



**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

**MOŽNOSTI ELIMINACE VZNIKU REDUKČNÍHO  
JÁDRA JEHO VLIV NA VLASTNOSTI  
CIHLÁŘSKÉHO STŘEPU**

THE EFFECT OF REDUCTION CORES ON THE PROPERTIES OF BRICK BODY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Kučera**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.**

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Kučera
Název	Možnosti eliminace vzniku redukčního jádra jeho vliv na vlastnosti cihlářského střepeu
Vedoucí práce	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

[1] Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN 80-7204-234-3.

[2] Hanykýř. V. Kutzendorfner Technologie keramiky. Vega. Hradec Králové 2001.

[3] ŠVEDA, M. The Reduction Core in Clay Roofing Tiles. Střechy, fasády, izolace, Vol. 13, 2003, No. 1, pp. 36 – 37 (in Slovak).

[4] ŠVEDA, M. Elimination of the Reduction Core in a Clay Roofing Tile Body. Ziegelindustrie International, Vol. 54, 2001, No. 8, pp. 34 - 43.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V souvislosti s modernizací výroby pálených střešních tašek (vyšší jemnost mletí a rychlost výpalu, snížení pórovitosti střepeu apod.) je redukční jádro velmi často běžnou součástí střepeu pálených střešních tašek. Je tedy otázkou, jak toto jádro ovlivňuje základní fyzikálně mechanické parametry pálených střešních tašek, a to zejména jejich základní posuzované parametry - únosnost (ČSN EN 538), mrazuvzdornost (ČSN EN 539-2) a prosákavost (ČSN EN 839-1).

Cíle diplomové práce je možno definovat v následujících bodech:

- v teoretické části práci provést rešerši doposud publikovaných výsledků výzkumu v oblasti vlivu redukčních jader na vlastnosti cihlářského střepeu a navrhnout opatření pro úspěšnou eliminaci redukčních jader během výpalu cihlářského střepeu,
  - v rámci experimentální části práce posoudit možnosti eliminace vzniku redukčních jader pro různé druhy výrobních směsí používaných v ČR - TONDACH Česká replika s.r.o.: vápenatý typ směsi (Hranice), resp. nevápnitý (Stod) za použití dostupných jemnozrnných příměsí s teoretickým předpokladem možnosti snížení rizika vzniku redukčních jader (např. fluidní elektrárenský popílek, prach z broušení cihlářských zdících prvků apod.) při různých režimech výpalu (rychlost nárůstu teploty, plnění pece, maximální teplota),
  - porovnat vlastnosti (pórovitost, pevnost, prosákavost, mrazuvzdornost) laboratorně připravených vzorků s různě vyvinutým redukčním jádrem v závislosti na typu a obsahu použité příměsi a režimu výpalu,
  - vyslovit závěr stran vlivu redukčního jádra na kvalitu pálených střešních tašek.
- Doporučený rozsah práce 60 - 70 stran.

## 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).

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou vzniku redukčného jadra predovšetkým v pálenej krytine. V pálenej krytine sa kladie dôraz na presiakavosť a mrazuvzdornosť. Redukčné jadro pôsobí na zníženie mrazuvzdornosti, záleží ale na maximálnej vypaľovacej teplote. Pri teplote 1060 °C nie je zníženie mrazuvzdornosti také nepriaznivé ako pri teplote 900 °C. V práci je popísaná rešerš doposiaľ publikovaných poznatkov v oblasti redukčného jadra. V oblasti mrazuvzdornosti už bolo publikované dostatočné množstvo literatúry, takže experimentálna časť je orientovaná hlavne na vplyv redukčného jadra na presiakavosť a porovnáva dva druhy výrobných zmesí používaných v Českej republike (vápenatý typ z Hranic a nevápenatý typ zo Stodu). Experimentálna časť takisto pojednáva o možnom využití fluidného popolčeka a prachu z brúsenia murovacích prvkov, ktoré je možné využiť ako prímеси. Vzniká otázka či je možné prostredníctvom spomenutých prímеси eliminovať redukčné jadro.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Redukčné jadro, mrazuvzdornosť, presiakavosť, tehliarsky črep

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with creation of reduction core problem mainly in fired roofing tiles. With those is the emphasis on the impermeability and frost resistance. Black reduction core is reducing frost resistance but depends on firing temperature. At 1060 °C the reduction in frost resistance is not as unfavorable as at 900 °C. This thesis includes overview of research conducted on reduction core topic. There is enough literature focusing on frost resistance, experimental part is focused mainly on the impact of reduction core on impermeability and compares two types of production mixtures used in Czech Republic (calcium-containing type from Hranice and non-calcium type from Stod). It includes comparison of mixtures with fluidized fly ash and dust from grinding masonry elements. It opens discussion if those mixtures can be used for reduction core elimination.

## **KEYWORDS**

Reduction core, frost resistance, impermeability, brick body

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Tomáš Kučera *Možnosti eliminace vzniku redukčního jádra jeho vliv na vlastnosti cihlářského střepu*. Brno, 2020. 102 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Možnosti eliminace vzniku redukčního jádra jeho vliv na vlastnosti cihlářského střepeu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

---

Bc. Tomáš Kučera  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnosti eliminace vzniku redukčního jádra jeho vliv na vlastnosti cihlářského střepeu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

---

Bc. Tomáš Kučera  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Za odborné vedenie a podporu pri riešení diplomovej práce ďakujem doc. Ing. Radomírovi Sokolárovi Ph. D. a ďalším členom Ústavu technológie stavebných hmôt a dielcov, ktorý mi boli pri spracovaní nápomocní.



## OBSAH

<b>Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>I. Teoretická časť</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Popis čierneho jadra</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Popis redukčného jadra</b> .....	<b>14</b>
<b>3 Chémia vzniku čierneho a redukčného jadra</b> .....	<b>15</b>
3.1 Faktory ovplyvňujúce veľkosť redukčného jadra .....	17
3.1.1 Prostredie v peci.....	17
3.1.1.1 Uloženie.....	17
3.1.2 Vplyv rýchlosti nábehu teploty a hrúbky črepu .....	18
3.1.3 Pórovitosť .....	18
<b>4 Vplyv redukčného jadra na vlastnosti črepu</b> .....	<b>20</b>
4.1 Vplyv na mrazuvzdornosť.....	21
<b>5 Spôsoby eliminácie redukčného jadra</b> .....	<b>23</b>
5.1 Eliminácia prísadou a ostrivom .....	23
5.1.1 Využitie chemických prísad .....	24
5.1.2 Využitie ostriva .....	26
<b>6 Charakteristika fluidného popolčeka</b> .....	<b>28</b>
6.1 Pozorovanie v keramike .....	30
<b>7 Charakteristika prachu z brúsenia tehál</b> .....	<b>31</b>
7.1 Využitie v stavebníctve .....	31
<b>II. Experimentálna časť</b> .....	<b>33</b>
<b>8 Cieľ práce</b> .....	<b>33</b>
<b>9 Metodika riešenia</b> .....	<b>33</b>
9.1 I. etapa – výroba a skúšky na dodaných plástoch .....	33
9.1.1 Príprava vzoriek .....	34
9.1.2 Postup prác .....	34
9.2 II. etapa – výroba a skúšky na laboratórne pripravených vzorkách .	35
9.2.1 Použité suroviny a ich vlastnosti .....	36
9.2.1.1 Testovanie vstupných surovín .....	36
9.2.1.1.1 Granulometria .....	36
9.2.1.1.2 Mineralogické zloženie .....	36
9.2.1.2 Výrobná zmes Hranice .....	36
9.2.1.3 Výrobná zmes Stod .....	38
9.2.1.4 Výrobná zmes Stod + Íl B1 .....	40
9.2.1.5 Fluidný elektrárenský popolček Ledvice .....	41

9.2.1.5.1	Vlastnosti .....	42
9.2.1.6	Prach z brúsenia tehál Týn nad Vltavou .....	43
9.2.1.7	prach z brúsenia tehál Šlapanice.....	46
9.2.1.8	Vyhodnotenie granulometrie .....	48
9.2.2	Príprava vzoriek .....	50
9.2.3	Postup prác .....	51
9.3	Vykonávané skúšky.....	52
9.3.1	Stanovenie Bigotovej krivky .....	52
9.3.2	Kontrakčne dilatačne termická analýza (DKTA) .....	53
9.3.3	Stanovenie dĺžkovej zmeny .....	54
9.3.4	Strata hmotnosti pálením .....	54
9.3.5	Nasiakavosť pri atmosférickom tlaku.....	55
9.3.6	Nasiakavosť vákuovou metódou .....	55
9.3.7	Objemová hmotnosť.....	55
9.3.8	Zdanlivá pórovitosť .....	56
9.3.9	Zdanlivá hustota .....	56
9.3.10	Stanovenie presiakavosti .....	57
9.3.11	Stanovenie vzliňavosti.....	58
9.3.12	Stanovenie mrazuvzdornosti .....	58
9.3.13	Stanovenie pevnosti v ohybu .....	59
9.3.14	Stanovenie KTR jadra a črepu .....	59
9.3.15	Metóda vysokotlakovej ortuťovej porozimetrie .....	60
<b>10</b>	<b>Vyhodnotenie .....</b>	<b>61</b>
10.1	Vlastnosti pri sušení .....	61
10.1.1	Vyhodnotenie I. etapy.....	61
10.1.2	Porovnanie vlastností z I. etapy so vzorkami z II. etapy .....	62
10.1.3	Vyhodnotenie II. etapy.....	64
10.2	Dížkové zmeny pálením.....	67
10.2.1	Vyhodnotenie I. etapy.....	67
10.2.2	Vyhodnotenie II. etapy.....	69
10.3	Porovnanie vlastností črepu po výpale .....	73
10.3.1	Vyhodnotenie I. etapy.....	73
10.3.2	Vyhodnotenie II. etapy.....	76
10.4	Presiakavosť.....	80
10.4.1	Vyhodnotenie I. etapy.....	80
10.4.2	Vyhodnotenie II. Etapy .....	83
10.5	Pôsobenie zmrazovacích cyklov.....	88

