
| <b>Zpracovatelnost</b>    | 1,00                                                  | 1,00                 | 0,75            | 0,75                    |
| <b>Kompatibilita mat.</b> | 1,33                                                  | 1,33                 | 1,00            | 1,00                    |

Obdobně jako tomu bylo u optimalizace vstupních surovin, tak i zde každá vlastnost má svoji váhu. Na základě kritérií došlo opět k ohodnocení vlastnosti a také k vyčíslení jednotlivých kritérií.

Optimalizace byla zvlášť provedena pro silikátovou variantu vysoce odolného kompozitu a pro polymerní variantu vysoce odolného kompozitu.

Pevnosti v tlaku byly hodnoceny číselnou řadou 1 – 24 (silikátové receptury) a 1 – 18 (polymerní receptury), kde číslo 1 představovalo nejmenší hodnotu a číslo 18/24 největší hodnotu pevnosti v tlaku.

Vlastnosti materiálu byly ohodnoceny od nejlepšího k nejhoršímu na základě předchozího poznání a také na základě chování v kompozitu. To samé platilo i pro zpracovatelnost a kompatibilitu.

Po sobě jdoucí čísla od 1 do 24 byly výše zmíněné receptury, stejně tak tomu bylo i v případě polymerní varianty od 1 do 18. Receptury byly rozděleny pro větší přehlednost optimalizačních tabulek vždy do dvou tabulek: receptury 1 – 12 a receptury 13 – 24.

Vybrané číslo v tabulce vyjadřovalo při nejvyšší zvolené hodnotě nejlepší vlastnost daného kritéria, naopak nejnižší hodnota znamenala protipól.

**Tabulka 23:** Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur 1 - 12

| Kritérium               | Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur – 1. část |   |   |    |   |    |    |   |   |    |    |    |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|---|---|----|---|----|----|---|---|----|----|----|
|                         | 1                                                         | 2 | 3 | 4  | 5 | 6  | 7  | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| <b>Pevnosti v tlaku</b> | 24                                                        | 3 | 9 | 19 | 5 | 10 | 11 | 2 | 1 | 15 | 22 | 21 |
| <b>Vlastnosti mat.</b>  | 3                                                         | 3 | 3 | 4  | 4 | 4  | 1  | 1 | 1 | 2  | 2  | 2  |
| <b>Zpracovatelnost</b>  | 10                                                        | 5 | 6 | 10 | 8 | 5  | 6  | 3 | 2 | 5  | 6  | 5  |
| <b>Kompat. mat.</b>     | 8                                                         | 6 | 4 | 9  | 4 | 3  | 4  | 2 | 1 | 3  | 4  | 3  |

**Tabulka 24:** Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur 13 - 24

| Kritérium               | Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur – 2. část |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                         | 13                                                        | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| <b>Pevnosti v tlaku</b> | 17                                                        | 7  | 8  | 23 | 18 | 6  | 20 | 12 | 4  | 13 | 16 | 14 |
| <b>Vlastnosti mat.</b>  | 5                                                         | 5  | 5  | 7  | 7  | 7  | 3  | 3  | 3  | 6  | 6  | 6  |
| <b>Zpracovatelnost</b>  | 10                                                        | 7  | 8  | 10 | 6  | 7  | 10 | 7  | 7  | 10 | 6  | 6  |
| <b>Kompat. mat.</b>     | 9                                                         | 5  | 5  | 7  | 4  | 5  | 8  | 4  | 5  | 10 | 6  | 5  |

Nutným aspektem optimalizace bylo rozhodnutí, zda bylo kritérium nízké nebo vysoké. Následoval výpočet, který prokázal nejvhodnější silikátové receptury. K rozdělení na 2 části bylo přistoupeno i u výsledného vyčíslení silikátových receptur.

**Tabulka 25:** Výsledné hodnoty preference jednotlivých silikátových receptur 1 - 12 [%]

| Kritérium               | Výsledek vyčíslení silikátových receptur – 1. část [%] |           |             |             |             |             |             |             |          |           |             |             |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|-----------|-------------|-------------|
|                         | 1                                                      | 2         | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9        | 10        | 11          | 12          |
| <b>Pevnosti v tlaku</b> | 23,4                                                   | 2,0       | 7,8         | 18,5        | 3,9         | 8,8         | 9,8         | 1,0         | 0,0      | 14,6      | 21,4        | 20,5        |
| <b>Vlastnosti mat.</b>  | 10,2                                                   | 10,2      | 10,2        | 13,5        | 13,5        | 13,5        | 0,0         | 0,0         | 0,0      | 3,6       | 3,6         | 3,6         |
| <b>Zpracovatel.</b>     | 23,4                                                   | 11,8      | 14,2        | 23,4        | 18,8        | 11,8        | 14,2        | 7,0         | 0,0      | 11,8      | 14,2        | 11,8        |
| <b>Kompat. mat.</b>     | 18,7                                                   | 14,0      | 9,3         | 21,1        | 9,3         | 7,0         | 9,3         | 4,6         | 0,0      | 7,0       | 9,3         | 7,0         |
| <b>Suma</b>             | <b>75,7</b>                                            | <b>38</b> | <b>41,5</b> | <b>76,5</b> | <b>45,5</b> | <b>41,1</b> | <b>33,3</b> | <b>12,6</b> | <b>0</b> | <b>37</b> | <b>48,5</b> | <b>42,9</b> |

**Tabulka 26:** Výsledné hodnoty preference jednotlivých silikátových receptur 13 – 24 [%]

|                  | Výsledek vyčíslení silikátových receptur – 2. část [%] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kritérium        | 13                                                     | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Pevnosti v tlaku | 16,6                                                   | 5,9  | 6,9  | 22,4 | 17,6 | 4,9  | 19,5 | 10,8 | 2,9  | 11,7 | 15,6 | 12,7 |
| Vlastnosti mat.  | 16,8                                                   | 16,8 | 16,8 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 6,9  | 6,9  | 6,9  | 20,1 | 20,1 | 20,1 |
| Zpracovatel.     | 23,4                                                   | 16,5 | 18,8 | 23,4 | 14,2 | 16,5 | 23,4 | 16,5 | 16,5 | 23,4 | 14,2 | 14,2 |
| Kompat. mat.     | 21,1                                                   | 11,7 | 11,7 | 16,4 | 9,3  | 11,7 | 18,7 | 9,3  | 11,7 | 23,4 | 14,0 | 11,7 |
| Suma             | 77,9                                                   | 50,9 | 54,2 | 85,6 | 64,5 | 56,5 | 68,5 | 43,5 | 38   | 78,6 | 63,9 | 58,7 |

Na základě procentuálních preferencí bylo vybráno 6 receptur, které měly nejvyšší procentuální hodnotu a byly dále testovány. Nejvhodnější receptury, které vzešly z optimalizace, byly číslo: 1, 3, 13, 16, 19 a 22. Tyto receptury jsou uvedeny v tabulce č. 20.

Stejně vyčíslení platilo také pro polymerní receptury, které bylo provedeno stejnou formou určení těchto čísel. Optimalizační tabulky byly i v tomto případě rozděleny do dvou částí pro větší přehlednost optimalizace.

Obdobně jako u silikátových variant vyjadřovalo vybrané číslo v tabulce při nejvyšší zvolené hodnotě nejlepší vlastnost daného kritéria, naopak nejnižší hodnota znamenala protipól.

**Tabulka 27:** Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur 1 – 9

|                  | Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur – 1. část |    |    |    |   |    |   |    |   |
|------------------|----------------------------------------------------------|----|----|----|---|----|---|----|---|
| Kritérium        | 1                                                        | 2  | 3  | 4  | 5 | 6  | 7 | 8  | 9 |
| Pevnosti v tlaku | 14                                                       | 16 | 15 | 18 | 5 | 17 | 7 | 8  | 4 |
| Vlastnosti mat.  | 6                                                        | 6  | 6  | 5  | 5 | 5  | 4 | 4  | 4 |
| Zpracovatelnost  | 7                                                        | 10 | 5  | 10 | 5 | 4  | 6 | 10 | 7 |
| Kompatibilita    | 3                                                        | 9  | 5  | 8  | 7 | 5  | 6 | 8  | 7 |

**Tabulka 28:** Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur 10 – 18

|                  | Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur – 2. část |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------|----------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Kritérium        | 10                                                       | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Pevnosti v tlaku | 12                                                       | 2  | 11 | 13 | 3  | 9  | 6  | 10 | 9  |
| Vlastnosti mat.  | 3                                                        | 3  | 3  | 4  | 4  | 4  | 2  | 2  | 2  |
| Zpracovatelnost  | 10                                                       | 7  | 4  | 10 | 6  | 5  | 5  | 10 | 4  |
| Kompatibilita    | 9                                                        | 7  | 5  | 8  | 6  | 4  | 5  | 10 | 5  |

Po vyčíslení daných kritérií následovalo vymezení maxima a minima. Závěr optimalizace byl proveden opětovným multikriteriálním výpočtem.

**Tabulka 29:** Výsledné hodnoty preference jednotlivých polymerních receptur 1 – 9 [%]

|                  | Výsledek vyčíslení polymerních receptur – 1. část [%] |             |             |             |             |             |             |             |           |
|------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Kritérium        | 1                                                     | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9         |
| Pevnosti v tlaku | 18,2                                                  | 20,8        | 19,5        | 23,4        | 6,5         | 22,1        | 9,1         | 10,4        | 5,2       |
| Vlastnosti mat.  | 23,4                                                  | 23,4        | 23,4        | 18,7        | 18,7        | 18,7        | 14,0        | 14,0        | 14,0      |
| Zpracovatelnost  | 16,4                                                  | 23,4        | 11,7        | 23,4        | 11,7        | 9,3         | 14,0        | 23,4        | 16,4      |
| Kompatibilita    | 7,0                                                   | 21,1        | 11,7        | 18,7        | 16,4        | 11,7        | 14,0        | 18,7        | 16,4      |
| Suma             | <b>65</b>                                             | <b>88,7</b> | <b>66,3</b> | <b>84,2</b> | <b>53,3</b> | <b>61,8</b> | <b>51,1</b> | <b>66,5</b> | <b>52</b> |

**Tabulka 30:** Výsledné hodnoty preference jednotlivých polymerních receptur 10 – 18 [%]

|                  | Výsledek vyčíslení polymerních receptur – 2. část [%] |             |             |           |             |             |             |             |             |
|------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Kritérium        | 10                                                    | 11          | 12          | 13        | 14          | 15          | 16          | 17          | 18          |
| Pevnosti v tlaku | 15,6                                                  | 0,0         | 14,3        | 16,9      | 3,9         | 11,7        | 7,8         | 16,9        | 11,7        |
| Vlastnosti mat.  | 9,3                                                   | 9,3         | 9,3         | 14,0      | 14,0        | 14,0        | 4,6         | 4,6         | 4,6         |
| Zpracovatelnost  | 23,4                                                  | 16,4        | 9,3         | 23,4      | 14,0        | 11,7        | 11,7        | 23,4        | 9,3         |
| Kompatibilita    | 21,1                                                  | 16,4        | 11,7        | 18,7      | 14,0        | 9,3         | 11,7        | 23,4        | 11,7        |
| Suma             | <b>69,4</b>                                           | <b>42,1</b> | <b>44,6</b> | <b>73</b> | <b>45,9</b> | <b>46,7</b> | <b>35,8</b> | <b>68,3</b> | <b>37,3</b> |

Z optimalizace prvotních receptur na polymerní bázi vyšlo taktéž 6 receptur, které byly uvažovány pro vysoce odolný kompozit jako nejvhodnější. Byly to receptury číslo: 2, 4, 8, 10, 13, 17. O jaké receptury se jedná, je uvedeno v tabulce č. 21.

Všechny silikátové a polymerní receptury byly v rámci diplomové práce dále opět optimalizovány za účelem získání finálních receptur.

## **9.6 Stanovení optimální křivky zrnitosti plniv**

Vhodná křivka pro nově vyvíjený kompozit byla rozdělena zvlášť pro silikátový kompozit a také zvlášť pro polymerní kompozit. Vzhledem k využití v praxi lze navrhnout určité maximální zrno jednotlivých těles, které by mohlo vyhovovat ve všech případech.

### **9.6.1 Vhodná křivka zrnitosti plniv pro silikátový kompozit**

Pro silikátová pojiva jsou dány formy o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm a byly namíchány receptury s uvažovanými plnivy. Na zkušebních tělesech byly provedeny pevnostní zkoušky, které byly primárně nastavené jako důležité hledisko.

Porovnáním výsledků bylo zjištěno, že v rámci čedičových odkapů je dosaženo lepších výsledků použitím jemnější frakce, tedy rozmezí 0 – 2 mm. U šamotové drti nelze brát vliv křivky zrnitosti v potaz z důvodu použití nevhodného vodního součinitele, který ovlivnil výsledky. U použití korundového plniva byly převážně lepší výsledky u jemnějších zrn plniva.

### **9.6.2 Vhodná křivka zrnitosti plniv pro polymerní kompozit**

Pro polymerní pojiva jsou dány formy o rozměrech  $20 \times 20 \times 100$  mm, i u této formy pojiva byly namíchány receptury s uvažovanými plnivy. I u polymerních těles se volba křivky zrnitosti také ubírala směrem pevnostních zkoušek.

Při porovnání výsledků byla uvažována frakce 0 – 2 mm vzhledem k rozměrům těles a je obecně známo, že menší frakce jsou výsledkově lepší než při použití větších frakcí. U plnění korundovým plnivem bylo prokázáno nejvhodnější plnění frakcí F60, tedy opět plnivo nejmenší frakce.

## 9.7 Shrnutí etapy 2

Jedním z cílů této etapy bylo stanovení optimální křivky zrnitosti použitých plniv pro vyvíjený kompozit. U každého plniva to bylo bráno jinak, protože každé plnivo jinak reagovalo s daným pojivem.

U silikátového plniva lépe vyhovovalo plnivo menších (jemnějších) frakcí, protože lépe vyplnilo mezery a mikropóry. Čedičovým odkapům nejlépe vyhovovala tedy frakce 0 – 2 mm. Pro velikost zrn korundu byla opět výhodná křivka zrnitosti z jemnějších frakcí. U polymerního kompozitu byla použita v rámci čedičových odkapů pouze nižší frakce (0 – 2 mm). Totéž platilo i u plnění korundem, menší frakce při použití polymerního pojiva vykazuje lepší hodnoty výsledků.

Závěrem lze soudit, že jemnější frakce u obou typů kompozitu měly lepší vliv na základní výsledky, které se nejvíce blížily požadavkům.

V této etapě byla také provedena optimalizace prvotních receptur, ze kterých bylo pro další testování vybráno šest silikátových receptur a šest polymerních receptur. Nejlepších výsledků u silikátových variant bylo dosaženo s plněním 65 %, u polymerních variant bylo nejvyšších hodnot pevností dosaženo s různým plněním.