<b>11</b>	<b>Zhrnutie výsledkov .....</b>	<b>89</b>
<b>12</b>	<b>Záver .....</b>	<b>91</b>
<b>13</b>	<b>Zoznam použitých zdrojov.....</b>	<b>93</b>
<b>14</b>	<b>Zoznam použitých obrázkov.....</b>	<b>97</b>
<b>15</b>	<b>Zoznam tabuliek .....</b>	<b>100</b>

## Úvod

Pri výpale strešných tašiek môže nastať jav, kedy taška z vizuálneho pohľadu povrchu vyzerá v úplnom poriadku, ale po rozrezaní krytiny na polovicu dochádza k zneisteniu, pretože taška obsahuje sivo až čierne sfarbené jadro, ktoré ju odlišuje od červenej farby okraja. V tomto prípade vzniká dojem, že výroba danej krytiny neprebehla v poriadku. Vizuálna kontrola nám napovedá, že krytina je nerovnomerne vypálená a vyznačuje sa tzv. redukčným jadrom. Otázkou je ako redukčné jadro ovplyvňuje vlastnosti črepu, a akými spôsobmi sa dá úspešne eliminovať jeho vznik.

Teoretická časť by mala obsahovať rešerš zatiaľ publikovaných poznatkov v oblasti redukčného jadra, jeho vplyve na vlastnosti črepu a podmienky pre jeho úspešnú elimináciu.

V nadväznosti na predošlý výskum je cieľom experimentálnej práce porovnať dve rôzne výrobné zmesi používané v ČR (vápenatý a nevápenatý typ) a ich schopnosť vytvárať redukčné jadro. Vápenatý typ pri dostatočnom množstve jemných zrn je schopný pri určitých podmienkach vytvárať redukčné jadro. Vzniká otázka aká je analógia pri nevápenatom type výrobnej zmesi.

S dnešnou modernou dobou je spojená dôležitá otázka ochrany životného prostredia. Kladie sa dôraz na využívanie vedľajších energetických produktov a odpadov. Táto práca sa sústreďuje na využitie fluidného popolčeka a prachu z murovacích prvkov (vápenatého a nevápenatého) ako prímies do výrobnej zmesi. Vzniká snaha nájsť pozitívne ovplyvnenie vlastností vo vypálenom črepe a možnosť eliminácie redukčného jadra.

# I. Teoretická časť

## 1 Popis čierneho jadra

Bežne sa do plastických ílov pridávajú ako prímies organické látky napríklad drevné piliny, celulózové kaly, hnedouhoľné a čiernouhoľné prachy. Tieto organické látky pôsobia na vyľahčenie keramického črepu, čo odzrkadľuje [5] [3]:

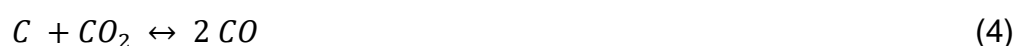
- zníženie objemovej hmotnosti
- zníženie tepelnej vodivosti
- zníženie citlivosti pri sušení
- zamedzenie tvorby nevhodnej textúry pri vytlačaní z pásmového lisu
- zníženie spotreby fosílnych palív
- zníženie spotreby hlavnej tehliarskej suroviny

K nevýhodám organických látok v keramických plastických íloch patrí pokles pevnostných charakteristík a problémy pri rezaní pásma. Pri neúplnom vyhorevaní organických látok počas výpalu môže vznikáť čierne jadro [3] [21].

V tunelovej peci dochádza už pri 200 °C k úniku prvých prchavých plynov. Ďalším zvyšovaním teploty dochádza k vyhoreniu plynov v atmosfére. Uhlík ostáva v črepe a rýchlosť jeho vyhorevania závisí podľa Lacha [4] na nasledujúcich faktoroch:

- hrúbke a permeabilite črepu
- prístupe kyslíka difúzne distribuovaného do vnútra črepu
- druhu vyhorevajúcej organickej látky, jej koncentrácii a čase potrebnom na vyhorenie
- chemickom zložení tehliarskej suroviny, konkrétne na obsahu  $Fe_2O_3$  a uhličitanov

Spaľovanie uhlíku je sprevádzané radou čiastkových reakcií. Priebeh vyhorevania organických látok popisujú nasledujúce reakcie [3]:



Prvé tri reakcie prebiehajú za dostatočného prísunu kyslíka do vnútra črepu a odvádzania oxidov uhlíka na povrch črepu teda v pri oxidačnom prostredí. Kyslík sa do črepu dostáva pomocou difúzie. Difúzne horenie, ktoré popisuje presun kyslíka do vnútra črepu pomocou difúzie, nastáva vo voľnom prostredí až pri teplote 1000 °C. Tehliarsky črep však pôsobí ako katalyzátor a to spôsobuje difúzne horenie už pri teplote 300 - 400 °C [1] [3] [21].

V prípade, že vo vnútri črepu vzniká prebytok uhlíka nastáva reakcia (4) tzv. Bondouardova vratná reakcia. Jej využitie je hlavne pri vyhorievaní organických látok zalisovaných v tehliarskom črepe. Vzniká CO a difunduje z oblasti vyšších teplôt do oblastí nižších teplôt, čiže do vnútra črepu. Vo vnútri črepu dochádza k spätnému rozkladu podľa reakcie [1] [2] [3]:



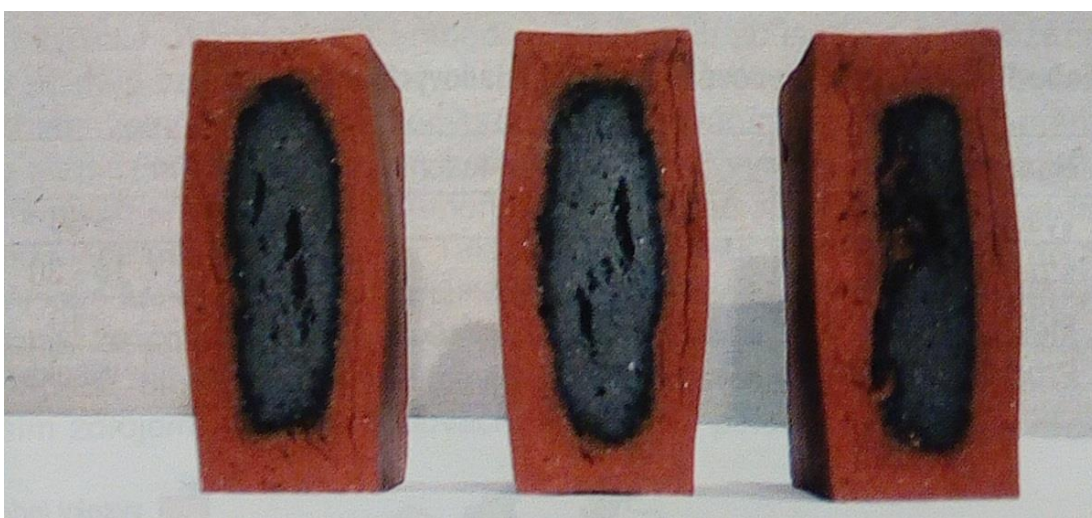
CO<sub>2</sub> zase difunduje v opačnom smere z oblasti nižších teplôt do oblastí vyšších a reaguje s uhlíkom podľa reakcie (4). Tento proces popisuje prenos uhlíka do vnútra črepu. Zvyšuje sa koncentrácia uhlíka a spôsobuje čierne zafarbenie. Bondouardova reakcia dosahuje rovnováhu pri teplote 687 °C. Pri tejto teplote existujú vedľa seba CO a CO<sub>2</sub> v objemovom pomere 1:1. CO<sub>2</sub> skoro mizne pri teplote vyššej ako 800 °C. Proces spomaľuje priebeh vyhorievania uhlíka, pretože sa uhlík hromadí v strede črepu. Zostatkový uhlík sa dlhším pôsobením vyšších teplôt stáva menej aktívnym a ustáľuje sa rovnováha grafitického uhlíku. Nastáva prechod zo stavu amorfného do stavu kryštalického. Uhlík v kryštalickom stave sa obťažne spaľuje a zotrúva aj pri vysokých teplotách [1] [3] [21].

Štúdia [13] však poukazuje na to, že množstvo uhlíka vo vnútri črepu je v rovnakom množstve ako v povrchovej vrstve, tým pádom nie je prvotnou príčinou vzniku čierneho jadra. Každopádne redukuje oxidy železa, čím zvyšuje účinok redukčného jadra.

## 2 Popis redukčného jadra

Problematika redukčného jadra sa rieši predovšetkým pri výpale pálenej strešnej krytiny. Surovina pre výrobu pálenej krytiny sa totiž častokrát melie na vysokú jemnosť zrna. K tomuto mletiu dochádza hlavne kvôli vápnitej zemine, ktorá môže vytvárať cicváry (vápnité zhľuky častíc). Veľké množstvo jemných

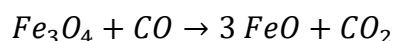
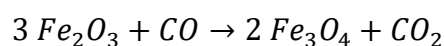
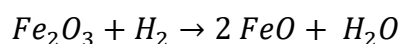
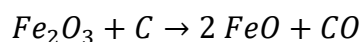
zrn v surovine za prítomnosti tavív môže počas výpalu vytvoriť spomínané redukčné jadro. Tavivá spôsobujú rýchlejšie slinutie črepu, predovšetkým povrchovej vrstvy. Slinutie povrchovej vrstvy znižuje pórovitosť a začína brániť prístupu kyslíka do vnútra črepu, pretože kyslík sa do keramického črepu dostáva pomocou difúzie. Spomenuté pochody spôsobujú nerovnakú oxidáciu oxidov železa, nachádzajúcich sa v črepe. Rôznorodá oxidácia v priereze črepu spôsobuje farebné zmeny od červenohnedej, cez čiernu až po sivú. Počas výpalu dochádza takisto k rozkladu uhličitanov. Plyny vznikajúce z ich rozkladu môžu spôsobiť nafúknutie črepu, pozri obrázok 1 [21] [8] [9].



Obrázok 1: Pričný rez nafúknutého črepu s redukčným jadrom [8]

### 3 Chémia vzniku čierneho a redukčného jadra

Najdôležitejšiu úlohu hrá obsah zlúčenín železa a karbonátov. Problematiku vysvetľujú reakcie oxidov železa so splodinami horenia, ktoré môžu v priebehu výpalu nastať [7]:



Pri vzniku redukčného jadra sa hovorí o rovnakej analógii, ale redukcie oxidov železa sú zapríčinené nedostatkom kyslíka pre udržanie stability [13].

Reakcie pri výpale ovplyvňujú aj zlúčeniny železa:



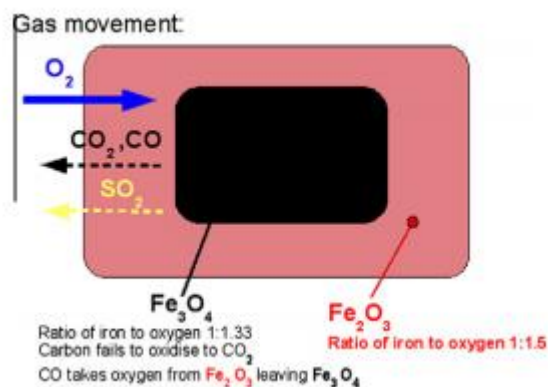
Dvojmocná forma ako FeO spolu s ďalšími oxidmi umožňuje vznik nízkotaviteľných eutektík už od teploty 650 – 700 °C. Dochádza k silnému obohacovaniu taveninou, hlavne pri maximálnej vypaľovacej teplote. Za prítomnosti nevyhoretého uhlíku vytvára tavenina čierne jadro sklovitého charakteru, v ktorom je rozptýlený uhlík. Ďalší negatívny dopad nevyhoretého uhlíku je, že vplyvom taveniny dochádza k uzavretiu povrchu črepu, môžu potom nastať v črepe rozkladné reakcie. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uvoľňuje kyslík a dochádza k oxidácii uhlíka. Tlak a objem týchto plynov sa niekoľkonásobne zväčšuje a spôsobuje nafúknutie. Tento dej poukazuje na nutnosť oxidácie uhličítých látok v črepe, aby sa nad teplotou 700 °C, max 800 °C už v črepe nevyskytovali [21] [7].

Pri neprítomnosti organických látok dochádza k uvoľňovaniu kyslíka z Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ak surovina obsahuje veľký podiel jemných zŕn. Pôsobením vysokej teploty a určitého množstva tavníc sa zníži pórovitosť povrchu. Do vnútra črepu sa nedostane dostatok kyslíka a vzniká redukčná premena hematitu (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Vznik magnetitu sa dá eliminovať pomalším nábehom teploty počas výpalu. Nasledujúca analógia odzrkadľuje vznik redukčného jadra [21] [13].

Oxid uhličitý sa v črepe objavuje aj bez spaľovania uhlíku prostredníctvom disociácie karbonátov. Oxidy CaO a MgO zvyšujú teplotu tavenia a rozširujú interval slinovania črepu. Vznikajú podľa rovníc [7]:







Obrázok 2: Zjednodušený diagram procesov spôsobujúcich redukčné jadro tehly. CO,  $SO_2$  a vodné pary sú plyny, ktoré vznikajú pri spaľovaní hliny [13]

## 3.1 Faktory ovplyvňujúce veľkosť redukčného jadra

### 3.1.1 Prostredie v peci

Na to aby vôbec dochádzalo k oxidácii železa musí byť v peci počas výpalu udržiavané oxidačné prostredie. Redukčné prostredie spôsobuje u zlúčenín železa pri teplotách 950 – 1000 °C reakciu za tvorby veľkého množstva taveniny a nastáva redukcia  $Fe^{3+}$  na  $Fe^{2+}$ , ktoré reagujú s  $SiO_2$ . Z daných pochodov vznikajú ľahko tavitel'né zlúčeniny a uvoľňuje sa plynná fáza  $O_2$ . [21] [1] [7].

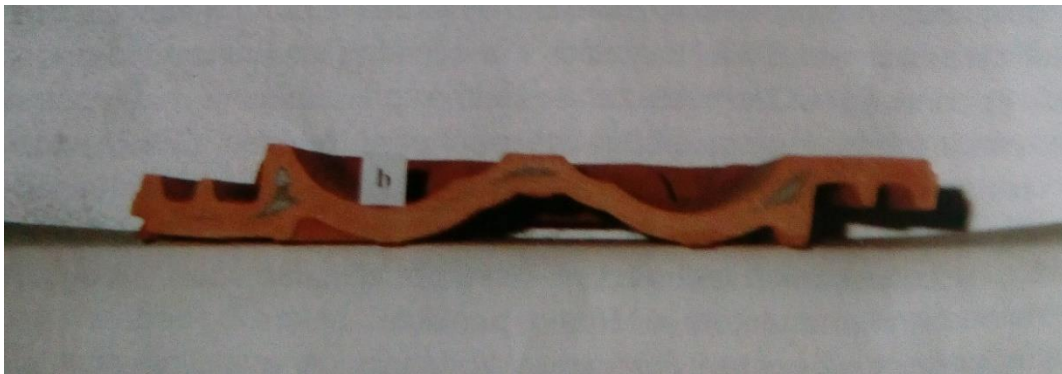
#### 3.1.1.1 Uloženie

Výskyt redukčného jadra môže ojedinele nastať aj na povrchu črepu. Táto vada môže nastať v dôsledku nevhodného uloženia výsuškov na pecnom voze. Hrúbka črepu je jeden z faktorov pre vznik redukčného jadra. Ak pri uložení budú dva výsušky blízko seba, nebude dostatočná medzera a dve telesá budú pôsobiť ako jedno s hrúbkou dvoch. Nevhodný režim výpalu potom spôsobí nedostatočnú difúziu kyslíka do vnútra tohto „dvojtelesa“ [3].

Odlíšné jadro môže vzniknúť aj keď je krytina uložená v odlišných výškach, pravdepodobne odlišným množstvom kyslíka v rôznych výškach. Obrázky 3 a 4 ukazujú rozdielne redukčné jadro v dôsledku uloženia na pecnom voze [21] [8].



Obrázok 3: Krytina uložená v hornej časti pecného voza [8] [21]



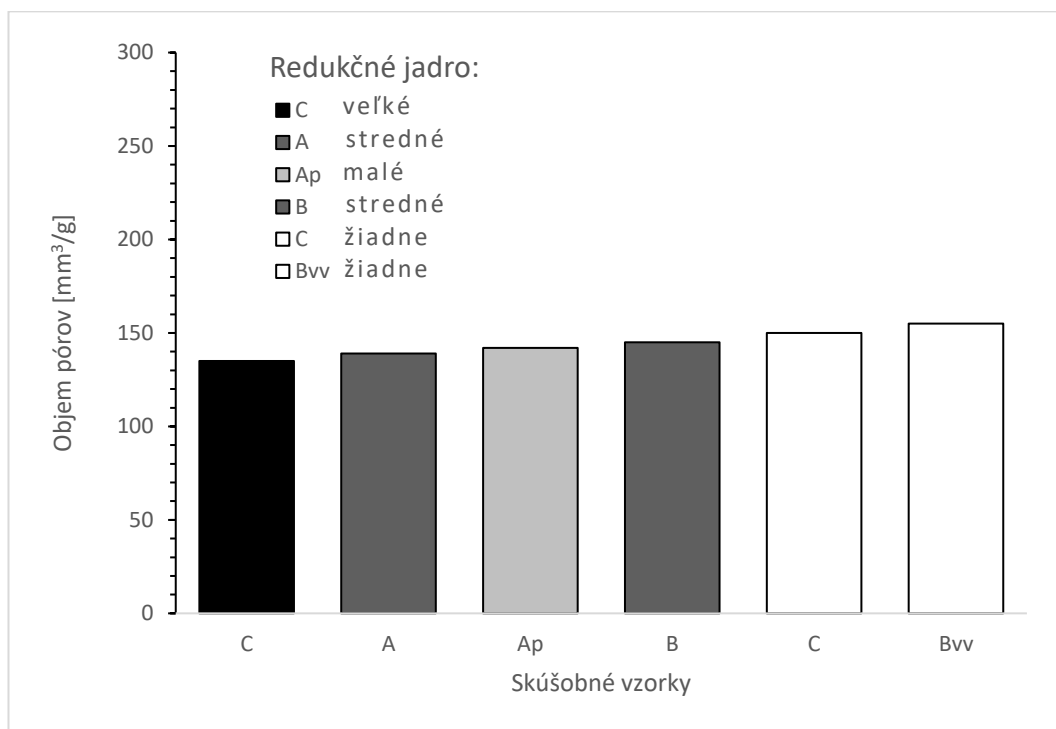
Obrázok 4: Krytina uložená v dolnej časti pecného voza [8]