## **10 ETAPA 3 – Vývoj nového vysoce odolného kompozitu**

V této fázi diplomové práce byla popsána samotná příprava nově vyvíjeného kompozitu. Nejprve byly naváženy pojivové a plnivové složky. V případě nutnosti byla plniva zdrobněna pomocí drtiče na menší frakce. Následně byl proveden síťový rozbor, který jednotlivé frakce rozdělil, a na základě výpočtu dle Fullera byly stanoveny jejich navážky. Tyto navážky se společně smísily a vznikla tak jednotná plnivová složka. Příprava obou variant byla velmi obdobná, konkrétněji je uvedena níže.

### **10.1.1 Výroba nového kompozitu na silikátové bázi**

U silikátových receptur byly suché složky (cement + plnivo) dávkovány do automatické míchačky a nejprve smíseny společně. Po jejich smísení v míchačce byla k suché směsi přidána voda dle daného vodního součinitele.

Takto rozmíchaná směs byla míchána po určitou dobu v automatické míchačce danými cykly. Během těchto cyklů byl přístroj zastaven, aby mohlo dojít k ručnímu promíchání na dně nádoby.

Po ukončení míchacího procesu byla silikátová směs dávkována do olejem vymazané trojformy o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm. Následně došlo k hutnění pomocí vibračního stolku tak, aby zkušební tělesa byla dostatečně zhutněna. Takto zhutněná trojforma byla přikryta plastovou fólií a ponechána v laboratorních podmínkách.

Po zatvrdnutí zkušebních těles došlo k jejich odformování a k následnému uložení do vodního prostředí. Ve vodním prostředí zkušební tělesa zrála po dobu 28 dnů. Po této době byly podrobeny experimentálnímu ověření vlastností.

### **10.1.2 Výroba nového kompozitu na polymerní bázi**

U polymerních receptur byla metodika výroby na obdobné bázi. V případě šamotové drti a čedičových odkapů došlo k výpočtu zastoupení jednotlivých frakcí dle Fullera a po síťovém rozboru k ucelení plnivové složky. Pojivová složka zastoupená epoxidovou pryskyřicí byla složena ze složky A a ze složky B. Tyto dvě složky byly dány v poměru, který byl uveden výrobcem.

Nejprve bylo provedeno navážení složky A, do které byla nasypána plnivová složka a poté došlo k promíchání těchto dvou komponentů. Jakmile byla složka A promíchána vhodně s plnivovou složkou, došlo k přidání složky B (tvrdidlo). Takto kompletní směs byla velmi dobře rozmíchána a následně dávkována do sprejem vystříkané silikonové formy.

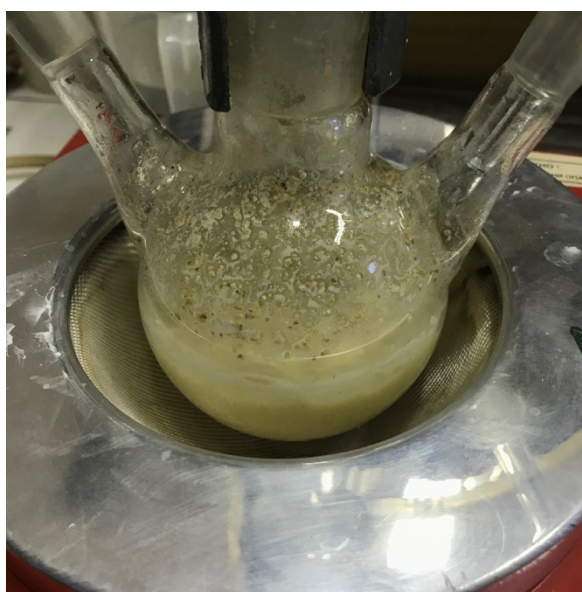
Následující den byly epoxidové zkušební tělesa odformována a dále polymerizovaly po dobu 7 dnů. Následně bylo provedeno experimentální ověření materiálových vlastností zkušebních těles.

## **10.2 Chemická odolnost nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu na silikátové bázi**

Chemická odolnost silikátového vysoce odolného kompozitu podléhala postupu z normy ČSN EN 993-16. Roztokem, kterým bylo zkušební těleso testováno, byla kyselina sírová ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Po dobu 6 hodin byl rozdrcený práškový vzorek vařen v 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Byl zjišťován hmotnostní úbytek, který byl vyjádřen v procentech. [49]



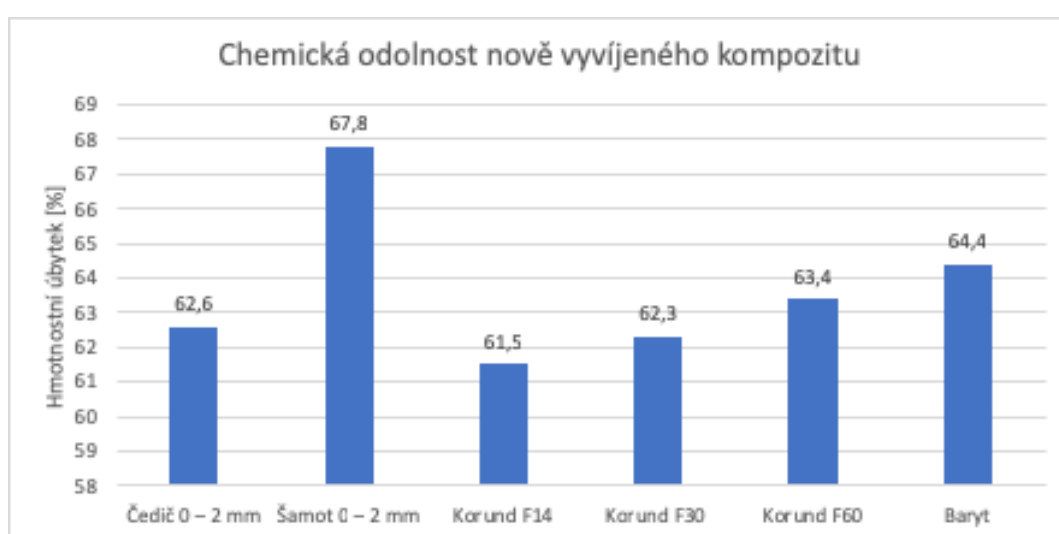
**Obrázek 71:** *Zařízení na stanovení chemické odolnosti*



**Obrázek 72:** *Vzorek při varu u stanovení chemické odolnosti*

**Tabulka 31:** Vyhodnocení chemické odolnosti zkušebních těles z jednotlivých plniv

| Zkušební těleso | m <sub>1</sub> [g] | m <sub>pap</sub> [g] | m <sub>2 + pap</sub> [g] | m <sub>2</sub> [g] | L [%] |
|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|-------|
| čedič 0 – 2 mm  | 20,0002            | 1,4225               | 8,8966                   | 7,4741             | 62,6  |
| šamot 0 – 2 mm  | 20,0021            | 1,4665               | 7,8980                   | 6,4315             | 67,8  |
| korund F14      | 20,0350            | 1,2780               | 8,9993                   | 7,7213             | 61,5  |
| korund F30      | 19,9967            | 1,4625               | 9,0079                   | 7,5454             | 62,3  |
| korund F60      | 19,9992            | 1,3597               | 8,6789                   | 7,3192             | 63,4  |
| baryt           | 19,9996            | 1,3798               | 8,5092                   | 7,1294             | 64,4  |



**Obrázek 73:** Graf vyjadřující chemickou odolnost zkušebních těles

Na zkušebních tělesech polymerních receptur nebyla chemická odolnost provedena z důvodu toho, že samotná epoxidová pryskyřice je odolná vůči chemikáliím, do kterých jsou zahrnuty i kyseliny.

### 10.3 Stanovení vlivu propařování na nově vyvíjený vysoce odolný kompozit

Jednou z možných variant pro zajištění vyšších pevností a urychlení tvrdnutí kompozitu bylo navrženo propařování. Vyvíjený kompozit ze silikátového pojiva byl vyrobený pomocí propaření na zhotovených zkušebních tělesech. Silikátová směs byla po namíchání ve formě vložena do propařovací komory.

Propařování bylo stanoveno dle obvyklého cyklu na 24 hodin při teplotě 60 °C. Tato časová a teplotní volba byla preferována na základě dřívějšího testování při propařování betonových prvků.

Na propařovací cyklus byly použity silikátové receptury optimalizované z předchozí etapy s plněním 65 %. Navíc byla do receptur přidána mikrosilika (10 % z množství cementu), u které byl předpoklad mírného navýšení výsledných pevností. Mikrosilika má totiž vliv na pevnosti u HPC, mohla by tedy být dobrou příměsí do vyvíjeného kompozitu. Na těchto vzorcích byly experimentálně ověřeny pevnostní vlastnosti po vytvrzování párou, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulkách.



**Obrázek 74:** Neodformované zkušební tělesa v propařovací komoře

**Tabulka 32:** Korund F14 propařený, plnění 65 %

| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | F <sub>t</sub><br>[kN] | F <sub>c</sub><br>[kN] | OH<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Ø OH<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | R <sub>f</sub><br>[MPa] | Ø R <sub>f</sub><br>[MPa] | R <sub>c</sub><br>[MPa] | Ø R <sub>c</sub><br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1  | 41,75     | 41,60     | 157,71    | 684,52   | 2,35                   | 53,0<br>55,5           | 2500                       |                              | 4,8                     |                           | 33,1<br>34,7            |                           |
| 2  | 41,59     | 41,94     | 157,40    | 696,24   | 2,20                   | 54,0<br>46,0           | 2540                       | 2520                         | 4,6                     | 4,7                       | 33,8<br>28,8            | 32,5                      |
| 3  | 41,60     | 41,62     | 157,56    | 690,45   | 2,30                   | 52,0<br>51,5           | 2530                       |                              | 4,8                     |                           | 32,5<br>32,2            |                           |

**Tabulka 33: Korund F30 propařený, plnění 65 %**

| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | OH<br>[kg/m³] | Ø OH<br>[kg/m³] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa] | Ø Rc<br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 40,38     | 41,83     | 158,82    | 647,89   | 2,35       | 59,5       | 2420          | 2420            | 5,4         | 5,0           | 37,2        | 36,0          |
|    |           |           |           |          |            | 52,0       |               |                 |             |               | 32,5        |               |
| 2  | 39,95     | 41,93     | 158,98    | 643,98   | 1,95       | 60,0       | 2420          |                 | 4,6         |               | 37,5        |               |
|    |           |           |           |          |            | 59,5       |               |                 |             |               | 37,2        |               |
| 3  | 40,02     | 41,75     | 158,85    | 645,61   | 2,20       | 58,0       | 2430          |                 | 5,1         |               | 36,3        |               |
|    |           |           |           |          |            | 57,0       |               |                 |             |               | 35,6        |               |

**Tabulka 34: Korund F60 propařený, plnění 65 %**

| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | OH<br>[kg/m³] | Ø OH<br>[kg/m³] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa] | Ø Rc<br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 40,37     | 41,75     | 159,18    | 628,92   | 2,35       | 45,0       | 2340          | 2350            | 5,4         | 5,3           | 28,1        | 33,4          |
|    |           |           |           |          |            | 55,0       |               |                 |             |               | 34,4        |               |
| 2  | 40,35     | 41,77     | 159,08    | 633,11   | 2,35       | 56,0       | 2360          |                 | 5,4         |               | 35,0        |               |
|    |           |           |           |          |            | 58,0       |               |                 |             |               | 36,3        |               |
| 3  | 40,27     | 41,69     | 159,21    | 630,33   | 2,30       | 52,5       | 2360          |                 | 5,3         |               | 32,8        |               |
|    |           |           |           |          |            | 54,0       |               |                 |             |               | 33,8        |               |

**Tabulka 35: Čedič 0-2 mm propařený, plnění 65 %**

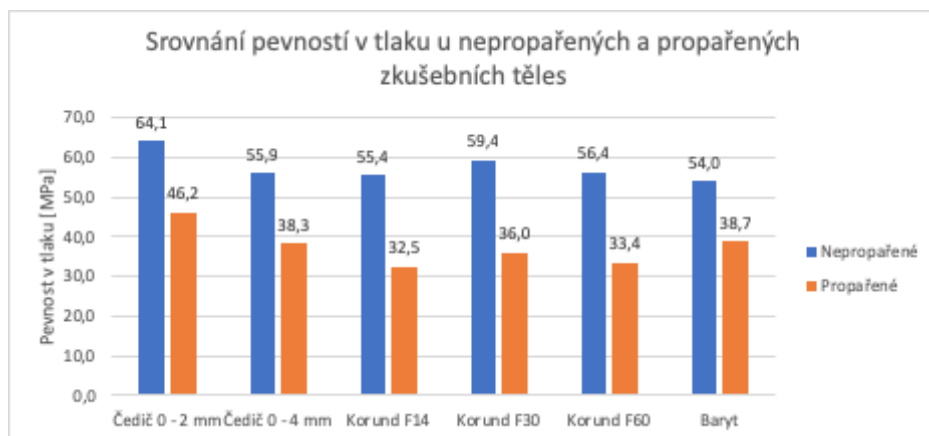
| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | OH<br>[kg/m³] | Ø OH<br>[kg/m³] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa] | Ø Rc<br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 40,20     | 42,67     | 163,32    | 609,70   | 2,65       | 68,5       | 2180          | 2180            | 6,1         | 5,9           | 42,8        | 46,2          |
|    |           |           |           |          |            | 78,0       |               |                 |             |               | 48,8        |               |
| 2  | 40,33     | 42,01     | 162,98    | 601,25   | 2,5        | 74,5       | 2180          |                 | 5,7         |               | 46,6        |               |
|    |           |           |           |          |            | 73,5       |               |                 |             |               | 45,9        |               |
| 3  | 40,49     | 41,61     | 162,40    | 595,59   | 2,55       | 77,5       | 2180          |                 | 5,8         |               | 48,4        |               |
|    |           |           |           |          |            | 71,5       |               |                 |             |               | 44,7        |               |