### 3.1.2 Vplyv rýchlosti nábehu teploty a hrúbky črepu

Vypudzovanie  $\text{CO}_2$  alebo  $\text{O}_2$  pri redukcii  $\text{Fe}^{3+}$  musí byť dokončené pred slinovaním inak môže vzniknúť redukčné jadro a poprípade aj nafúknutie črepu. Významný faktor ovplyvňujúci veľkosť redukčného jadra je rýchlosť nábehu teploty a hrúbka črepu. Čím je hrúbka črepu väčšia a zvyšovanie teploty rýchlejšie, tým sa zväčšuje riziko vzniku redukčného jadra. Dostatočnou dobou výdrže teploty pred slinutím črepu pri oxidácii železa môžeme zabrániť vzniku redukčného jadra [21] [1].

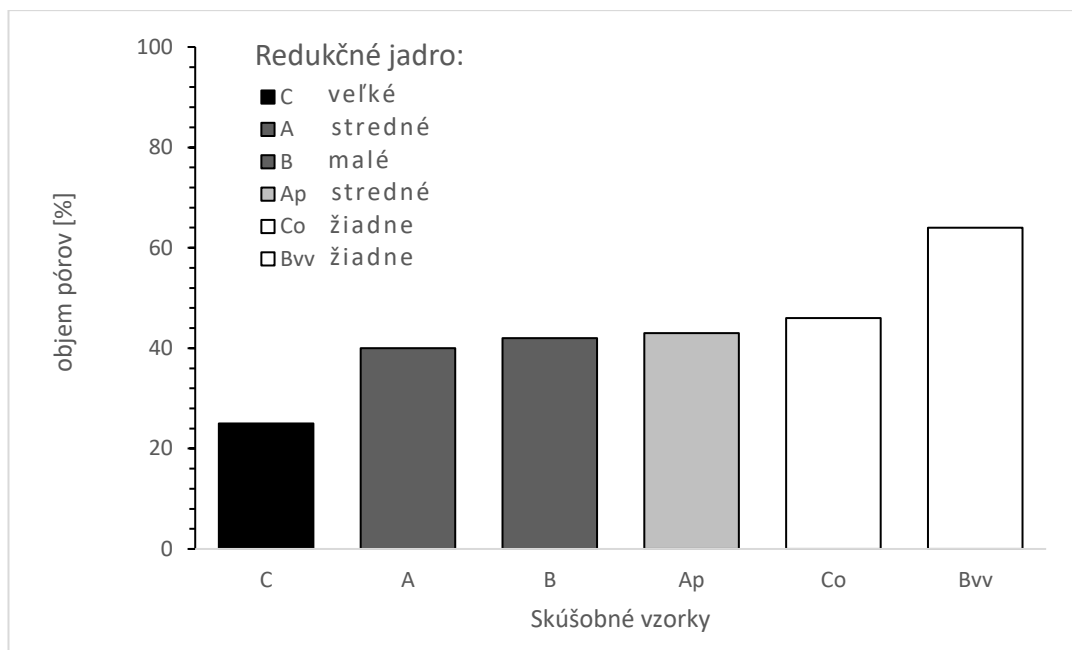
### 3.1.3 Pórovitosť

Pórovitosť keramického črepu je jeden z najdôležitejších faktorov ovplyvňujúcich vznik a veľkosť redukčného jadra. Hlavne preto, lebo poréznu štruktúrou črepu môžeme zabrániť vzniku redukčného jadra pomocou prísad a ostrív. Nie je priama korelácia medzi poréznu štruktúrou povrchovej vrstvy črepu a veľkosťou redukčného jadra. Na obrázku 5 je vyobrazený graf, ktorý dokazuje, že celkový objem pórov povrchovej vrstvy nie je primárne závislý na veľkosti redukčného jadra [21] [11].



Obrázok 5: Závislosť veľkosti redukčného jadra na celkovom objeme pórov v povrchovej vrstve črepy [11]

Podrobná analýza vzťahov medzi distribučnými krivkami pórov povrchovej vrstvy poukázala na fakt, že veľkosť redukčného jadra je primárne ovplyvnená obsahom pórov s väčším polomerom ako 335 nm. Črepy s obsahom takýchto pórov vyšším ako 46 % nevykazujú žiadne redukčné jadro. Čím je objem väčších pórov menší, tým sa veľkosť redukčného jadra zvyšuje. Sekundárnu úlohu zohráva aj celkový objem pórov. Obrázok 6 vyobrazuje graf reprezentujúci zmenu veľkosti redukčného jadra v závislosti na množstve pórov o polomere väčšom ako 335 nm [21] [11].



Obrázok 6: Závislosť veľkosti redukčného jadra od percentuálneho podielu pórov o dĺžke polomeru väčšom ako 335 nm (v povrchovej vrstve črepu). [11]

## 4 Vplyv redukčného jadra na vlastnosti črepu

Redukčné jadro vo vypálenom črepe zvyšuje celkovú pórovitosť a znižuje objemovú hmotnosť. Prof. Šveda vykonával na prerezaných vzorkách skúšky s vyhodnotením, že nasiakavosť varom a zdanlivá pórovitosť je u črepov s redukčným jadrom väčšia, ale nie je známe, či bude platiť rovnaká korelácia pri neprerezaných vzorkách [9]. Keďže boli spomínané skúšky vykonávané na prerezaných vzorkách, voda mala lepší prístup k redukčnému jadru. Pre ozrejmienie, či sa dosiahnu rovnaké výsledky aj pri neprerezaných vzorkách budú v praktickej časti vykonajú spomenuté skúšky [21].

Črepy s výrazným redukčným jadrom vykazujú väčšie množstvo pórov. Pórovitosť sa hromadí hlavne v oblasti redukčného jadra. S redukčným jadrom sa zväčšuje aj nasiakavosť varom. Výsledky boli potvrdené aj ortuťovou tlakovou porozimetriou stanovením objemu pórov samotného redukčného jadra a povrchovej vrstvy [21] [9].

Výskyt redukčného jadra je problémom hlavne u pálených strešných tašiek. Pri spomenutých taškách je najdôležitejším faktorom opotrebovania mrazuvzdornosť a presiakavosť črepu. K presiakavosti strešnej krytiny s redukčným jadrom sa nevyjadruje žiadna známa publikácia, a preto sa

v praktickej časti pokúsime ozrejmiť vplyv redukčného jadra na presiakavosť črepu. Vplyv redukčného jadra na mrazuvzdornosť črepu je popísaný kapitole 4.1.

## **4.1 Vplyv na mrazuvzdornosť**

Zmrazovanie a rozmrazovanie prebieha na rozmerovo jednotných vzorkách. Porovnávanie mrazuvzdornosti prebieha pri podrobovaní vzoriek zmrazovacím cyklom. Výskyt prvej trhliny, odlúpnutie alebo iné poškodenie sa zaznamenáva a určí sa počet cyklov, po ktorých došlo k porušeniu keramického črepu [21] [10].

Mrazuvzdornosť tehliarskeho črepu ovplyvňuje porézna štruktúra a to nie len objem pórov ale aj medián polomeru pórov. Merania pórovej štruktúry redukčného jadra a obalovej vrstvy ukázali, že rozdiel medzi objemom a mediánom polomeru pórov sa zväčšuje s vypaľovacou teplotou [21] [10].

Autori Seaverson a Brosman zistili, že zmenou pórovej štruktúry sa dosiahnu rôzne reziduálne expanzie nasiaknutého črepu po jeho zmrazovacích cykloch. Ak máme dva vodou nasiaknuté keramické črepy s rôznou poréznu štruktúrou, môžeme očakávať rôzne objemové zmeny pri zmrazovacích a rozmrazovacích cykloch. Tento jav by mal odzrkadľovať aj vypálený keramický črep s redukčným jadrom [21] [10].

Autori Berthold a Thiede zistili, že pálená krytina s redukčným jadrom nevyhovela na mrazuvzdornosť podľa normy DIN 52 253, časť 2. Pálená krytina bez vyvinutého redukčného jadra na mrazuvzdornosť vyhovela. Zníženie mrazuvzdornosti je zapríčinené rozdielnym stupňom slinutia, rozdielnym koeficientom dĺžkovej rozťažnosti a rozdielnou nasiakavosťou medzi jadrom a povrchovou vrstvou pálenej krytiny [21] [10].

Autori sa vyjadrujú, že v pálenej krytine vzniká pri zmrazovaní a rozmrazovaní vplyvom rôznej dĺžkovej rozťažnosti napätie medzi jadrom a povrchovou vrstvou krytiny. Táto skutočnosť poukazuje na vznik reziduálnej expanzie medzi jadrom a povrchovou vrstvou črepu v procese zmrazovania a rozmrazovania. Trhlina vzniká v časti keramického črepu, ktorá je viac slinutá [21] [10].

Výskum mrazuvzdornosti na Stavebnej fakulte v Bratislave porovnával črepy s vyvinutým redukčným jadrom a bez neho.

Tabuľka 1: Výskyt prvej trhliny pri skúške mrazuvzdornosti [10]

Teplota výpalu [°C]	Tvar skúšobnej vzorky	počet zmrazovacích cyklov na vzorke s redukčným jadrom	počet zmrazovacích cyklov na vzorke bez redukčného jadra
900	prerezaná	20	60
	celá	120	200
1000	prerezaná	80	110
	celá	200	250
1060	prerezaná	170	>300
	celá	>300	>300

Tabuľka 1 poukazuje na fakt, že mrazuvzdornosť črepu ovplyvňuje predovšetkým prítomnosť redukčného jadra, celistvosť a výška vypaľovacej teploty. Prerezané vzorky vykazujú nižšiu mrazuvzdornosť aj pri vzorkách bez redukčného jadra. Táto skutočnosť poukazuje na fakt, že na povrchu vznikla tzv. ochranná povrchová fólia, ktorej porušením dochádza k zníženiu mrazuvzdornosti. Prerezané vzorky s redukčným jadrom sa vyznačujú najrýchlejším vznikom trhliny pri pôsobení zmrazovacích rozmrazovacích cyklov. Trhliny v pálenej krytine s redukčným jadrom sa vyskytujú len v povrchovej vrstve. Sú viditeľné blízko rozhrania redukčného jadra a povrchovej vrstvy. Trhliny prechádzajú rovnobežne s dlhšou stranou skúšobných vzoriek [10], pozri obrázok 7.



Obrázok 7: Detail lomovej plochy pálenej krytiny s redukčným jadrom v jeho okrajovej oblasti [10]

## 5 Spôsoby eliminácie redukčného jadra

Redukčné jadro je možné odstrániť dvoma spôsobmi. Prvým je zníženie rýchlosti nábehu teploty počas výpalu. Tento spôsob je experimentálne overovaný v praktickej časti. Druhým spôsobom je eliminácia využitím prísady, ktorá spôsobí zvýšenie pórovitosti a tým pádom aj lepší prístup kyslíka do vnútra črepu [9]. V praktickej časti bola odskúšaná aj táto metóda s možným využitím prímiesí brúsnych prachov a fluidného popolčeka.

### 5.1 Eliminácia prísadou a ostrivom

Požiadavka pre aplikáciu prísad vzniká hlavne z ekonomického hľadiska. Spomalenie procesu výpalu totiž predlžuje dobu výpalu a s tým spojenú obratnosť foriem, produktivitu a zvyšuje energetickú náročnosť. Aplikácia prísady umožňuje elimináciu redukčného jadra a pritom zachováva rovnakú rýchlosť nábehu teploty (v tejto práci často spomínané aj ako rýchlosť výpalu). Aplikácia prísady zvyšuje difúziu plynov medzi jadrom a povrchom črepu, čo sa uskutočňuje zvýšením pórovitosti a objemu pórov. Podľa štúdií Prof. Švedu je možné tento efekt docieľiť využitím chemickej prísady Vuppor alebo Vuptav. Tieto prísady pôsobia v tehliarskom črepe zvýšením objemu a mediánu polomeru pórov. Súčasne zlepšujú vzájomné prepojenie pórov [9].

Druhý spôsob je využitie ostriva, ktoré vytvára pomocou sietí mikrotrhlín lepší prístup kyslíka medzi povrchom a jadrom [14].

### 5.1.1 Využitie chemických prísad

Prísada Vuppor je priemyselne vyrábaný výrobok. Táto príroda je biela inaktívna emulzia na báze aldehydových kondenzátov, ktorá neobsahuje zlúčeniny obsahujúce síru alebo anorganické nečistoty. Počas procesu horenia sú emitované iba oxidy uhlíka, dusíka a vodnej pary. Vuppor je organický materiál s veľmi úzkym teplotným rozsahom horenia okolo 400 °C. Spaľovanie 1 kg sušiny produkuje asi 0,502 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, čo je menej ako pri spaľovaní pilín (0,932 m<sup>3</sup>), celulózy (0,875 m<sup>3</sup>) a uhlia (1,307 m<sup>3</sup>). Prísada Vuppor má obsah sušiny 37 – 40 % hmotn. a hustotu 1100 - 1140 kg/m<sup>3</sup>. Je rozpustná vo vode a spĺňa všetky hygienické požiadavky. Na tento účel sa celková sušina doplnkovej látky určuje gravimetricky podľa množstva zvyšku, ktorý zostane po vysušení. Prísadu je možné využiť aj ako náhradu organických prímiesí na vylahčenie tehál [21] [20] [9].

Prítomnosť tejto prísady vedie k zvýšeniu povrchového napätia vo vode obsiahnutej v tehliarskej zemine, čo významne znižuje jej plasticitu. Na dosiahnutie pôvodnej hodnoty plasticity je potrebné zvýšiť množstvo pridanej vody. (Poznámka - Hodnota plasticity sa v každom závode líši a závisí od zloženia tehlovej suroviny a výrobnéj technológie). Táto príroda umožňuje zvýšiť vlhkosť cesta pri zachovaní konštantnej plasticity. Je hygienicky nezávadná a v procese pálenia a sušenia nevznikajú škodlivé produkty. Táto voda spôsobujúca zvýšenie vlhkosti sa počas procesu sušenia odparí, tým pádom nastane vyššia pórovitosť vo vysušenom aj vypálenom črepe. [20] [9]

Pomocou tejto prísady sa zlepší difúzia plynov medzi jadrom a povrchom črepu, to zlepší vzájomné prepojenie pórov a zvýši medián polomeru pórov. Výsledky s využitím Vupporu, ktorý umožňuje zvýšiť nie len pracovnú vlhkosť pri jej konštantnej plasticite sú zobrazené v tabuľke 2. Obrázok 8 zase dokazuje, že črep bez redukčného jadra je možné získať už pri dávke 0,3 % Vupporu na tehliarsku surovinu. Prítomnosť prísady Vuppor vo vypálenom ílovom telese zvyšuje podiel pórov, najmä s veľkosťou v rozmedzí 0,1 až 5 μm, čo má pozitívny vplyv na zníženie jeho tepelnej



vodivosti pri aplikácii tehlovej suroviny s vysokým podielom uhličitanov [20] [9] [21].

Tabuľka 2: Vplyv prísady Vuppor na vybrané fyzikálne vlastnosti pri plasticite podľa Pfefferkorna = 36 mm [9]

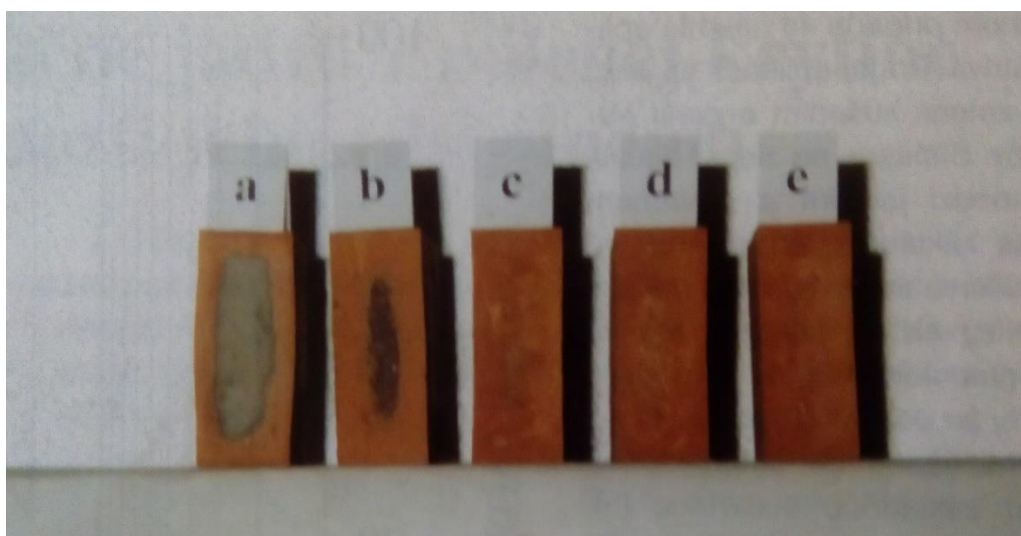
Vlastnosti	Dávka prísady Vuppor [%]				
	0	0,2	0,3	0,4	0,6
Pracovná vlhkosť [%]	21,50	23,30	23,72	24,09	24,90
Dĺžková zmena sušením [%]	-5,07	-5,76	-5,93	-6,02	-6,12
Dĺžková zmena pálením [%]	-1,10	-1,20	-1,36	-1,45	-1,56
Strata hmotnosti pálením [%]	8,62	8,65	8,66	8,67	8,80
Nasiakavosť varom [%]	11,99	10,39	10,99	11,92	13,15
Zdanlivá pórovitosť [%]	22,60	20,19	21,36	22,86	24,71
Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	1885	1943	1943	1918	1879

Tabuľka 3: Ďalšie chemické prísady s odporúčaným dávkovaním vyskúšané pre elimináciu redukčného jadra [11]

Označenie	Názov	Dávkovanie [% hmot.]	poznámky
vl	Vupsal	0,5*	komerčný výrobok, vodný roztok, VUP a. s. Prievidza
vv	Vuptav**	0,5*	priemyselná druhotná surovina, vodný roztok, VUP a. s. Prievidza

\*Dávkovanie v % hmotnosti sušiny roztoku na hmotnosť základnej suroviny.