**Tabulka 36: Čedič 0-4 mm propařený, plnění 65 %**

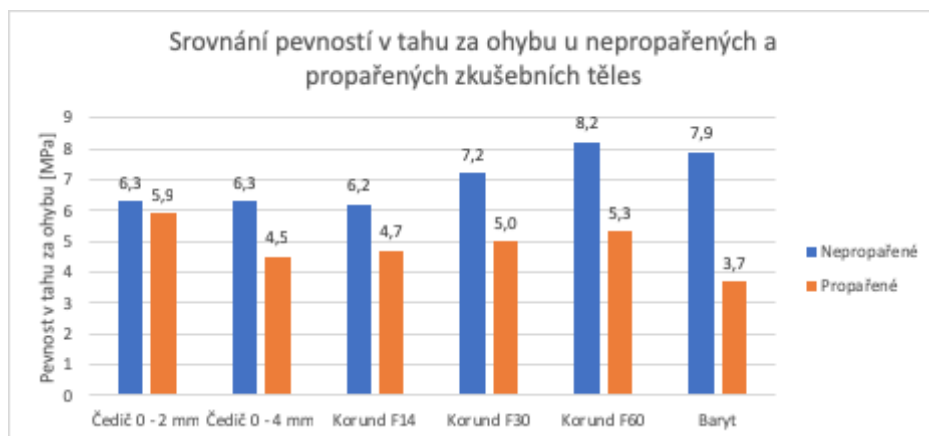
| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | OH<br>[kg/m³] | Ø OH<br>[kg/m³] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa] | Ø Rc<br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 40,22     | 42,06     | 160,50    | 586,22   | 2,00       | 62,5       | 2160          | 2160            | 4,6         | 4,5           | 39,1        | 38,3          |
|    |           |           |           |          |            | 62,5       |               |                 |             |               | 39,1        |               |
| 2  | 40,17     | 41,60     | 159,92    | 575,10   | 1,90       | 61,0       | 2150          |                 | 4,4         |               | 38,1        |               |
|    |           |           |           |          |            | 60,0       |               |                 |             |               | 37,5        |               |
| 3  | 40,15     | 41,78     | 159,99    | 578,36   | 1,95       | 61,0       | 2160          |                 | 4,5         |               | 38,1        |               |
|    |           |           |           |          |            | 60,5       |               |                 |             |               | 37,8        |               |

**Tabulka 37: Baryt propařený, plnění 65 %**

| č. | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | OH<br>[kg/m³] | Ø OH<br>[kg/m³] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa] | Ø Rc<br>[MPa] |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 1  | 41,07     | 41,13     | 161,20    | 690,94   | 1,85       | 65,0       | 2540          | 2530            | 4,0         | 3,7           | 40,6        | 38,7          |
|    |           |           |           |          |            | 55,0       |               |                 |             |               | 34,4        |               |
| 2  | 40,91     | 40,87     | 161,18    | 682,54   | 1,50       | 62,5       | 2530          |                 | 3,3         |               | 39,1        |               |
|    |           |           |           |          |            | 67,5       |               |                 |             |               | 42,2        |               |
| 3  | 40,95     | 40,98     | 161,26    | 685,11   | 1,7        | 60,5       | 2530          |                 | 3,7         |               | 37,8        |               |
|    |           |           |           |          |            | 61,0       |               |                 |             |               | 38,1        |               |



**Obrázek 75:** Grafické srovnání pevností v tlaku po 28 dnech na nepropářovaných a propářovaných zkušebních tělesech



**Obrázek 76:** Grafické srovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech na nepropářovaných a propářovaných zkušebních tělesech

Grafické vyhodnocení pevností u propářených zkušebních těles ve srovnání s nepropářenými zkušebními tělesy vykazovalo nižší hodnoty pevností. Nejvyšší hodnoty propářených zkušebních těles byly dosaženy u silikátového kompozitu s plnivem z čedičových odkapů. **Na dlouhodobé pevnosti nemělo tedy propářování žádný vliv.** Vyšší hodnoty pevností byly dosaženy u běžně vyráběných zkušebních těles.

## **10.4 Shrnutí etapy 3 - formulace optimální přípravy nově vyvinutého kompozitu**

Závěr třetí etapy ukázal některé z vlastností vyvíjených materiálů, na jejichž základě byla umožněna formulace optimální přípravy pro nově vyvíjený kompozit. Primárním hlediskem pro další vývoj bylo stanovení pevnosti, které bylo provedeno na zkušebních tělesech silikátových receptur, které byly charakteristické plněním 65 %, 75 % a 85 %.

Tyto receptury prošly v předchozí etapě optimalizací, kde byly zúženy na receptury s plněním 65 %, jelikož dosahovaly nejvyšších pevností. Polymerní forma receptur byla taktéž optimalizována s ohledem na stanovení pevnosti.

Na základě pevnostních zkoušek silikátových nepropařovaných a propařovaných zkušebních těles bylo možné porovnat účinek propařování vzhledem k jejich pevnostem. Z grafického vyhodnocení vyplynulo, že bylo dosaženo nejvyšších hodnot stanovení pevnosti u vyrobených zkušebních těles bez propařovacího cyklu. Proto byla jako ideální volba uvažována nepropařená verze postupu výroby kompozitu.

Obecně lze tedy pro výrobu silikátového kompozitu byl zvolen tento následující postup. Nejprve byly smíseny suché složky v případě silikátového kompozitu, následně došlo k smísení s vodou, dávkování do trojforem, hutnění, tvrdnutí a poté došlo k experimentálnímu ověření vlastností nově vyvinutého kompozitu. Hutnění bylo realizováno pomocí vibračního stolku.

Optimální způsob přípravy polymerního kompozitu odpovídal postupu přípravy prvotních zkušebních těles. Do složky A bylo přidáno plnivo a po následném míchání bylo přidáno tvrdidlo – složka B. Obdobně jako u silikátového kompozitu došlo ke tvrdnutí a k experimentálnímu ověření vlastností nově vyvinutého kompozitu, který byl na bázi epoxidové pryskyřice.

Všechny postupy přípravy probíhaly dle normových postupů, za normálních laboratorních podmínek. Pro silikátový kompozit bylo jako pojivo používán CEM I 52,5 R, pro polymerní kompozit byla používána epoxidová pryskyřice IN-EPOX 2050.

## 11 ETAPA 4 – Vlastnosti a návrh složení finálních receptur pro vyvíjený kompozit

Tato etapa se věnovala recepturám, které vzešly z první optimalizace – prvotní receptury. Byly vypsané doposud optimalizované receptury, které byly charakterizovány a následně z nich vzešly finální receptury. Bylo uvažováno o 2 silikátových a o 2 polymerních recepturách, které by měly mít nejlepší vlastnosti v závěru vývoje nového vysoce odolného kompozitu.

Do finálních receptur silikátové podoby byla přidána také mikrosilika, která jako příměs měla za úkol zvýšit kvalitu nově vyvíjeného kompozitu. Výčet uvažovaných receptur je v následujících tabulkách.

**Tabulka 38:** Souhrn silikátových receptur pro finální optimalizaci

| Typ receptury |              | Pojivová složka                       | Plnivová složka                 | Plnění [%] |
|---------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------|
| 1             | Silikátová 1 | portlandský<br>cement CEM I<br>52,5 R | čedičové odkapy frakce 0 – 2 mm | 65         |
| 2             | Silikátová 2 |                                       | šamotová drť frakce 0 – 2 mm    |            |
| 3             | Silikátová 3 |                                       | korund F14                      |            |
| 4             | Silikátová 4 |                                       | korund F30                      |            |
| 5             | Silikátová 5 |                                       | korund F60                      |            |
| 6             | Silikátová 6 |                                       | barytová drť                    |            |

**Tabulka 39:** Souhrn polymerních receptur pro finální optimalizaci

| Typ receptury |             | Pojivová složka                          | Plnivová složka                 | Plnění [%] |
|---------------|-------------|------------------------------------------|---------------------------------|------------|
| 1             | Polymerní 1 | epoxidová<br>pryskyřice IN-<br>EPOX 2050 | čedičové odkapy frakce 0 – 2 mm | 75         |
| 2             | Polymerní 2 |                                          | šamotová drť frakce 0 – 2 mm    | 60         |
| 3             | Polymerní 3 |                                          | korund F14                      | 85         |
| 4             | Polymerní 4 |                                          | korund F30                      | 80         |
| 5             | Polymerní 5 |                                          | korund F60                      | 70         |
| 6             | Polymerní 6 |                                          | barytová drť                    | 75         |

## **11.1 Vlastnosti navrhovaných receptur**

Vlastnosti navrhovaných receptur vycházely z materiálových charakteristik použitého plnivového materiálu. Každý materiál měl jiné složení a také jinak reagoval s pojivovou složkou a od toho se odvíjela další uvažování o použití těchto plniv.

Šamot ukázal, že je velmi nasákavý a v silikátové receptuře nereagoval dobře při klasickém vodním součiniteli. Naopak v polymerní receptuře prokázal dobré vlastnosti na pevnosti kompozitu.

Ostatní plnivé složky vykazovaly lepší zpracovatelnost směsi, kompatibilita byla na dobré úrovni. Všechny zmíněné vlastnosti byly zohledněny v následné optimalizaci.

Polymerní receptury s epoxidovou pryskyřicí v celém vývoji vysoce odolného kompozitu prokazovaly vysoké pevnosti. Chemická odolnost u využití epoxidové pryskyřice byla deklarována na vysoké úrovni.

## **11.2 Optimalizace finálního složení nejvhodnějších receptur**

Za účelem volby finálních receptur pro laboratorní testování vysoce odolného kompozitu byla provedena závěrečná optimalizace. Z této optimalizace byly vybrány 2 finální receptury na silikátové bázi a také 2 finální receptury na polymerní bázi.

Hlavním hlediskem této optimalizace byla opět zvolena pevnost v tlaku. Dále pak jako uvažovaná sekundární kritéria byla určena tato kritéria: zpracovatelnost směsi, preference DS (druhotné suroviny) a dostupnost plniv.

Prvním krokem výpočtu multikriteriální optimalizace bylo stanovení váhy jednotlivých kritérií. Tento krok je jedním z nejdůležitějších při výpočtu.

**Tabulka 40:** Preference jednotlivých kritérií – finální receptury

|                       | Rozhodnutí o preferování jednoho kritéria před jinými |                  |                       |                 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| Kritérium             | Preference DS                                         | Dostupnost plniv | Zpracovatelnost směsi | Pevnost v tlaku |
| Preference DS         | 1,33                                                  | 1,33             | 1,00                  | 1,00            |
| Dostupnost plniv      | 1,00                                                  | 1,00             | 0,75                  | 0,75            |
| Zpracovatelnost směsi | 1,00                                                  | 1,00             | 0,75                  | 0,75            |
| Pevnost v tlaku       | 1,33                                                  | 1,33             | 1,00                  | 1,00            |

Optimalizace byla provedena zvlášť pro silikátové receptury vysoce odolného kompozitu a zvlášť pro polymerní receptury vysoce odolného kompozitu.

První krok optimalizace bylo vyčíslení daných kritérií finálních silikátových receptur, které jsou uvedeny v tabulce č. 38 a 39.

Vybrané číslo v tabulce vyjadřovalo při nejvyšší zvolené hodnotě nejlepší vlastnost daného kritéria, naopak nejnižší hodnota znamenala protipól.

**Tabulka 41:** Vyčíslení daných kritérií – finální silikátové receptury

|                  | Vyčíslení daných kritérií – finální silikátové receptury |   |   |   |   |   |
|------------------|----------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|
| Kritérium        | 1                                                        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Preference DS    | 1                                                        | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dostupnost plniv | 3                                                        | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Zpracovatelnost  | 5                                                        | 2 | 3 | 5 | 3 | 4 |
| Pevnost          | 6                                                        | 3 | 2 | 5 | 4 | 1 |

Před závěrem optimalizace byla stanovena optimální hodnota, zda byla nízká (minimum) či vysoká (maximum). Byla vypočtena hodnota preference uvedená v procentech, kdy největší hodnota ukázala nejvhodnější recepturu.

**Tabulka 42:** Výsledné hodnoty preference – finální silikátové receptury [%]

|                         | <b>Výsledek – finální silikátové receptury [%]</b> |             |             |             |             |             |
|-------------------------|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Kritérium</b>        | <b>1</b>                                           | <b>2</b>    | <b>3</b>    | <b>4</b>    | <b>5</b>    | <b>6</b>    |
| <b>Preference DS</b>    | 23,4                                               | 23,4        | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| <b>Dostupnost plniv</b> | 23,4                                               | 23,4        | 11,7        | 11,7        | 11,7        | 0,0         |
| <b>Zpracovatelnost</b>  | 23,4                                               | 0,0         | 7,8         | 23,4        | 7,8         | 15,6        |
| <b>Pevnost</b>          | 23,4                                               | 4,7         | 9,4         | 18,7        | 14,0        | 0,0         |
| <b>Suma</b>             | <b>93,6</b>                                        | <b>51,5</b> | <b>28,9</b> | <b>53,8</b> | <b>33,5</b> | <b>15,6</b> |

Z multikriteriální optimalizace silikátových receptur pro výrobu vysoce odolného kompozitu byly vybrány 2 nejvhodnější receptury.

Všechny receptury byly v prvotní optimalizaci vybrány s plněním 65 %, se kterým vstupovaly i do finální optimalizace. Jedna z finálních receptur obsahovala jako plnivo čedičové odkapy a druhá nejvhodnější receptura obsahovala plnivo, které bylo tvořeno korundem o frakci F30.

Vyčíslení daných kritérií bylo provedeno také u finálních polymerních receptur. Stejně jako u silikátových variant vyjadřovalo vybrané číslo v tabulce při nejvyšší zvolené hodnotě nejlepší vlastnost daného kritéria, naopak nejnižší hodnota znamenala protipól.

**Tabulka 43:** Vyčíslení daných kritérií – finální polymerní receptury

|                         | <b>Vyčíslení daných kritérií – finální polymerní receptury</b> |          |          |          |          |          |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Kritérium</b>        | <b>1</b>                                                       | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| <b>Preference DS</b>    | 1                                                              | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| <b>Dostupnost plniv</b> | 3                                                              | 3        | 2        | 2        | 2        | 1        |
| <b>Zpracovatelnost</b>  | 4                                                              | 5        | 3        | 2        | 1        | 2        |
| <b>Pevnost</b>          | 5                                                              | 6        | 1        | 3        | 4        | 2        |

I u polymerních receptur došlo k určení optimální hodnoty, zda byla maximální nebo minimální, na jejichž základě byl proveden výpočet hodnoty preference uvedený v procentech. Výpočtem byly opět stanoveny 2 finální receptury pro vysoce odolný kompozit.

**Tabulka 44:** Výsledné hodnoty preference – finální polymerní receptury [%]

|                  | Výsledek – finální polymerní receptury [%] |             |             |           |             |             |
|------------------|--------------------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| Kritérium        | 1                                          | 2           | 3           | 4         | 5           | 6           |
| Preference DS    | 23,4                                       | 23,4        | 0,0         | 0,0       | 0,0         | 0,0         |
| Dostupnost plniv | 23,4                                       | 23,4        | 11,7        | 11,7      | 11,7        | 0,0         |
| Zpracovatelnost  | 17,6                                       | 23,4        | 11,7        | 5,9       | 0,0         | 5,9         |
| Pevnost          | 18,7                                       | 23,4        | 0,0         | 9,4       | 14,0        | 4,7         |
| Suma             | <b>83,1</b>                                | <b>93,6</b> | <b>23,4</b> | <b>27</b> | <b>25,7</b> | <b>10,6</b> |

Výpočtem procentuálních preferencí byly získány dvě finální receptury. První receptura měla hodnotu preference 83,1 %, byla s pojivovou složkou epoxidové pryskyřice a obsahovala jako plnivo čedičové odkapy a druhá receptura měla hodnotu preference 93,6 %, byla s epoxidovou pryskyřicí a měla plnivovou složku ze šamotové drti.