\*\*Vedľajší produkt vznikajúci pri redukcii trifenyfosfínu na trifenyfosfín.



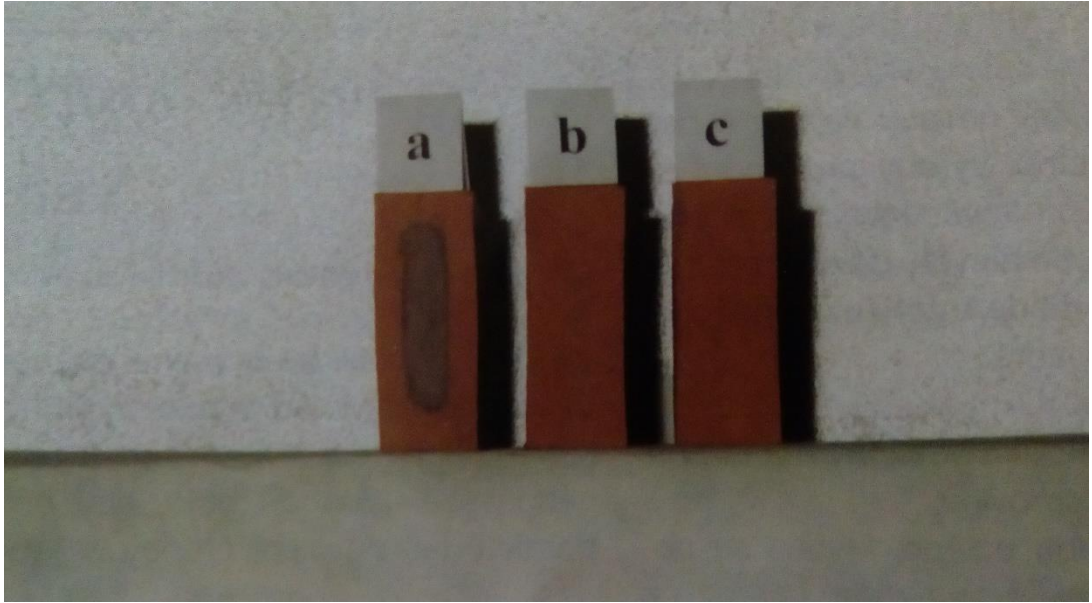
Obrázok 8: Skúšobné vzorky po vypálení pri konštantnej vypaľovacej teplote 960 °C. Dávka prísady Vuppor: a – 0 %, b – 0,2 %, c – 0,3 %, d – 0,4 %, e – 0,6 % [9]

## 5.1.2 Využitie ostriva

Druhá možnosť na zlepšenie difúzie plynov medzi jadrom a povrchom črepu je aplikácia ostriva. Ostrivom môže byť pomletý výmet z vlastnej alebo inej výroby, potom kremičitý piesok. Na výrobu vlastného výmetu je potrebné využiť výrobky, ktoré obsahovali veľmi málo alebo žiadne redukčné jadro. Použité ostrivo musí byť hrubšej granulometrie ako tehliarska surovina. Je to spôsobené tým, že sa ostrivo počas sušenia nezúčastňuje zmrašťovania do takej miery ako základná surovina. Aplikáciou takého ostriva sa zníži dĺžková zmena sušením a vytvorí sa sieť mikrotrhlín, čo zlepší prístup kyslíka do vnútra črepu. Tabuľka 4 popisuje zmenu vlastností pri použití rôzneho množstva pomletého výmetu z vlastnej výroby. Už 5 % pomletého výmetu z vlastnej výroby, počas výskumu Prof. Švedu, zabránilo vzniku redukčného jadra, pozri obrázok 9 [21] [9].

Tabuľka 4: Vplyv pomletých črepov z vlastného výmetu na vybrané fyzikálne vlastnosti pri plasticite podľa Pfefferkorna = 32 mm. [9]

Vlastnosti	Dávka črepov z vlastného výmetu [%]		
	0	5	10
Pracovná vlhkosť [%]	24,50	23,25	23,06
Dĺžková zmena sušením [%]	-6,25	-6,01	-5,40
Dĺžková zmena pálením [%]	-1,12	-1,18	-1,22
Strata hmotnosti pálením [%]	8,70	8,21	7,82
Nasiakavosť varom [%]	10,02	10,74	12,82
Zdanlivá pórovitosť [%]	19,24	20,73	23,83
Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	1920	1930	1908



Obrázok 9: Skúšobné vzorky po vypálení pri konštantnej vypaľovacej teplote 960 °C. Dávka pomletých črepov: a – 0 %, b – 5 %, c – 10 % [9]

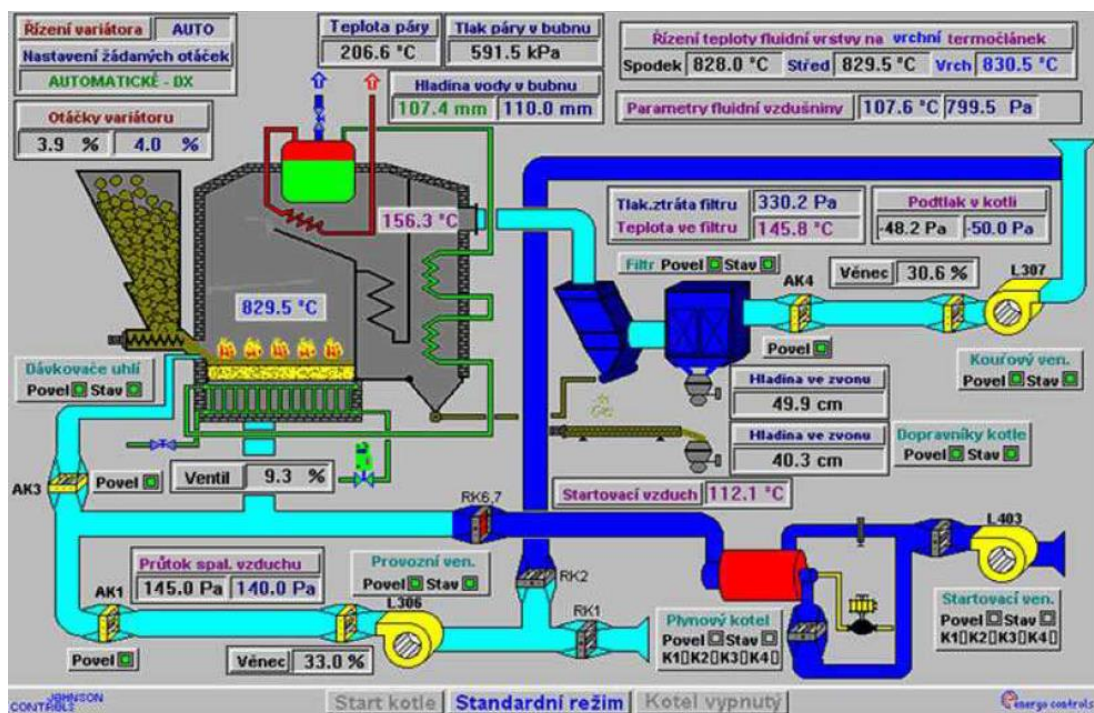
Tabuľka 5: ďalšie možné ostrivá s odporúčaným dávkovaním pre elimináciu redukčného jadra [11]

Označenie	Názov	Dávkovanie [% hmot.]	poznámky
p	piesčitý prach	5	povodie rieky Moravy, lokalita Kostolište
o	zeolitové odprašky	15	priemyselná druhotná surovina, ZEOCEM, a. s. Bystré

## 6 Charakteristika fluidného popolčeka

Spaľovaním jemne mletého paliva (pri veľkosti častíc uhlia od 150  $\mu\text{m}$  do 3 mm) vzniká fluidný popolček spoločne s vápencom alebo dolomitom.

Účinnosť spaľovania dosahuje hodnotu až 91 % a nízka teplota potlačuje tvorbu dusíku. Spaľovanie prebieha pri teplotách približne 750 – 850  $^{\circ}\text{C}$  a tlaku 0,1 – 2,0 MPa. Priamo v ohnisku sa viaže vznikajúci oxid siričitý s pridávaným vápencom [22].



Obrázok 10: Schéma fluidného spaľovania [24][22]

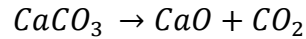
Spaľovaciu komoru fluidného ohniska tvorí vertikálny valec, pod ktorým je otvorený vŕňaný vzduch pričom jeho spodná vrstva je vyplnená nejakým inertným materiálom, často používaný piesok. V ohnisku sa udržiava fluidná vrstva a je tvorená zmesami popola, uhlia, spalín a vzduchu [25]. Fluidná vrstva lepšie roznáša teplo a tým znižuje teplotu v ohnisku. Veľké množstvo popola je vo vrstve zaistené odlučovaním popola v cyklóne a jeho spätnom chode cez sifón do ohniska. Popol z vrstvy sa odpúšťa prepádovými trúbkami nad roštom zo sifónu atď. Vo vrstve nesmie dochádzať k spekaniu popola na škvaru [22].

Nevýhodou fluidného spaľovania je že vzniknutý anhydrit nie je možné oddeliť od fluidného popolčeka a ďalej využiť pre stavebníctvo. Vápenec sa musí dávkovať v prebytku a jeho spotreba je väčšia než u metód založených

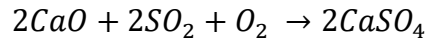
na mokrej vypierke [26]. Fluidné kotle sa uplatňujú predovšetkým v menších elektrárnach, kde nie je ekonomicky výhodné vybudovať odsírovacie zariadenie [25] [22].

Proces vzniku pri fluidnom spaľovaní prebieha podľa rovníc:

1. fáza – rozklad vápenca:



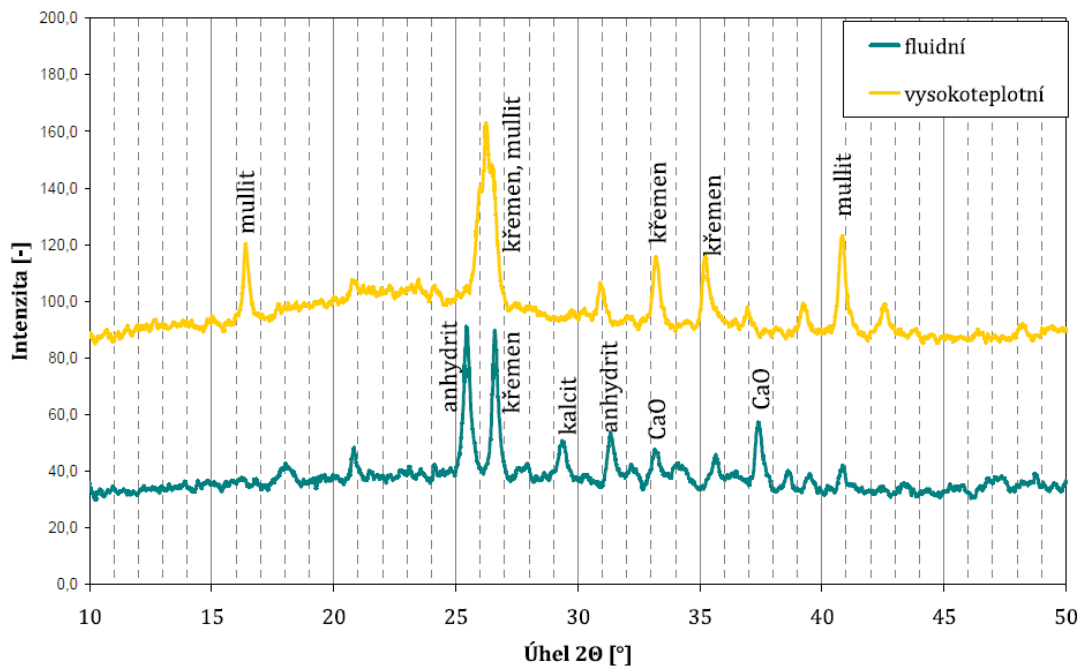
2. fáza – oxid vápenatý sa viaže na oxid siričitý za vzniku anhydritu:



Mineralogické zloženie fluidného popolčeka je značne rozdielne od vysokoteplotného. Fluidné popolčeky obsahujú viac vápnika obsiahnutého v anhydrite, portlandite, sádrovcí, kalcite a vo forme voľného oxidu vápenatého.

V menšej miere môže byť obsiahnutý kremeň, metakaolinit, ettringit, hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [26] [22].

Vysokoteplotný popolček sa vyznačuje predovšetkým obsahom mullitu, kremeňa, v menšom množstve cristobalitu a sklenej fáze. Prítomnosť sklenej fázy sa prejavuje typickým oblúkovitým priebehom RTG [22].



Obrázok 11: Porovnanie mineralogického zloženia vysokoteplotného a fluidného popolčeka [22]

Obsah anhydritu a voľného oxidu vápenatého spôsobuje, že po rozmiešaní s vodou popolček tvrdne a tuhne, čiže vykazuje hydraulické vlastnosti [22].

Chemické a minerálne zloženie nových fáz závisí na štyroch faktoroch fluidného spaľovania [26] [22]:

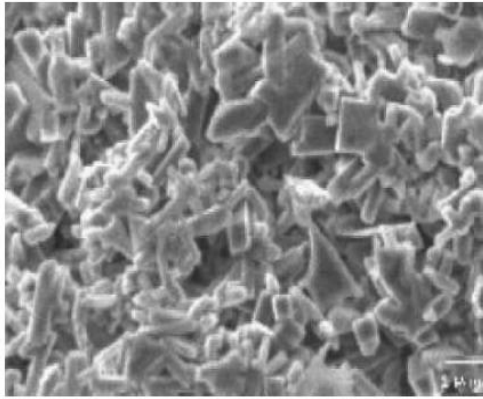
- množstvo, zloženie a zrnitosť použitého aditíva
- obsah ílových minerálov v uhlí
- množstvo sulfidov železa
- dostatočné množstvo látok, ktoré budú reagovať s uvoľnenými oxidmi

## 6.1 Pozorovanie v keramike

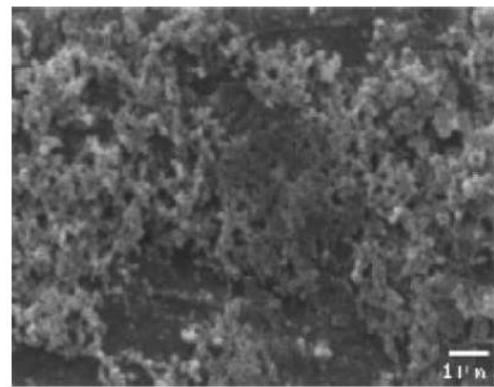
Štúdia [27] sa zaoberá skúmaním mikroštruktúry popolčekového granulátu, ktorý bol pripravený keramickou technológiou. Porovnávané boli 4 elektrárenské popolčky, z toho jeden bol fluidný. Popolčky sa získavali z rôznych tureckých elektrární [22].

Popolček bol zvlhčený a následne lisovaný tlakom 40 MPa. Vzorky boli pred výpalom predhriate na 300 °C a potom vypálené do požadovanej teploty. Na slinovací proces má zásadný vplyv množstvo  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Najnižšiu teplotu slinutia má fluidný popolček (Afsin-Elbistan), kvôli nízkemu obsahu  $\text{SiO}_2$  k ostatným prítomným oxidom. Pritom zvýšením teploty nad teplotu slinutia môže skoro dôjsť k taveniu [22].

Na snímke z elektrónového mikroskopu (obrázok 12 a 13) je vidno kryštalickú štruktúru vysokoteplotného popolčeka (Can). Prizmatické zrna mullitu sú vnorené do jemnozrnného matrixu. Snímka vpravo ukazuje pórovitú štruktúru vzorky z fluidného popolčeka Afsin-Elbistan. Tieto póry vznikajú kvôli úniku plynu pri rozklade anhydritu [22].



Obrázok 12: Mikroštruktúra vysokoteplotného popolčeka Can [27]



Obrázok 13: Mikroštruktúra fluidného popolčeka Afsin Elbistan [27]

Z výskumu v Turecku vyplynulo, že vzorka na báze fluidného popolčeka dosahuje najväčšiu pórovitosť a najnižšiu pevnosť zo skúmaných popolčeka [27].

## 7 Charakteristika prachu z brúsenia tehál

Pri výrobe murovacích prvkov tehliarskou technológiou dochádza po výpale k brúseniu povrchu. Tehliarske výrobky sú prevezené dopravníkom do brusiarne. Brúsenie je dôležitým technologickým procesom hlavne kvôli normalizácii pre stavebný priemysel. Každý murovací prvok prechádza pomerne zdĺhavým procesom brúsenia. Brúsky majú dva brusné kotúče, medzi ktorými sa nachádzajú murovacie prvky. Kotúče majú priemer 1 m. Vybrúsenie je o 6 mm v prostriedku a 12 mm na krajoch pre tehelňu v Šlapaniciach. Prach sa odsáva filtráciou [28] [23].

So zvyšovaním požiadaviek na rozmerovú presnosť murovacích prvkov sa zvyšuje produkcia prachu pri takto kalibrovaných výrobkoch. Odpad tvorí jemný prach [29] [23].

### 7.1 Využitie v stavebníctve

Výsledky štúdie [31] ukázali, že tehlový prach je možné využiť na prípravu geopolymérov s dosiahnutím veľmi sľubných vlastností. Zisťovali sa vlastnosti pri aktivácii prachu z brúsenia tehál HELUZ family. Aktivácia tehlového prachu bola uskutočnená pomocou vodného skla. V tomto výskume boli vyrobené geopolymery dosahujúce pevnosti v tlaku 60 MPa a pevnosti v ťahu pri ohybe 12 MPa.

Geopolymerácia je reakcia aluminosilikátového materiálu s alkalickým roztokom s vysokou koncentráciou OH<sup>-</sup> iontov (pH >12). Dochádza k rozpúšťaniu amorfných aluminosilikátov a to vedie k vytvoreniu presýteného roztoku s obsahom monomerných zložiek. Zložky medzi sebou kondenzujú a vytvárajú aluminosilikátový gél a ten vedie k tvorbe aluminosilikátových zlúčením. Keďže sa jedná o aktiváciu materiálov s obsahom Si a Al, je možné využiť širokú škálu počiatočných surovín [31].