## 11.3 Shrnutí etapy 4

Podstatou čtvrté etapy bylo navržení složení finálních receptur pro vývoj vysoce odolného kompozitu, u kterých byly shrnuty jejich hlavní vlastnosti. Byla provedena finální optimalizace receptur, ze které byly stanoveny dvě receptury na silikátové bázi a dvě na polymerní bázi.

Všechny optimalizací vybrané receptury jsou znázorněny v následující tabulce a byly použity v další fázi diplomové práce.

**Tabulka 45:** Složení finálních receptur pro nově vyvíjený vysoce odolný kompozit

| Složení finálních receptur pro nově vyvíjený vysoce odolný kompozit |                                 |                 |        |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------|
| Označení receptury                                                  | Pojivová složka                 | Plnivová složka | Plnění |
| Silikátová receptura 1                                              | portlandský cement CEM I 52,5 R | čedičové odkapy | 65 %   |
| Silikátová receptura 2                                              |                                 | korund F30      | 65 %   |
| Polymerní receptura 1                                               | epox. pryskyřice                | čedičové odkapy | 75 %   |
| Polymerní receptura 2                                               | IN-EPOX 2050                    | šamotová drť    | 60 %   |

## **12 ETAPA 5 – Experimentální ověření vlastností vysoce odolného kompozitu**

V dřívější fázi diplomové práce bylo provedeno stanovení pevnosti v tlaku a stanovení pevnosti v tahu za ohybu, které bylo prioritou při následných optimalizacích, na jejichž základě vznikly 4 finální receptury.

Tyto finální receptury měly podobu silikátovou i polymerní a pro každý typ receptury byly zvoleny 2 receptury s odlišným plnivem. Receptury byly vyrobeny ve formě zkušebních těles a následně experimentálně ověřovány jejich vlastnosti, které by se měly blížit co nejvíce vlastnostem taveného čediče.

Pátá etapa se věnovala určení způsobu experimentálního ověření, zhotovení zkušebních těles, provedení experimentálního ověření a zhodnocení výsledků experimentálního ověření nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu.

Mezi hlavní ověřované aspekty patřily:

- pevnost v tlaku,
- pevnost v tahu za ohybu,
- chemická odolnost,
- odolnost proti ohrusu (ohrusnou metodou Böhme),
- objemová hmotnost.

### **12.1 Zhotovení zkušebních těles**

Na základě čtyř vybraných variant receptur (dvě silikátové a dvě polymerní) byla vyrobena zkušební tělesa. U silikátových receptur bylo plnění shodné, činilo 65 %. Plnění u polymerní varianty bylo odlišné. V případě plnění čedičovými odkapy činila hodnota plnění 75 % a při plnění šamotovou drtí byla tato hodnota 60 %.

#### **12.1.1 Silikátové receptury**

Směs silikátové receptury byla sestavena normovým postup - 1 díl cementu, 3 díly kameniva a 0,5 dílu vody. Odlišnost byla pouze v množství plnění vyvíjeného vysoce odolného kompozitu, kdy bylo plnění namísto 75 % tvořeno pouze 65 % kameniva (v našem případě čedičové odkapy a korund frakce F30). Frakce čedičových odkapů byla v rozmezí 0 – 2 mm dle Fullerovy křivky zrnitosti.

Směs obsahovala navážky na dvě trojformy o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Navážka silikátového pojiva (CEM I 52,5 R) činila v obou případech 1000 g, 2600 g kameniva (čedičových odkapů a korundu F30) a 500 ml vody. Vodní součinitel odpovídal normovému  $w = 0,5$ . V první fázi zhotovování zkušebních těles došlo ke smísení suchých složek (pojivo + plnivo). Po rozmísení suchých složek byla dávkována voda. Vymazané trojformy byly naplněny kompozitem, zhutněny a po odformování zrály zkušební tělesa po dobu 28 dnů ve vodním prostředí.

Zastoupení frakcí na základě výpočtu dle Fullerovy křivky zrnitosti:

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,063}{2}} = 17,7 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,125}{2}} = 25,0 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,25}{2}} = 35,4 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,5}{2}} = 50,0 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{1}{2}} = 70,7 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{2}{2}} = 100 \%$$

Zastoupení frakcí vyjádřené v gramech:

Frakce 0 – 0,063 mm:  $\Rightarrow 17,7 \%$   $\Rightarrow 460,2 \text{ g}$

Frakce 0,063 – 0,125 mm:  $\Rightarrow 7,3 \%$   $\Rightarrow 189,8 \text{ g}$

Frakce 0,125 – 0,25 mm:  $\Rightarrow 10,4 \%$   $\Rightarrow 270,4 \text{ g}$

Frakce 0,25 – 0,5 mm:  $\Rightarrow 14,6 \%$   $\Rightarrow 379,6 \text{ g}$

Frakce 0,5 – 1 mm:  $\Rightarrow 20,7 \%$   $\Rightarrow 538,2 \text{ g}$

Frakce 1 – 2 mm:  $\Rightarrow 29,3 \%$   $\Rightarrow 761,8 \text{ g}$



1a

1b

2a

2b

**Obrázek 77:** 1a – Silikátová směs čedičových odkapů v trojformě, 1b - Zkušební tělesa s plnivem čedičových odkapů, 2a - Silikátová směs korundu F30 v trojformě, 2b - Vytvrzené zkušební tělesa s plnivem korundu F30

### 12.1.2 Polymerní receptury

Polymerní receptury byly tvořeny epoxidovou pryskyřicí IN-EPOX 2050 a příslušným plnivem (čedičové odkapy a šamotová drť). Frakce čedičových odkapů a šamotové drti byla 0 – 2 mm.

Vzhledem k předešlému vývoji kompozitu s různým plněním bylo zvoleno jako nejvhodnější množství plnění pro čedičové odkapy 75 %. Pro šamotovou drť bylo množství plnění stanoveno na 60 %.

Navážka na celou jednu silikátovou trojformu o rozměrech 20 mm x 20 mm x 100 mm byla 275 g. Epoxidová pryskyřice byla tvořena složkou A a složkou B. Složku B tvořilo tvrdidlo. Receptura s obsahem šamotové drti (plnění 60 %) obsahovala 165 g této drti. Epoxidová pryskyřice obsahovala 110 g – složka A 70 g a složka B 40 g. V případě plnění čedičovými odkapy (75 %) byl obsah odkapů 206,25 g, navážka epoxidové pryskyřice byla 68,75 g - složka A 43,75 g a složka B 25 g.

Nejprve byla dávkována složka A, do které bylo nasypáno plnivo a poté přidána složka B. Po dostatečném promíchání směsi došlo k naplnění silikonových trojforem, které byly předtím vystříkány separačním přípravkem. Následně zkušební tělesa polymerizovaly, došlo k jejich odformování a experimentálnímu ověření.



**Obrázek 78:** Polymerní směs s plnivem  
čedičových odkapů



**Obrázek 79:** Polymerní směs s plnivem  
šamotové drti

Zastoupení frakcí na základě výpočtu dle Fullerovy křivky zrnitosti:

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,063}{2}} = 17,7 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,125}{2}} = 25,0 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,25}{2}} = 35,4 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{0,5}{2}} = 50,0 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{1}{2}} = 70,7 \%$$

$$y_i = 100 \times \sqrt{\frac{2}{2}} = 100 \%$$

Zastoupení frakcí vyjádřené v gramech:

Frakce 0 – 0,063 mm:      => 17,7 %

Frakce 0,063 – 0,125 mm:      => 7,3 %

Frakce 0,125 – 0,25 mm:      => 10,4 %

Čedičové odkapy

=> 36,5 g

=> 15,1 g

=> 21,5 g

Šamotová drť

=> 29,2 g

=> 12,0 g

=> 17,2 g

|                       |           |           |           |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Frakce 0,25 – 0,5 mm: | => 14,6 % | => 30,1 g | => 24,1 g |
| Frakce 0,5 – 1 mm:    | => 20,7 % | => 42,7 g | => 34,2 g |
| Frakce 1 – 2 mm:      | => 29,3 % | => 60,4 g | => 48,3 g |



1a

1b

2a

2b

**Obrázek 80:** 1a - Polymerní směs šamotové drti v trojformě, 1b - Vytvrzená zkušební tělesa s plnivem šamotové drti, 2a - Polymerní směs čedičových odkapů v trojformě, 2b - Vytvrzené zkušební tělesa s plnivem čedičových odkapů

## 12.2 Experimentální ověření nejdůležitějších parametrů nově vyvíjeného kompozitu na základě požadavků materiálových vlastností

Experimentální ověření materiálových vlastností nově vyvíjeného kompozitu probíhalo formou několika základních stanovení. Byly to stanovení, na které byl kladen hlavní důraz. Mezi tyto stanovení patří:

- stanovení objemové hmotnosti - ČSN EN 12390-7,
- stanovení pevnosti v tlaku – ČSN EN 196-1,
- stanovení pevnosti v tahu za ohybu – ČSN EN 196-1,
- stanovení odolnosti proti obruš (obrusnost metodou Böhme) – ČSN EN 13892-3.

### 12.2.1 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno na všech 3 zkušebních tělesech, kde došlo ke zjištění rozměrových vlastností. Následně bylo těleso zváženo. Ze zjištěných hodnot byla stanovena objemová hmotnost na základě normy ČSN EN 12390-7. [50]

**Tabulka 46:** Objemová hmotnost silikátových zkušebních těles s plněním čedičovými odkapy

| č.                    | a [mm] | b [mm] | c [mm] | m [g]  | OH [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø OH [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|---------------------------|
| CEM čedičové odkapy 1 | 39,69  | 41,03  | 158,60 | 583,76 | 2260                    | 2250                      |
| CEM čedičové odkapy 2 | 39,85  | 41,53  | 158,27 | 588,99 | 2250                    |                           |
| CEM čedičové odkapy 3 | 39,84  | 40,61  | 158,56 | 575,76 | 2240                    |                           |

**Tabulka 47:** Objemová hmotnost silikátových zkušebních těles s plněním korundem frakce F30

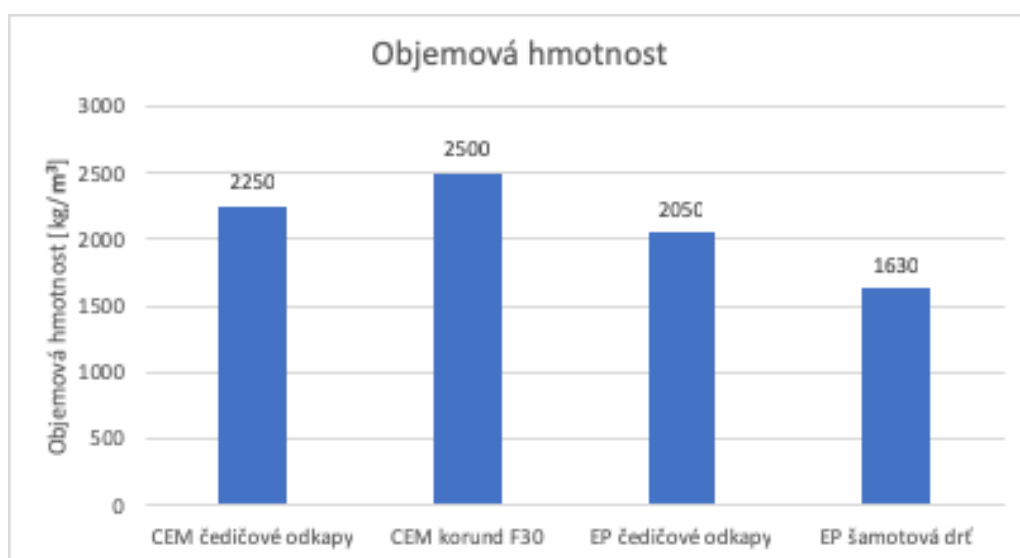
| č.               | a [mm] | b [mm] | c [mm] | m [g]  | OH [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø OH [kg/m <sup>3</sup> ] |
|------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|---------------------------|
| CEM korund F30 1 | 39,86  | 40,53  | 159,33 | 638,75 | 2480                    | 2500                      |
| CEM korund F30 2 | 39,86  | 40,79  | 159,18 | 643,81 | 2490                    |                           |
| CEM korund F30 3 | 39,87  | 40,52  | 159,31 | 648,50 | 2520                    |                           |

**Tabulka 48:** Objemová hmotnost polymerních zkušebních těles s plněním čedičovými odkapy

| č.                   | a [mm] | b [mm] | c [mm] | m [g] | OH [kg/m <sup>3</sup> ] | Ø OH [kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|-------------------------|---------------------------|
| EP čedičové odkapy 1 | 20,02  | 20,95  | 99,30  | 83,26 | 2000                    | 2050                      |
| EP čedičové odkapy 2 | 19,92  | 20,70  | 99,39  | 83,07 | 2030                    |                           |
| EP čedičové odkapy 3 | 20,18  | 20,03  | 99,23  | 84,86 | 2120                    |                           |

**Tabulka 49:** Objemová hmotnost polymerních zkušebních těles s plněním šamotovou drtí

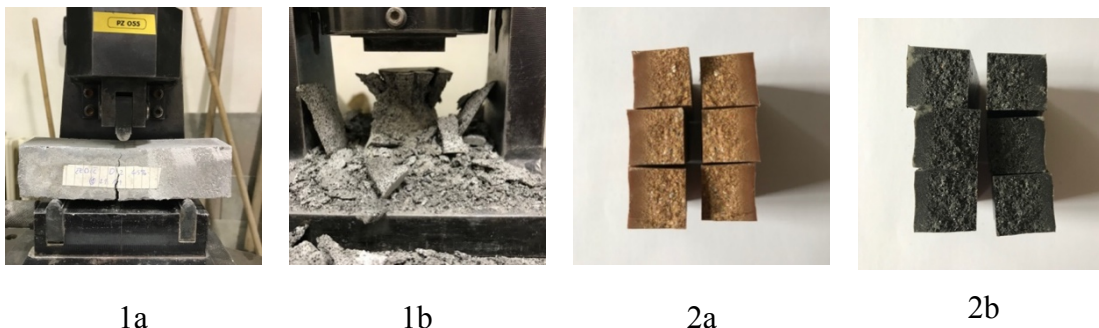
| č.                   | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m<br>[g] | OH<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Ø OH<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------------------|------------------------------|
| EP šamotová<br>drť 1 | 20,34     | 20,37     | 99,69     | 67,53    | 1630                       | 1630                         |
| EP šamotová<br>drť 2 | 19,98     | 20,35     | 99,70     | 66,32    | 1640                       |                              |
| EP šamotová<br>drť 3 | 20,35     | 20,42     | 99,45     | 67,19    | 1630                       |                              |



**Obrázek 81:** Graf vyjadřující objemovou hmotnost finálních receptur

## 12.2.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Postup a vyhodnocení stanovení obou pevností bylo provedeno normovým postupem dle normy ČSN EN 196-1. [48]



**Obrázek 82:** 1a – Porušené silikátové zkušební těleso po stanovení pevnosti v tahu za ohybu, 1b – Porušené silikátové zkušební těleso po stanovení pevnosti v tlaku, 2a – Rozlomená polymerní zkušební tělesa s plněním šamotovou drtí, 2b – Rozlomená polymerní zkušební tělesa s plněním čedičovými odkapy

**Tabulka 50:** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku silikátových zkušebních těles s plněním čedičovými odkapy

| č.                    | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa]  | Ø Rc<br>[MPa] |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|---------------|
| CEM čedičové odkapy 1 | 39,69     | 41,03     | 158,60    | 3,15       | 102<br>109 | 7,6         | 7,4           | 63,8<br>68,1 | 66,3          |
| CEM čedičové odkapy 2 | 39,85     | 41,53     | 158,27    | 2,90       | 98<br>102  | 6,9         |               | 61,3<br>63,8 |               |
| CEM čedičové odkapy 3 | 39,84     | 40,61     | 158,56    | 3,20       | 107<br>118 | 7,6         |               | 66,9<br>73,8 |               |

**Tabulka 51:** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku silikátových zkušebních těles s plněním korundem frakce F30

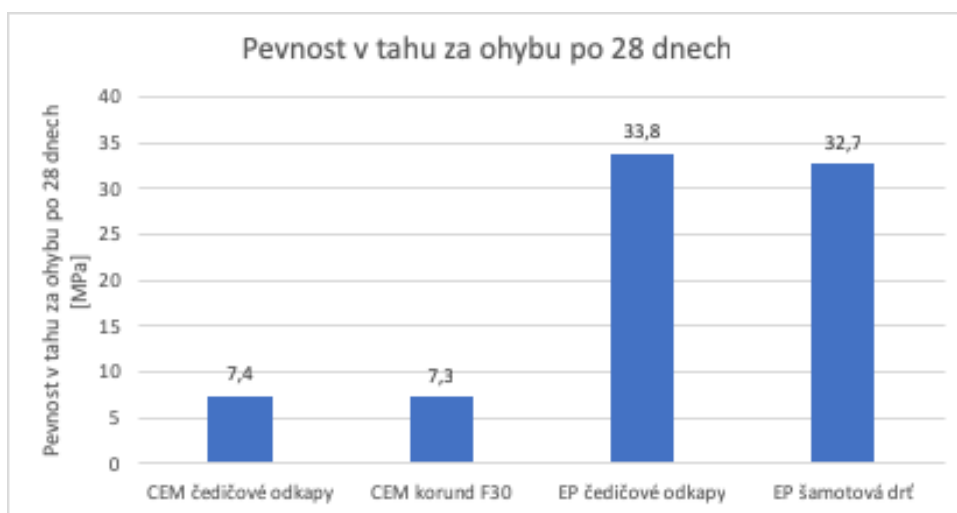
| č.               | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa]  | Ø Rc<br>[MPa] |
|------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|---------------|
| CEM korund F30 1 | 39,86     | 40,53     | 159,33    | 2,95       | 93<br>88   | 7,0         | 7,3           | 58,1<br>55,0 | 57,8          |
| CEM korund F30 2 | 39,86     | 40,79     | 159,18    | 2,90       | 92<br>96   | 6,9         |               | 57,5<br>60,0 |               |
| CEM korund F30 3 | 39,87     | 40,52     | 159,31    | 3,35       | 95<br>91   | 7,9         |               | 59,4<br>56,9 |               |

**Tabulka 52:** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku polymerních zkušebních těles s plněním čedičovými odkapy

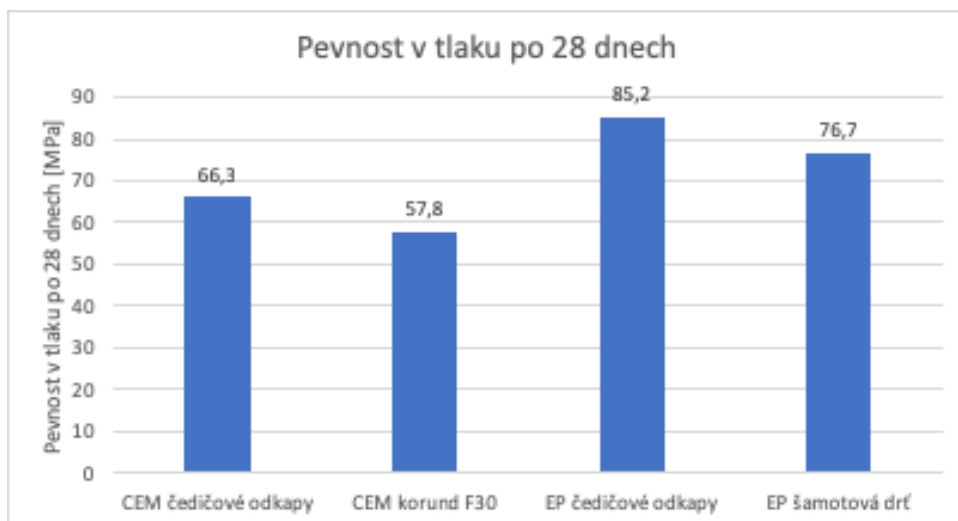
| č.                   | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN]   | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa]  | Ø Rc<br>[MPa] |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|-------------|---------------|--------------|---------------|
| EP čedičové odkapy 1 | 20,02     | 20,95     | 99,3      | 2,2        | 34<br>33,5   | 32,9        | 33,8          | 85,0<br>83,8 | 85,2          |
| EP čedičové odkapy 2 | 19,92     | 20,70     | 99,39     | 2,25       | 33<br>34     | 34,2        |               | 82,5<br>85,0 |               |
| EP čedičové odkapy 3 | 20,18     | 20,03     | 99,23     | 2,35       | 34,5<br>35,5 | 34,3        |               | 86,3<br>88,8 |               |

**Tabulka 53:** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku polymerních zkušebních těles s plněním šamotovou drtí

| č.                | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | Ft<br>[kN] | Fc<br>[kN] | Rf<br>[MPa] | Ø Rf<br>[MPa] | Rc<br>[MPa]  | Ø Rc<br>[MPa] |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|---------------|--------------|---------------|
| EP šamotová drť 1 | 20,34     | 20,37     | 99,69     | 2,3        | 31<br>30   | 32,8        | 32,7          | 77,5<br>75,0 | 76,7          |
| EP šamotová drť 2 | 19,98     | 20,35     | 99,70     | 2,25       | 31,5<br>30 | 33,9        |               | 78,8<br>75,0 |               |
| EP šamotová drť 3 | 20,35     | 20,42     | 99,45     | 2,2        | 31<br>30,5 | 31,3        |               | 77,5<br>76,3 |               |



**Obrázek 83:** Graf vyjadřující pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech u finálních receptur



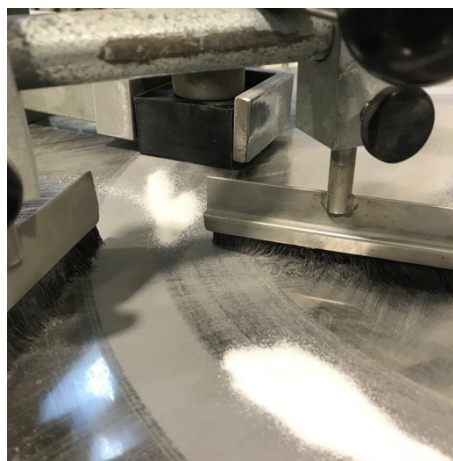
**Obrázek 84:** Graf vyjadřující pevnosti v tlaku po 28 dnech u finálních receptur

### 12.2.3 Stanovení odolnosti proti obrušování (obrusnost metodou Böhme)

Stanovení odolnosti proti obrušování probíhalo na brusném kotouči Böhmeho metodou. Předem vysušená tělesa byla vložena do zařízení a na brusný kotouč byl nasypán umělý korundový písek.

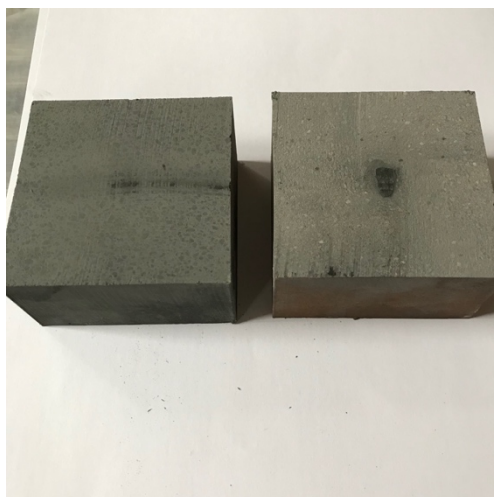


**Obrázek 85:** Silikátové zkušební těleso zatížené při stanovení odolnosti proti obrušování



**Obrázek 86:** Polymerní zkušební těleso zatížené při stanovení odolnosti proti obrušování

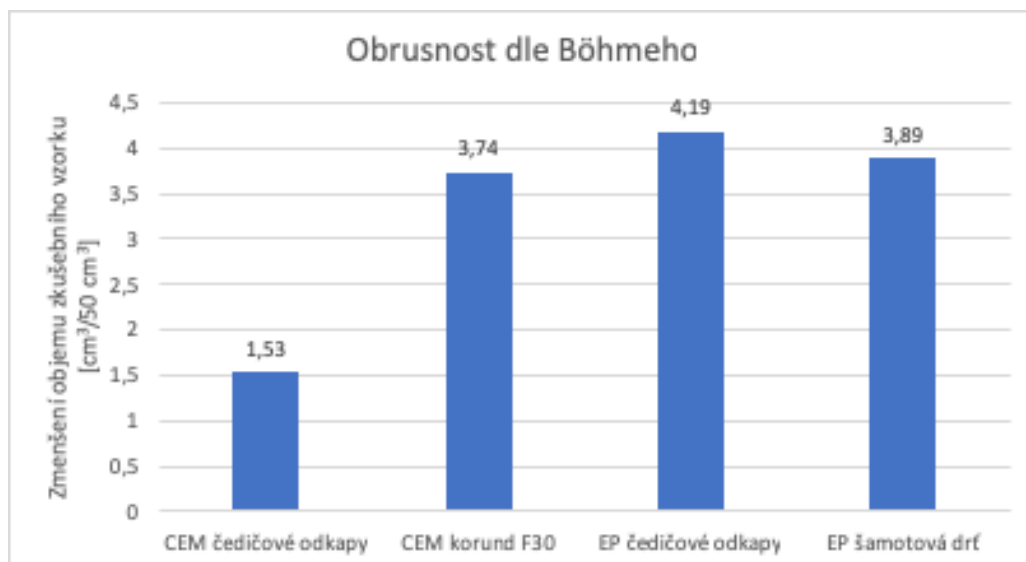
Celkový postup stanovení a vyhodnocení obrusnosti metodou Böhme bylo provedeno normovým postupem dle normy ČSN EN 13892-3. [51]



**Obrázek 87:** Zkušební tělesa po provedení stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme

**Tabulka 54:** Výsledky obrušnosti finálních receptur

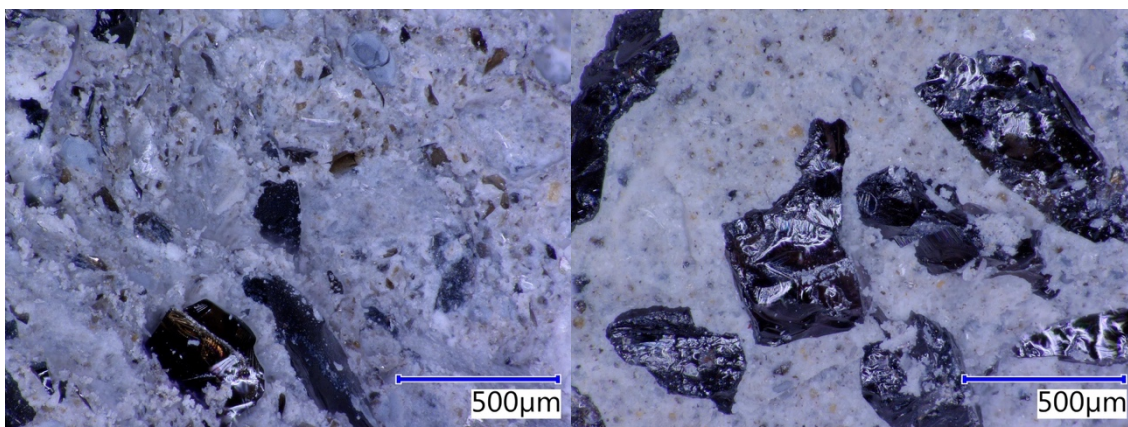
| Zkušební těleso     | a<br>[mm] | b<br>[mm] | c<br>[mm] | m <sub>0</sub><br>[g] | m <sub>16</sub><br>[g] | OH<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Δ m<br>[g] | A<br>[cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>3</sup> ] |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|------------------------|----------------------------|------------|---------------------------------------------|
| CEM čedičové odkapy | 70,8      | 72,8      | 47,3      | 543,9                 | 535,5                  | 2,4657                     | 3,75       | 1,53                                        |
| CEM korund F30      | 70,2      | 71,6      | 39,9      | 494,5                 | 490,8                  | 2,2308                     | 8,35       | 3,74                                        |
| EP čedičové odkapy  | 69,9      | 69,7      | 38,1      | 374,3                 | 365,9                  | 2,0165                     | 8,44       | 4,19                                        |
| EP šamotová drť     | 69,6      | 69,8      | 39,8      | 312,8                 | 306,5                  | 1,6177                     | 6,29       | 3,89                                        |



**Obrázek 88:** Graf vyjadřující hmotnostní úbytek při obrusnosti finálních zkušebních receptur

## 12.2.4 Sledování mikrostruktury pomocí optického mikroskopu

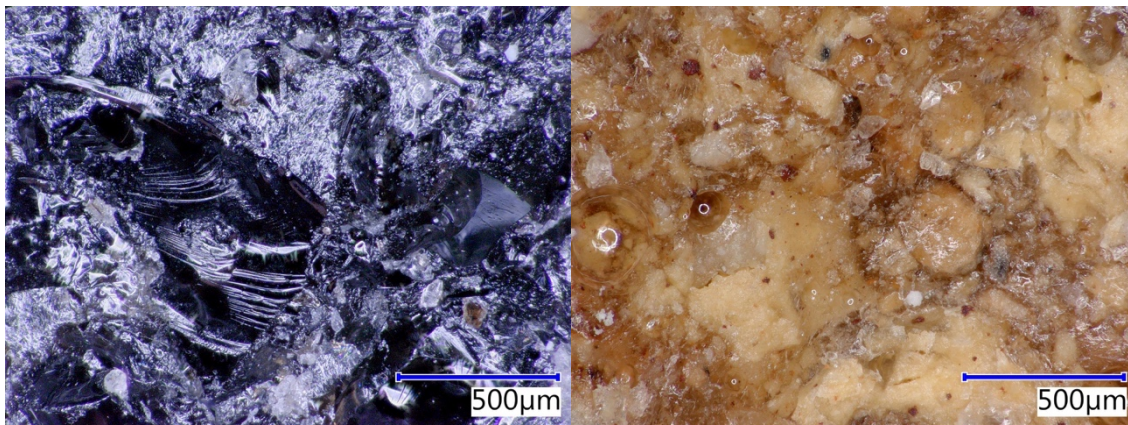
Na rozlomených polovinách zkušebních těles byly pořízeny snímky na optickém mikroskopu. Snímky zachycují strukturu zkušebních těles, kde je zobrazena kompatibilita materiálu a pórovitost.



**Obrázek 89:** Snímek silikátového zkušebního vzorku s plnivem čedičových odkapů z optického mikroskopu

**Obrázek 90:** Snímek silikátového zkušebního vzorku s plnivem korundu frakce F30 z optického mikroskopu

Ze snímků obou silikátových zkušebních vzorků byla viditelná dobrá kompatibilita pojiva s plnivem. U vzorku s plněním čedičovými odkapy byla zjištěna mírná pórovitost.



**Obrázek 91:** Snímek polymerního zkušebního vzorku s plnivem čedičových odkapů z optického mikroskopu

**Obrázek 92:** Snímek polymerního zkušebního vzorku s plnivem šamotové drti z optického mikroskopu

V případě polymerních zkušebních vzorků byla dle očekávání kompatibilita epoxidové pryskyřice a plniva na vysoké úrovni, jelikož plnivo bylo velmi dobře obaleno epoxidovou pryskyřicí. U zkušebního vzorku se šamotovou drtí byla zjištěna také mírná pórovitost.

### **12.3 Shrnutí etapy 5 - zhodnocení dosavadních výsledků experimentálního ověření kompozitu**

Začátek páté etapy definoval 4 finální receptury, které byly vybrány z optimalizace. Byly definovány také jejich testovací metody, na jejichž základě byly zkušební tělesa těchto receptur experimentálně ověřovány.

Druhou částí této etapy bylo zhotovení zkušebních těles dvou silikátových a dvou polymerních receptur. Zkušební tělesa ze silikátových receptur byly vyrobeny dle normového postupu s plněním 65 %. Postup výroby zkušebních těles z polymerních receptur byl proveden také dle příslušné normy.

Ve finální fázi této etapy bylo provedeno experimentální ověření vlastností nově vyrobených kompozitů. Byla stanovena objemová hmotnost zkušebních těles, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a odolnosti proti obruš metodou Böhme.

Objemová hmotnost by měla dosahovat vyšších hodnot, jelikož nahrazovaný tavený čedič má objemovou hmotnost kolem  $3000 \text{ kg/m}^3$ . Ze silikátových receptur vyšla vyšší objemová hmotnost u zkušebních těles, kde plnivem byl korund frakce F30. U silikátových receptur byla výrazně vyšší objemová hmotnost u zkušebních těles s plněním čedičovými odkapy.

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo jednoznačně vyšší u zkušebních těles z polymerních receptur. Stanovení pevnosti v tlaku bylo už o poznání vyrovnanější, ale opět zkušební tělesa z polymerních receptur dosáhly vyšších hodnot.

Naopak u stanovení odolnosti proti obrušování dosáhly lepších výsledků zkušební vzorky ze silikátových receptur. Nejmenšího hmotnostního úbytku pro zkoušku obrušování dosáhla silikátová receptura s plněním čedičovými odkapy.

Všechny tyto materiálové vlastnosti byly zhodnoceny ve finální etapě diplomové práce, kde došlo k porovnání s materiálovými vlastnostmi taveného čediče a k určení nejvhodnější receptury pro vysoce odolný kompozit.

## **13 ETAPA 6 - Souhrn vlastností nově vyvinutého kompozitu**

Poslední etapa diplomové práce měla za úkol prezentovat souhrn materiálových vlastností nově vyvinutých kompozitů, ze kterých byl stanoven jeden nejvhodnější vysoce odolný kompozit, který se svými vlastnostmi nejvíce blížil tavenému čediči.

Ve finální podobě vývoje vysoce odolného kompozitu bylo pracováno se čtyřmi variantami kompozitu, z čehož dva byly na silikátové bázi a dva na polymerní bázi. Tyto kompozity z daných receptur byly experimentálně ověřovány pro zjištění jejich materiálových vlastností a následně došlo k porovnání hodnot těchto vlastností.

Materiálové vlastnosti byly určeny v podobě stanovení objemové hmotnosti, stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku a v poslední řadě stanovením odolnosti proti ohrusu.

### **13.1 Vyhodnocení výsledků laboratorních zkoušek vysoce odolného kompozitu**

Čtyři varianty nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu byly testovány experimentálním ověřením jejich vlastností. Jako prioritní vlastnost kompozitu byla brána pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Dále byl určen hmotnostní úbytek při stanovení odolnosti proti ohrusu, které bylo prováděno metodou Böhme.

Jako první byla stanovena objemová hmotnost na nově vyvinutém kompozitu. Nejvyšší hodnota objemové hmotnosti byla  $2500 \text{ kg/m}^3$ , které dosáhl silikátový kompozit s plněním korundu frakce F30. Nejnižší objemová hmotnost měla hodnotu  $1630 \text{ kg/m}^3$  a byla zjištěna u polymerního kompozitu, který měl jako plnivo šamotovou drť.

Druhá byla provedena zkouška stanovení pevností v tahu za ohybu po 28 dnech. Ze čtyř nově vyvíjených kompozitů byla nejvyšší pevnost v tahu za ohybu zjištěna u polymerního kompozitu s plněním čedičovými odkapy, jehož hodnota byla 33,8 MPa. O něco menší byla zjištěna tato pevnost u polymerního kompozitu s plněním šamotovou drtí. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu silikátových kompozitů byly 7,4 MPa a 7,3 MPa.

Na rozlomených polovinách zkušebních těles byla provedena zkouška pevnosti v tlaku po 28 dnech. Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla dosažena opět u polymerního

kompozitu s plněním čedičovými odkapy. Tato hodnota činila 85,2 MPa. Naopak nejnižší pevnost v tlaku byla zjištěna u silikátového kompozitu, který měl jako plnivo korund frakce F30. Hodnota pevnosti silikátového kompozitu s korundem činila 57,8 MPa.

Poslední zkouškou, která byla provedena na finálních kompozitech, bylo stanovení odolnosti proti obrusu. U této zkoušky byl vyhodnocen hmotnostní úbytek. Nejlepší odolnost proti obrusu, tedy nejmenší hmotnostní úbytek, byl zaznamenán u silikátového kompozitu, který měl plnivovou složku tvořenou čedičovými odkapy. Hodnota hmotnostního úbytku činila pouhých 1,53 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>3</sup>. Nejvyšší hmotnostní úbytek byl zjištěn u polymerního kompozitu s plněním čedičovými odkapy, jehož hodnota byla 4,19 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>3</sup>.

Všechny hodnoty z experimentálního ověření materiálových vlastností nově vyvinutých kompozitů byly zaznamenány do následující tabulky.

**Tabulka 55:** Shrnutí hodnot experimentálního ověření vlastností nově vyvinutých vysoce odolných kompozitů

|                         | Jednotka                               | CEM čedičové odkapy | CEM korund F30 | EP čedičové odkapy | EP šamotová drť |
|-------------------------|----------------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| Objemová hmotnost       | [kg/m <sup>3</sup> ]                   | 2250                | 2500           | 2050               | 1630            |
| Pevnost v tahu za ohybu | [MPa]                                  | 7,4                 | 7,3            | 33,8               | 32,7            |
| Pevnost v tlaku         | [MPa]                                  | 66,3                | 57,8           | 85,2               | 76,7            |
| Odolnost proti obrusu   | [cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>3</sup> ] | 1,53                | 3,74           | 4,19               | 3,89            |

### 13.2 Stanovení nejlépe vyhovujícího složení kompozitu

Na základě experimentálního ověření materiálových vlastností nově vyvíjených kompozitů bylo provedeno srovnání jejich hodnot. Dle dřívějšího uvážení byly jako primární vlastnosti brány: pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.

Nejvyšších hodnot těchto dvou vlastností bylo dosaženo u zkušebních těles vyrobených z polymerní receptury, která jako plnivo obsahovala čedičové odkapy. Po

stránce ostatních vlastností nezaostával tento kompozit za ostatními. Na základě tohoto uvážení bylo zvoleno jako nejlépe vyhovující složení kompozitu takové, kde byla jako pojivová složka využita epoxidová pryskyřice a čedičové odkapy jako plnivová složka.

Jeho materiálové vlastnosti jsou následující: objemová hmotnost měla hodnotu 2050 kg/m<sup>3</sup>, pevnost v tahu za ohybu činila 33,8 MPa, pevnost v tlaku měla hodnotu 85,2 MPa a hmotnostní úbytek při stanovení odolnosti proti ohrusu činil 4,19 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>3</sup>.

### **13.3 Shrnutí etapy 6 - Porovnání hodnot vysoce odolného kompozitu s hodnotami taveného čediče**

Polymerní kompozit byl zvolen na základě pohledu na primární hledisko, kterým byla pevnost (v tahu za ohybu i v tlaku). I po chemické stránce polymerní kompozit díky epoxidové pryskyřici získal výbornou chemickou odolnost, která u kompozitu na silikátové bázi nebyla tak přesvědčivá. Silikátový kompozit sice byl po stránce objemové hmotnosti na vyšších hodnotách, ale toto kritérium mělo menší váhu důležitosti. Důležitějšími kritérii pro volbu polymerního kompozitu byly ostatní hodnoty vlastností, kterých tento nově vyvinutý kompozit dosáhl. Kritériu pro stanovení odolnosti proti ohrusu vyhověly všechny finální kompozity, tudíž tento parametr ve výsledku nebyl také rozhodující vlastností kompozitu.

V tabulce č. 56 byly zaznamenány a porovnány hodnoty vlastností taveného čediče a vybraného nejvhodnějšího vysoce odolného kompozitu, kterým se stal kompozit na polymerní bázi s plněním čedičových odkapů.

Hodnoty taveného čediče byly brány z technického listu, které jsou uváděny dle výrobce. Vyvíjený kompozit v některých ohledech dosáhl blízkých se hodnot.

V posledním sloupci tabulky bylo procentuálně vyjádřeno, na kolik procent se nově vyvíjený vysoce odolný kompozit přiblížil hodnotám tavenému čediči.

**Tabulka 56:** Porovnání hodnot taveného čediče a návrh nejvhodnějšího vysoce odolného kompozitu

|                            | Jednotka                               | Tavený čedič | EP čedičové odkapy | Přiblížení<br>čediči |
|----------------------------|----------------------------------------|--------------|--------------------|----------------------|
| Objemová<br>hmotnost       | [kg/m <sup>3</sup> ]                   | 2900-3000    | 2050               | 70,7 %               |
| Pevnost v tahu<br>za ohybu | [MPa]                                  | 40           | 33,8               | 84,5 %               |
| Pevnost<br>v tlaku         | [MPa]                                  | 300-400      | 85,2               | 28,4 %               |
| Odolnost proti<br>obrusu   | [cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>3</sup> ] | max. 5       | 4,19               | 100 %                |

## 14 Závěr

V rámci diplomové práce byly v teoretické části charakterizovány materiálové vlastnosti taveného čediče, jeho výroba a využití v praxi. Dále bylo řešeno prostředí kanalizačních stok, do kterých by měl být použit nově vyvinutý vysoce odolný kompozit jako náhrada výrobků z taveného čediče.

Aby bylo dosaženo vysokých pevností, byla rozebrána problematika vysokopevnostních betonů, které by svojí podstatou přiblížily k vysokým pevnostem i nově vyvíjený kompozit. V teoretické části bylo také zhodnocen dosavadní stav vývoje vysoce odolného kompozitu, který byl předmětem bakalářské práce.

Cílem diplomové práce bylo pracovat se současným stavem poznání vývoje vysoce odolného kompozitu a zlepšit jeho materiálové vlastnosti. Proto na úvod praktické části byly analyzovány vstupní suroviny, které byly rozděleny na pojivové složky a plnivé složky. Z pojivových složek byla uvažována silikátová a polymerní varianta. Jako silikátová varianta bylo stanoveno nejvhodnější pojivo CEM I 52,5 R a z polymerní varianty bylo jako nejvhodnější pojivo určena epoxidová pryskyřice IN-EPOX 2050.

Plnivová složka se rozdělila na primární a druhotná plniva, které prošly optimalizací. Optimalizací došlo ke stanovení nejvhodnějších plniv pro vývoj vysoce odolného kompozitu, kterými byly: čedičové odkapy, šamotová drť, korund a baryt. Tyto plniva byly následně podrobněji charakterizovány. Byla provedena RTG analýza pro zjištění zastoupení minerálů, byla také zjištěna granulometrie pomocí síťového rozboru a byla určena nutnost předúpravy.

Na základě materiálových charakteristik došlo k sestavení 24 silikátových receptur a 18 polymerních receptur, které byly zhotoveny ve formě zkušebních těles. Vysoce odolný kompozit byl během svého vývoje v několika fázích experimentálně ověřován s rozdílným plnivem. U plniva bylo zohledněno také nejvhodnější plnění, které mělo u každé receptury tři varianty.

Ze všech uvažovaných receptur, které byly navrženy v první fázi diplomové práce, byla provedena optimalizace z obou variant (silikátová, polymerní) na šest uvažovaných receptur od každé. Sestavené receptury prošly dalším experimentálním ověřením a technologickým vývojem, který by zlepšil vlastnosti nově vyvíjeného vysoce odolného kompozitu. Na recepturách byla provedena finální optimalizace, kdy ze šesti silikátových

a ze šesti polymerních receptur byly vybrány dvě silikátové a dvě polymerní receptury, které byly předmětem finálního experimentálního ověřování vlastností.

Experimentální ověření bylo provedeno stanovením objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a odolností proti ohrusu. Po stránce stanovení pevností nejlépe vyhověly zkušební vzorky, které obsahovaly epoxidovou pryskyřici. Naopak hmotnostní úbytek při zkoušce opotřebením ohrusem vyšel nejnižší u silikátových vzorků.

Z hodnot materiálových vlastností výsledných kompozitů byl zvolen jako nevhodnější kompozit, který byl na polymerní bázi. Pojivem byla epoxidová pryskyřice a jako plnivo byly využity čedičové odkapy (plnění 75 %). Ve srovnání se svými materiálovými vlastnostmi se nejvíce blížil vlastnostem, kterých dosahuje tavený čedič.

Nově vyvinutý polymerní kompozit měl hodnotu objemové hmotnosti  $2050 \text{ kg/m}^3$  (tavený čedič  $2900 - 3000 \text{ kg/m}^3$ ). Velmi pozitivních hodnot dosáhl kompozit při stanovení pevností - pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech  $33,8 \text{ MPa}$  (tavený čedič  $40 \text{ MPa}$ ) a pevnost v tlaku po 28 dnech  $85,2 \text{ MPa}$  (tavený čedič  $300 - 400 \text{ MPa}$ ). Odolnost proti ohrusu byla provedena metodou Böhme a hmotnostní úbytek činil  $4,19 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^3$ . U taveného čediče byla uvedena hodnota maximálního hmotnostního úbytku  $5 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^3$ , z čehož vyplynulo, že toto kritérium nebylo porušeno.

Závěrem diplomové práce je možné konstatovat, že nově vyvinutý vysoce odolný kompozit dosahuje velmi dobrých hodnot materiálových vlastností blížících se tavenému čediči, a to zejména v pevnosti v tahu za ohybu a odolností proti ohrusu, což jsou dvě dominantní vlastnosti, které předurčují jeho použití v kanalizacích. Jediným rozdílným faktorem je pevnost v tlaku, která je u vyvinutého kompozitu dostatečná natolik, aby tímto kompozitem mohly být rozšířeny výrobní řady produktů z taveného čediče o vysoce odolný kompozit.

Z ekonomického hlediska lze usoudit, že je nově vyvinutý kompozit nenáročný na výrobu, jelikož je využíváno smíchání epoxidové pryskyřice a druhotné suroviny, kterou jsou odkapy z taveného čediče. Po ekonomické stránce je nutné započítat cenu používané epoxidové pryskyřice, dopravu druhotného materiálu a drobné úpravy tohoto materiálu. Tato kalkulace nepřevyšuje cenu vynaloženou na výrobní proces produktů z taveného čediče. V poslední řadě je možné říct, že z ekologického hlediska příliš nezatěžuje životní prostředí.

Ke zlepšení materiálových vlastností by mohlo ještě případně dojít namícháním různých vysokohodnotných plniv. To znamená současné využití čedičových odkapů i korundu. Oba materiály vykazovaly vynikající vlastnosti, takže tato další výzkumná cesta by mohla být také zajímavá. Cíle diplomové práce byly splněny.

## Seznam použité literatury

- [1] 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, 2011. ISBN 978-80-270-0490-4.
- [2] ČERNÝ, Pavel. *Vývoj kompozitu s vysokým podílem druhotných surovin a taveného čediče*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT Brno, fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [3] *Nerostné suroviny a jejich využití: Tavené horniny* [online]. 2007 [cit. 2018-06-04]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene\\_horniny.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html)
- [4] *EUTIT®* [online]. [cit. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://www.eutit.cz/>
- [5] *EMKOL Litomyšl: Diamantová pila VMP 400* [online]. [cit. 2018-06-04]. Dostupné z: <http://www.emkol.cz/eshop/product/diamantova-pila-vmp-400/>
- [6] *Fakulta stavební, vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: Studijní materiály - tzb I* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/tzb-1/8.html>
- [7] *ČVUT, hydraulika: Stokování* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Stokovani.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Stokovani.pdf)
- [8] *Poradme.se: Druhy odpadních vod* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: [http://poradme.se/index.php/Druhy\\_odpadnich\\_vod](http://poradme.se/index.php/Druhy_odpadnich_vod)
- [9] *Litomyšl: Technické standardy - kanalizace* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: [https://www.litomysl.cz/soubor\\_zobraz.php?soubor=1427866561492\\_technicke-standardy-kanalizace.pdf](https://www.litomysl.cz/soubor_zobraz.php?soubor=1427866561492_technicke-standardy-kanalizace.pdf)
- [10] *Blšany: Kanalizace* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: [http://www.blšany.cz/\\_data/upload/File/kanalizace.pdf](http://www.blšany.cz/_data/upload/File/kanalizace.pdf)
- [11] *ČVUT, fakulta stavební: Stokování - kanalizační stoky* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/hanekpav/K154/PDF/Stokovani.pdf>
- [12] *Brněnské vodárny a kanalizace: Kanalizační síť* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cisteni-odpadnich-vod/kanalizacni-sit/>
- [13] *Wavin: Revizní a vstupní šachty Tegra* [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://sewer.wavin.com/cz>

- [14] KO-KA s.r.o. [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: [http://www.ko-ka.cz/cz/kanalizace\\_Zahrada\\_Kinskyh.asp](http://www.ko-ka.cz/cz/kanalizace_Zahrada_Kinskyh.asp)
- [15] Třebíč: Dešťová vpust Bartuskova [online]. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://www.trebic.cz/destova-vpust-bartuskova/g-18224>
- [16] MYŠIČKOVÁ, Lucie. *Vlastnosti, zkoušení a využití UHPC v konstrukcích*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT Brno, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
- [17] HELA Rudolf, BODNÁROVÁ Lenka a MARŠÁLOVÁ Jana. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost. ISSN issn1213-3116.
- [18] EBETON: *Vysokohodnotný beton (HPC)* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokohodnotny-beton-hpc>
- [19] *Technické podmínky TP 226: Vysokohodnotné betony pro mosty PK*. Praha, 2010.
- [20] Chong Wang, Xincheng Pu, Changhui Yang, Chaojun Wan a Fang Liu. *Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials* [online]. 2012 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894651100206X?via%3Dihub>
- [21] M.M Reda, N.G Shrive a J.E Gillotta. *Microstructural investigation of innovative UHPC* [online]. 1999 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698002257?via%3Dihub>
- [22] KOLÍSKO, Jiří, Petr HUŇKA, Milan RYDVAL a Michaela KOSTELECKÁ. *Development of UHPC from materials available in Czech republic* [online]. 2013 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [http://www.cesb.cz/cesb13/proceedings/3\\_materials/CESB13\\_1414.pdf](http://www.cesb.cz/cesb13/proceedings/3_materials/CESB13_1414.pdf)
- [23] COUFAL, Robert, Jan L. VÍTEK a Alena PROCHÁZKOVÁ. *PRAKTICKÁ ZKUŠENOST S VÝROBOU A DOPRAVOU UHPC* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/BETON\\_2-15\\_COUFAL\\_UHPC.PDF](http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/BETON_2-15_COUFAL_UHPC.PDF)
- [24] VÍTEK, Jan, Robert COUFAL. *Vysokopevnostní betony a UHPC. Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou*. 2012
- [25] TBG Metrostav: *Ultra-vysokopevnostní betony – UHPC* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc/>

- [26] *IMateriály: Unikátní lávka s nosnou konstrukcí z UHPC v Čelákovících* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich\\_42526.html](https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich_42526.html)
- [27] KOLÍSKO, Jiří, Jan TICHÝ, Milan KALNÝ, Petr HUŇKA, Petr HÁJEK a Vladislav TREFIL. *Vývoj ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR*. 2012.
- [28] Will Hansen, Zhichao Liu, Sherif El-Tawil a Mo Alkaysi. *Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC)* [online]. 2016 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894651530055X>
- [29] *Ultra high performance concrete: Guide to manufacturing architectural precast UHPC elements*. [online]. [cit. 2018-12-13]. (dostupné na: <http://precast.org/wp-content/uploads/2011/05/NPCA-ultra-high-performance-concrete.pdf>)
- [30] Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhengyu Huang, Zhi Fang a Caijun Shi. *A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design* [online]. 2015 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305092>
- [31] TICHÝ, Jan, Alain ŠTĚRBA, Vladislav TREFIL a Ivo ŽALUDEK. *Ultravysokopevnostní beton v prefabrikaci*. Praha, 2010.
- [32] *Federal Highway Administration Research and Technology: Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm#c6a>
- [33] , Gilles Escadeillas, Soltane Lebaili, Thierry Vidal a Ahmed Taфраoui. *Metakaolin in the formulation of UHPC* [online]. 2009 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808000676>
- [34] PANENKOVÁ, Monika. *SOUČASNÝ VÝVOJ UHPC BETONŮ A OVĚŘENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VUT Brno, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.
- [35] Cheah Chee Ban a Tan Leng Ee. *EFFECTS OF STEAM CURING ON STRENGTH DEVELOPMENT OF SODIUM CARBONATE AND SODIUM SILICATE ACTIVATED*

- FLY ASH/SLAG MORTAR* [online]. 2016 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/319892958\\_EFFECTS\\_OF\\_STEAM\\_CURING\\_ON\\_STRENGTH\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_SODIUM\\_CARBONATE\\_AND\\_SODIUM\\_SILICATE\\_ACTIVATED\\_FLY\\_ASH\\_SLAG\\_MORTAR](https://www.researchgate.net/publication/319892958_EFFECTS_OF_STEAM_CURING_ON_STRENGTH_DEVELOPMENT_OF_SODIUM_CARBONATE_AND_SODIUM_SILICATE_ACTIVATED_FLY_ASH_SLAG_MORTAR)
- [36] Mengyuan Li, Qiang Wang a Jun Yang. *Influence of Steam Curing Method on the Performance of Concrete Containing a Large Portion of Mineral Admixtures* [online]. 2017 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/9863219/>
- [37] *Wikipedie: Sklářský písek* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Skl%C3%A1%C5%99sk%C3%BD\\_p%C3%ADsek](https://cs.wikipedia.org/wiki/Skl%C3%A1%C5%99sk%C3%BD_p%C3%ADsek)
- [38] *K-PÍSEK: Křemičitý písek na tryskání* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.k-pisek.cz/kremicity-pisek-na-tryskani-piskovani-frakce-0-6-1-2>
- [39] *Korund: Bílý korund* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [http://www.korund.cz/products/white-corundum#menu\\_row](http://www.korund.cz/products/white-corundum#menu_row)
- [40] *Abranova: Umělý hnědý korund* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://abranova-eshop.cz/umely-hnedy-korund-abrablast-f-40-25kg>
- [41] *Žáruvzdorné materiály a výrobky* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: [https://www.spsstavcb.cz/download2/633\\_2428\\_cs\\_09\\_zaruvzdorne\\_materialy\\_a\\_vyroby.pdf](https://www.spsstavcb.cz/download2/633_2428_cs_09_zaruvzdorne_materialy_a_vyroby.pdf)
- [42] *SABAR: Barytová drvina* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.sabar.sk/Baryt/Barytova-drvina.aspx>
- [43] BENSCHIEDT, N. a Rudolf HELA. *Průručka Popílek v betonu: základy výroby a použití*. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN isbn978-80-260-4226-6.
- [44] GOTTWALDOVÁ, Aneta. *Možnosti využití odpadního skla v cementových kompozitech*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT Brno, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [45] *Odpady: Brusné kaly* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/recyklacni-technologie-pro-brusne-kaly/>
- [46] *LAVARIS: Aktivní kamenný prach* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.lavaris.cz/kamenny-prach-kp.html?lang=cs>
- [47] ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

- [48] ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [49] ČSN EN 993-16: Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 16: Stanovení odolnosti proti kyselině sírové. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [50] ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [51] ČSN EN 13892-3: Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

## Seznam tabulek

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabulka 1: Tavený čedič z pohledu chemického složení [1].....</i>                                                                       | 16 |
| <i>Tabulka 2: Přehled vybraných vlastností taveného čediče [1].....</i>                                                                    | 17 |
| <i>Tabulka 3: Zkoušky prováděné na zkušebních tělesech cementového, polymercementového a epoxidového kompozitu a jejich normy [2].....</i> | 48 |
| <i>Tabulka 4: Souhrnné výsledky všechází současného stavu kompozitu [2].....</i>                                                           | 51 |
| <i>Tabulka 5: Běžné chemické složení popílku [43].....</i>                                                                                 | 64 |
| <i>Tabulka 6: Běžné chemické složení odpadního skla [44].....</i>                                                                          | 66 |
| <i>Tabulka 7: Preference jednotlivých kritérií - suroviny .....</i>                                                                        | 68 |
| <i>Tabulka 8: Vyčíslení daných kritérií - suroviny.....</i>                                                                                | 69 |
| <i>Tabulka 9: Výsledné hodnoty preference - suroviny .....</i>                                                                             | 69 |
| <i>Tabulka 10: Celkový propad síty - čedičové odkapy.....</i>                                                                              | 71 |
| <i>Tabulka 11: Chemické složení čedičových odkapů .....</i>                                                                                | 72 |
| <i>Tabulka 12: Celkový propad síty - šamotová drť.....</i>                                                                                 | 73 |
| <i>Tabulka 13: Chemické složení šamotové drti .....</i>                                                                                    | 74 |
| <i>Tabulka 14: Celkový propad síty - korund F14 .....</i>                                                                                  | 75 |
| <i>Tabulka 15: Celkový propad síty - korund F30 .....</i>                                                                                  | 77 |
| <i>Tabulka 16: Celkový propad síty - korund F60 .....</i>                                                                                  | 78 |
| <i>Tabulka 17: Celkový propad síty - baryt .....</i>                                                                                       | 80 |
| <i>Tabulka 18: Složení prvotních receptur na silikátové bázi.....</i>                                                                      | 86 |
| <i>Tabulka 19: Složení prvotních receptur na polymerní bázi.....</i>                                                                       | 86 |
| <i>Tabulka 20: Průměrné hodnoty objemových hmotností a pevností silikátových těles prvotních receptur .....</i>                            | 87 |
| <i>Tabulka 21: Průměrné hodnoty objemových hmotností a pevností polymerních těles prvotních receptur .....</i>                             | 89 |
| <i>Tabulka 22: Preference jednotlivých kritérií - silikátové receptury .....</i>                                                           | 92 |
| <i>Tabulka 23: Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur 1 - 12 .....</i>                                                            | 93 |
| <i>Tabulka 24: Vyčíslení daných kritérií silikátových receptur 13 - 24 .....</i>                                                           | 93 |
| <i>Tabulka 25: Výsledné hodnoty preference jednotlivých silikátových receptur 1 - 12 [%] .....</i>                                         | 93 |
| <i>Tabulka 26: Výsledné hodnoty preference jednotlivých silikátových receptur 13 – 24 [%] .....</i>                                        | 94 |
| <i>Tabulka 27: Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur 1 – 9.....</i>                                                               | 94 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabulka 28:</b> Vyčíslení daných kritérií polymerních receptur 10 – 18.....                                                    | 95  |
| <b>Tabulka 29:</b> Výsledné hodnoty preference jednotlivých polymerních receptur 1 – 9 [%]<br>.....                               | 95  |
| <b>Tabulka 30:</b> Výsledné hodnoty preference jednotlivých polymerních receptur 10 – 18<br>[%] .....                             | 95  |
| <b>Tabulka 31:</b> Vyhodnocení chemické odolnosti zkušebních těles z jednotlivých plniv..                                         | 100 |
| <b>Tabulka 32:</b> Korund F14 propařený, plnění 65 %.....                                                                         | 101 |
| <b>Tabulka 33:</b> Korund F30 propařený, plnění 65 %.....                                                                         | 102 |
| <b>Tabulka 34:</b> Korund F60 propařený, plnění 65 %.....                                                                         | 102 |
| <b>Tabulka 35:</b> Čedič 0-2 mm propařený, plnění 65 % .....                                                                      | 102 |
| <b>Tabulka 36:</b> Čedič 0-4 mm propařený, plnění 65 % .....                                                                      | 102 |
| <b>Tabulka 37:</b> Baryt propařený, plnění 65 % .....                                                                             | 102 |
| <b>Tabulka 38:</b> Souhrn silikátových receptur pro finální optimalizaci .....                                                    | 105 |
| <b>Tabulka 39:</b> Souhrn polymerních receptur pro finální optimalizaci.....                                                      | 105 |
| <b>Tabulka 40:</b> Preference jednotlivých kritérií – finální receptury .....                                                     | 107 |
| <b>Tabulka 41:</b> Vyčíslení daných kritérií – finální silikátové receptury .....                                                 | 107 |
| <b>Tabulka 42:</b> Výsledné hodnoty preference – finální silikátové receptury [%] .....                                           | 108 |
| <b>Tabulka 43:</b> Vyčíslení daných kritérií – finální polymerní receptury .....                                                  | 108 |
| <b>Tabulka 44:</b> Výsledné hodnoty preference – finální polymerní receptury [%] .....                                            | 109 |
| <b>Tabulka 45:</b> Složení finálních receptur pro nově vyvíjený vysoce odolný kompozit ....                                       | 109 |
| <b>Tabulka 46:</b> Objemová hmotnost silikátových zkušebních těles s plněním čedičovými<br>odkapy .....                           | 115 |
| <b>Tabulka 47:</b> Objemová hmotnost silikátových zkušebních těles s plněním korundem<br>frakce F30.....                          | 115 |
| <b>Tabulka 48:</b> Objemová hmotnost polymerních zkušebních těles s plněním čedičovými<br>odkapy .....                            | 115 |
| <b>Tabulka 49:</b> Objemová hmotnost polymerních zkušebních těles s plněním šamotovou<br>drtí .....                               | 116 |
| <b>Tabulka 50:</b> Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku silikátových zkušebních těles s<br>plněním čedičovými odkapy.....    | 117 |
| <b>Tabulka 51:</b> Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku silikátových zkušebních těles s<br>plněním korundem frakce F30 ..... | 117 |
| <b>Tabulka 52:</b> Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku polymerních zkušebních těles s<br>plněním čedičovými odkapy.....     | 118 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabulka 53:</b> Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku polymerních zkušebních těles s plněním šamotovou drtí ..... | 118 |
| <b>Tabulka 54:</b> Výsledky obrusnosti finálních receptur .....                                                          | 120 |
| <b>Tabulka 55:</b> Shrnutí hodnot experimentálního ověření vlastností nově vyvinutých vysoce odolných kompozitů .....    | 125 |
| <b>Tabulka 56:</b> Porovnání hodnot taveného čediče a návrh nejvhodnějšího vysoce odolného kompozitu .....               | 127 |

## Seznam obrázků

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obrázek 1:</b> Tunelová chladicí pec [3].....                                       | 18 |
| <b>Obrázek 2:</b> Čedičová podlaha v průmyslovém provozu [4].....                      | 19 |
| <b>Obrázek 3:</b> Klasická dlaždice o rozměru 200 × 200 × 30 mm [4].....               | 20 |
| <b>Obrázek 4:</b> Pohled na pravoúhlé čedičové dlaždice [4].....                       | 20 |
| <b>Obrázek 5:</b> Protiskluzová dlaždice z taveného čediče [4].....                    | 20 |
| <b>Obrázek 6:</b> Pohled na poskládané šestihranné dlaždice [4].....                   | 20 |
| <b>Obrázek 7:</b> Klasická šestihranná dlaždice [4].....                               | 20 |
| <b>Obrázek 8:</b> Profilový pohled na dlaždici s hrubým rýhováním [4] .....            | 21 |
| <b>Obrázek 9:</b> Profilový pohled na dlaždici s jemným rýhováním [4].....             | 21 |
| <b>Obrázek 10:</b> Zjednodušená diamantová pila s vodním chlazením [5].....            | 21 |
| <b>Obrázek 11:</b> Čedičové trouby [4] .....                                           | 22 |
| <b>Obrázek 12:</b> Vejčitý žlab [4].....                                               | 23 |
| <b>Obrázek 13:</b> Žlab pro vejčité stoky pražského formátu [4].....                   | 23 |
| <b>Obrázek 14:</b> Domovní přípojka DN200 R1100 [4].....                               | 23 |
| <b>Obrázek 15:</b> Žlab pukavý z trub [4].....                                         | 24 |
| <b>Obrázek 16:</b> Klasická radiální tvarovka pro vyložení kanalizačních stok [4]..... | 24 |
| <b>Obrázek 17:</b> Radiální tvarovka v tl. 23 mm [4].....                              | 24 |
| <b>Obrázek 18:</b> Trouby pro ražení IN LINE [4].....                                  | 25 |
| <b>Obrázek 19:</b> Žlábek pro odvodnění mostních konstrukcí [4].....                   | 25 |
| <b>Obrázek 20:</b> Technický náčrt mostového žlábků [4] .....                          | 25 |
| <b>Obrázek 21:</b> Chemicky odolná čedičová kanalizační cihla [4].....                 | 26 |
| <b>Obrázek 22:</b> Kanalizační čedičová kantovka [4].....                              | 26 |
| <b>Obrázek 23:</b> Klín z taveného čediče [4].....                                     | 26 |
| <b>Obrázek 24:</b> Nátoková hlava spadišového vtoku [4].....                           | 27 |
| <b>Obrázek 25:</b> Soklová tvarovka z taveného čediče [4].....                         | 27 |
| <b>Obrázek 26:</b> Klasická dlaždice SKID-PAN [4] .....                                | 28 |
| <b>Obrázek 27:</b> Leštěná dlaždice SKID-PAN [4].....                                  | 28 |
| <b>Obrázek 28:</b> Stoková síť vejčitého tvaru [4] .....                               | 33 |
| <b>Obrázek 29:</b> Stoková síť kruhového tvaru [11] .....                              | 33 |
| <b>Obrázek 30:</b> Stoková síť tlamového tvaru [12].....                               | 33 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obrázek 31:</b> Vstupní šachta [13].....                                                            | 35 |
| <b>Obrázek 32:</b> Spojná komora kanalizační stoky [14].....                                           | 36 |
| <b>Obrázek 33:</b> Čedičová tvarovka pro spadiště ve stokové síti [14] .....                           | 37 |
| <b>Obrázek 34:</b> Dešťová vpust na komunikaci [15].....                                               | 37 |
| <b>Obrázek 35:</b> Odlehčovací komora [14].....                                                        | 38 |
| <b>Obrázek 36:</b> Grafické vyhodnocení pevností v tahu za ohybu u dříve vyvíjených kompozitů [2]..... | 48 |
| <b>Obrázek 37:</b> Grafické vyhodnocení pevností v tlaku u dříve vyvíjených kompozitů [2].             | 49 |
| <b>Obrázek 38:</b> Grafické vyhodnocení tvrdosti povrchu u dříve vyvíjených kompozitů [2]              | 50 |
| <b>Obrázek 39:</b> Sklářský písek [38] .....                                                           | 61 |
| <b>Obrázek 40:</b> Bílý korund [39] .....                                                              | 62 |
| <b>Obrázek 41:</b> Hnědý korund [40] .....                                                             | 62 |
| <b>Obrázek 42:</b> Snímek mikrostruktury čedičového odkapu z optického mikroskopu [2]...               | 64 |
| <b>Obrázek 43:</b> Záznam z RTG analýzy provedené na čedičových odkapech [2] .....                     | 65 |
| <b>Obrázek 44:</b> Nevyhovující šamotové výrobky – kotouče.....                                        | 67 |
| <b>Obrázek 45:</b> Předupravené čedičové odkapy .....                                                  | 70 |
| <b>Obrázek 46:</b> Křivka zrnitosti - čedičové odkapy .....                                            | 71 |
| <b>Obrázek 47:</b> Prvotní předúprava šamotového kotouče.....                                          | 72 |
| <b>Obrázek 48:</b> Kusy šamotových kotoučů určených pro drcení .....                                   | 72 |
| <b>Obrázek 49:</b> Předupravená šamotová drť.....                                                      | 72 |
| <b>Obrázek 50:</b> Křivka zrnitosti - šamotová drť .....                                               | 73 |
| <b>Obrázek 51:</b> Záznam z RTG - šamotová drť.....                                                    | 74 |
| <b>Obrázek 52:</b> Korund frakce F14.....                                                              | 75 |
| <b>Obrázek 53:</b> Korund frakce F30.....                                                              | 75 |
| <b>Obrázek 54:</b> Korund frakce F60.....                                                              | 75 |
| <b>Obrázek 55:</b> Křivka zrnitosti - korund F14.....                                                  | 76 |
| <b>Obrázek 56:</b> Záznam z RTG - korund F14 .....                                                     | 76 |
| <b>Obrázek 57:</b> Křivka zrnitosti - korund F30.....                                                  | 77 |
| <b>Obrázek 58:</b> Záznam z RTG - korund F30 .....                                                     | 78 |
| <b>Obrázek 59:</b> Křivka zrnitosti - korund F60.....                                                  | 79 |
| <b>Obrázek 60:</b> Záznam z RTG - korund F60.....                                                      | 79 |
| <b>Obrázek 61:</b> Barytová drť vhodná pro výrobu kompozitu .....                                      | 80 |
| <b>Obrázek 62:</b> Křivka zrnitosti – baryt .....                                                      | 81 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Obrázek 63:</b> Záznam z RTG - baryt .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 81  |
| <b>Obrázek 64:</b> Křivka zrnitosti čedičových odkapů a šamotové drti frakce 0 - 4 mm dle Fullera .....                                                                                                                                                                                                                  | 84  |
| <b>Obrázek 65:</b> Křivka zrnitosti čedičových odkapů a šamotové frakce 0 - 2 mm dle Fullera .....                                                                                                                                                                                                                       | 85  |
| <b>Obrázek 66:</b> Graf pevnosti v tahu za ohybu silikátových prvotních receptur .....                                                                                                                                                                                                                                   | 88  |
| <b>Obrázek 67:</b> Graf pevnosti v tlaku silikátových prvotních receptur .....                                                                                                                                                                                                                                           | 88  |
| <b>Obrázek 68:</b> Zkušební tělesa polymerních receptur, které byly podrobeny stanovení pevnosti .....                                                                                                                                                                                                                   | 90  |
| <b>Obrázek 69:</b> Graf pevnosti v tahu za ohybu polymerních prvotních receptur .....                                                                                                                                                                                                                                    | 90  |
| <b>Obrázek 70:</b> Graf pevnosti v tlaku polymerních prvotních receptur .....                                                                                                                                                                                                                                            | 91  |
| <b>Obrázek 71:</b> Zařízení na stanovení chemické odolnosti .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 99  |
| <b>Obrázek 72:</b> Vzorek při varu u stanovení chemické odolnosti .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 99  |
| <b>Obrázek 73:</b> Graf vyjadřující chemickou odolnost zkušebních těles .....                                                                                                                                                                                                                                            | 100 |
| <b>Obrázek 74:</b> Neodformované zkušební tělesa v propařovací komoře .....                                                                                                                                                                                                                                              | 101 |
| <b>Obrázek 75:</b> Grafické srovnání pevností v tlaku po 28 dnech na nepropařovaných a propařovaných zkušebních tělesech .....                                                                                                                                                                                           | 103 |
| <b>Obrázek 76:</b> Grafické srovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech na nepropařovaných a propařovaných zkušebních tělesech .....                                                                                                                                                                                   | 103 |
| <b>Obrázek 77:</b> 1a – Silikátová směs čedičových odkapů v trojformě, 1b - Zkušební tělesa s plnivem čedičových odkapů, 2a - Silikátová směs korundu F30 v trojformě, 2b - Vytvrzené zkušební tělesa s plnivem korundu F30 .....                                                                                        | 112 |
| <b>Obrázek 78:</b> Polymerní směs s plnivem čedičových odkapů .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 113 |
| <b>Obrázek 79:</b> Polymerní směs s plnivem šamotové drti .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 113 |
| <b>Obrázek 80:</b> 1a - Polymerní směs šamotové drti v trojformě, 1b - Vytvrzená zkušební tělesa s plnivem šamotové drti, 2a - Polymerní směs čedičových odkapů v trojformě, 2b - Vytvrzené zkušební tělesa s plnivem čedičových odkapů .....                                                                            | 114 |
| <b>Obrázek 81:</b> Graf vyjadřující objemovou hmotnost finálních receptur .....                                                                                                                                                                                                                                          | 116 |
| <b>Obrázek 82:</b> 1a – Porušené silikátové zkušební těleso po stanovení pevnosti v tahu za ohybu, 1b – Porušené silikátové zkušební těleso po stanovení pevnosti v tlaku, 2a – Rozlomená polymerní zkušební tělesa s plněním šamotovou drtí, 2b - Rozlomená polymerní zkušební tělesa s plněním čedičovými odkapy ..... | 117 |
| <b>Obrázek 83:</b> Graf vyjadřující pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech u finálních receptur .....                                                                                                                                                                                                                      | 118 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Obrázek 84:</b> Graf vyjadřující pevnosti v tlaku po 28 dnech u finálních receptur .....                        | 119 |
| <b>Obrázek 85:</b> Silikátové zkušební těleso zatížené při stanovení odolnosti proti ohrusu                        | 119 |
| <b>Obrázek 86:</b> Polymerní zkušební těleso zatížené při stanovení odolnosti proti ohrusu                         | 119 |
| <b>Obrázek 87:</b> Zkušební tělesa po provedení stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme .....               | 120 |
| <b>Obrázek 88:</b> Graf vyjadřující hmotnostní úbytek při ohrusnosti finálních zkušebních receptur .....           | 121 |
| <b>Obrázek 89:</b> Snímek silikátového zkušebního vzorku s plnivem čedičových odkapů z optického mikroskopu .....  | 121 |
| <b>Obrázek 90:</b> Snímek silikátového zkušebního vzorku s plnivem korundu frakce F30 z optického mikroskopu ..... | 121 |
| <b>Obrázek 91:</b> Snímek polymerního zkušebního vzorku s plnivem čedičových odkapů z optického mikroskopu .....   | 122 |
| <b>Obrázek 92:</b> Snímek polymerního zkušebního vzorku s plnivem šamotové drti z optického mikroskopu .....       | 122 |