## II. Experimentálna časť

### 8 Cieľ práce

Cieľom diplomovej práce bolo posúdiť možnosti vzniku redukčného jadra pre dva rôzne druhy výrobných zmesí používaných v ČR – Tondach Česká republika. Prvý typ výrobnej zmesi bol vápenatý z Hranic a druhý typ bol nevápenatý zo Stodu. Pri vzniku redukčného jadra bolo cieľom navrhnuť úspešnú elimináciu pomocou:

- odlišnej rýchlosti nábehu teploty počas výpalu
- využitím prímiesí fluidného elektrárenského popolčeka a prachu z brúsenia tehliarskych murovacích prvkov.

Ďalej bolo cieľom porovnať vlastnosti pripravených vzoriek s rôzne vyvinutým redukčným jadrom v závislosti na rôznom type použitej prímiesi a na odlišne vedenom výpale.

### 9 Metodika riešenia

Zadaním diplomovej práce je rozšíriť poznatky ohľadom problematiky redukčného jadra. Je totiž známe, že sa redukčné jadro vyskytuje v pálenej strešnej krytine pri použití vápenatej výrobnej zmesi, ktorá sa melie na vysokú jemnosť a je vytláčaná pomocou vákuového šnekového lisu. Výroba prebieha tehliarskou technológiou. Jemnosťou mletia sa docieli odstránenie možného vzniku cicvárov. Vápenatá výrobná zmes sa vyznačuje vysokým množstvom  $\text{CaCO}_3$ .

V rámci výskumu sa porovnávali dva druhy zemín. Prvým typom bola na jemno mletá vápenatá výrobná zmes zo závodu Tondach v Hraniciach a druhým typom bola hrubozrnnejšia nevápenatá výrobná zmes zo závodu Tondach v Stode. Výskum je možné rozdeliť na dve etapy.

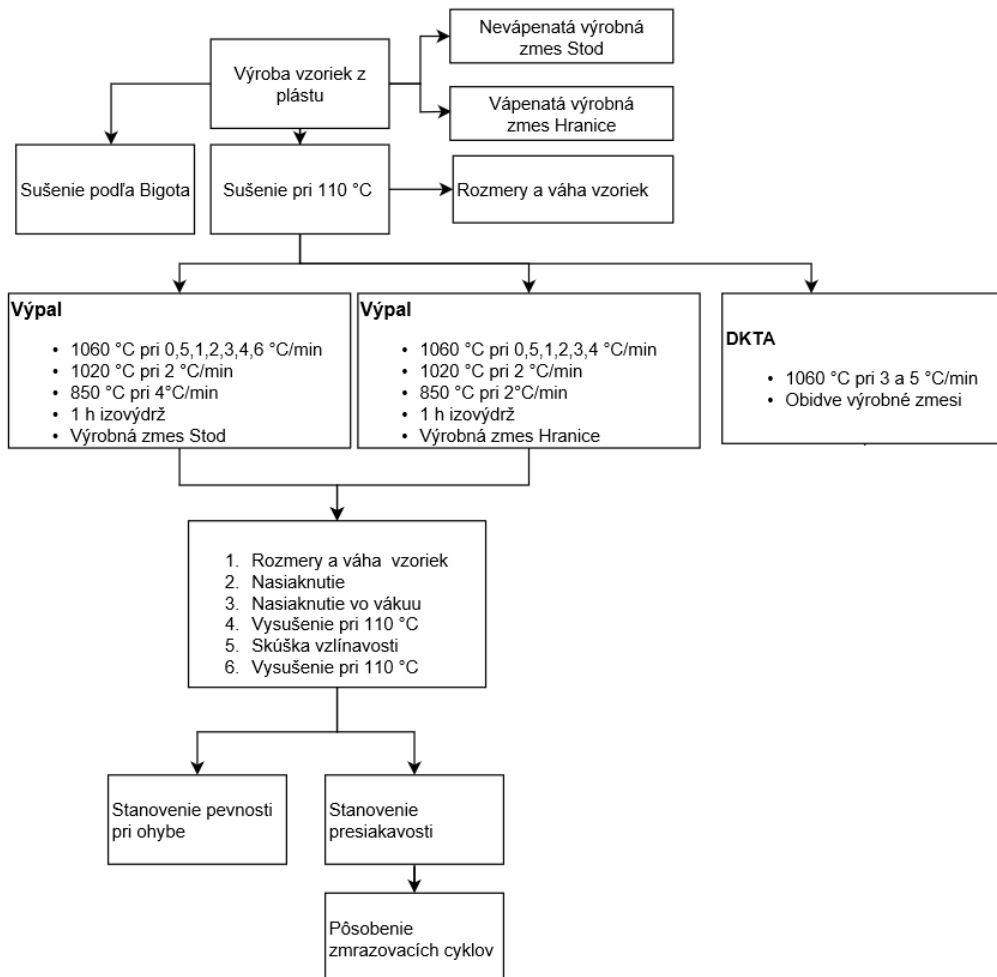
#### 9.1 I. etapa – výroba a skúšky na dodaných plástoch

V rámci výskumu boli dovezené plásty zo závodu v Hraniciach a v Stode. Plásty boli vyrábané na šnekovom lise tehliarskou technológiou. Vzorky zo stodskej výrobnej zmesi vyrobené z plástu budú ďalej označované aj **NSP**. Vzorky z Hranickej výrobnej zmesi vyrobené z plástu budú v tejto práci značené aj **VHP**.

### 9.1.1 Príprava vzoriek

Pre praktické skúšky keramických telies boli v tejto práci vytvárané skúšobné vzorky o rozmeroch 100 x 50 x 20 mm. Boli zhotovované v kovovej forme pomocou ručného vytvárania. Dno formy obsahovalo fóliu o rovnakých rozmeroch ako vnútro formy. Z plástu sa narezalo cesto objemovo o trochu väčšie ako vnútro formy a údermi gumového kladiva bolo vytvorené skúšobné teleso. Prebytky cesta boli odstránené odrezaním pomocou oceľového drôtu a povrch sa vyhladil ovlhčenou špachtľou. Forma sa odstránila z podstavca a pomalým pohybom piestu sa tehlička vytlačila z formy. Bolo vytvorených 30 vzoriek z vápenatej a 30 vzoriek z nevápenatej výrobnéj zmesi.

### 9.1.2 Postup prác



## 9.2 II. etapa – výroba a skúšky na laboratórne pripravených vzorkách

Boli vytvorené vzorky vápenatej výrobnej zmesi z Hraníc a nevápenatej výrobnej zmesi zo Stodu s využitím prímiesí fluidného popolčeka z Ledvic, vápenatého prachu z brúsenia tehál (Šlapanice) a nevápenatého prachu z brúsenia tehál (Týn nad Vltavou). Prímies fluidného popolčeka je vedľajší energetický produkt zo spaľovania hnedého uhlia pri výrobe elektrickej energie. Prímies prachu z brúsenia tehál je odpad, ktorý vzniká pri výrobe tehál. V súčasnej dobe vzrastá množstvo týchto produktov, odpadov, a preto sa kladie dôraz na ich využívanie. Prímiesi sa pridávali za účelom možného odstránenia redukčného jadra a zlepšenia určitých vlastností podstatných pre pálenie strešné tašky. Vytvorilo sa celkom 10 typov zmesí. Použité suroviny sa dávkovali v percentuálnom množstve:

- 100 % referenčná vápenatá výrobná zmes Hranice (**označenie VH**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Hranice + 10 % fluidného popolčeka (**označenie VH + FP**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Hranice + 10 % vápenatého prachu z brúsenia tehál (**označenie VH + V prach**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Hranice + 10 % nevápenatého prachu z brúsenia tehál (**označenie VH + N prach**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Hranice + 10 % domletého nevápenatého prachu z brúsenia tehál kolovým mlynom (**označenie VH + DPN prach**)
- 100 % referenčná nevápenatá výrobná zmes Stod (**označenie NS**)
- 100 % výrobná zmes Stod s prímiesou ílu B1 (**označenie NS + B1**)
- 90 % nevápenatá výrobná zmes Stod + 10 % fluidného popolčeka (**označenie NS + FP**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Stod + 10 % vápenatého prachu z brúsenia tehál (**označenie NS + V prach**)
- 90 % vápenatá výrobná zmes Stod + 10 % nevápenatého prachu z brúsenia tehál (**označenie NS + N prach**)

Vzorky sa vyrábali pri plasticite počas vytvárania 0,7 podľa Pfefferkorna.

## **9.2.1 Použité suroviny a ich vlastnosti**

### **9.2.1.1 Testovanie vstupných surovín**

#### **9.2.1.1.1 Granulometria**

Veľkosť zŕn vstupného materiálu má vplyv na reakčnú schopnosť, na slinovací proces a na vznik a elimináciu redukčného jadra.

Pre zistenie granulometrie vzoriek bolo použité dve metódy. Prvou sa ručne pomocou štetca presievala surovina cez sita o veľkosti ok 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,250; 0,125 mm. Prvotná navážka bola 100 g. Druhou metódou bol rozbor plavením. Zbytok na site o veľkosti ok 0,063 mm sa rozplavil vo vode, potom sa znova premiestni na sito o veľkosti ok 0,063 mm a premýva sa vodou až kým neprechádza cez sito len číra voda. Zbytok na site sa vysuší a zistí sa z prvotnej navážky zostatok na site 0,063 mm a prepád pod ním [22].

#### **9.2.1.1.2 Mineralogické zloženie**

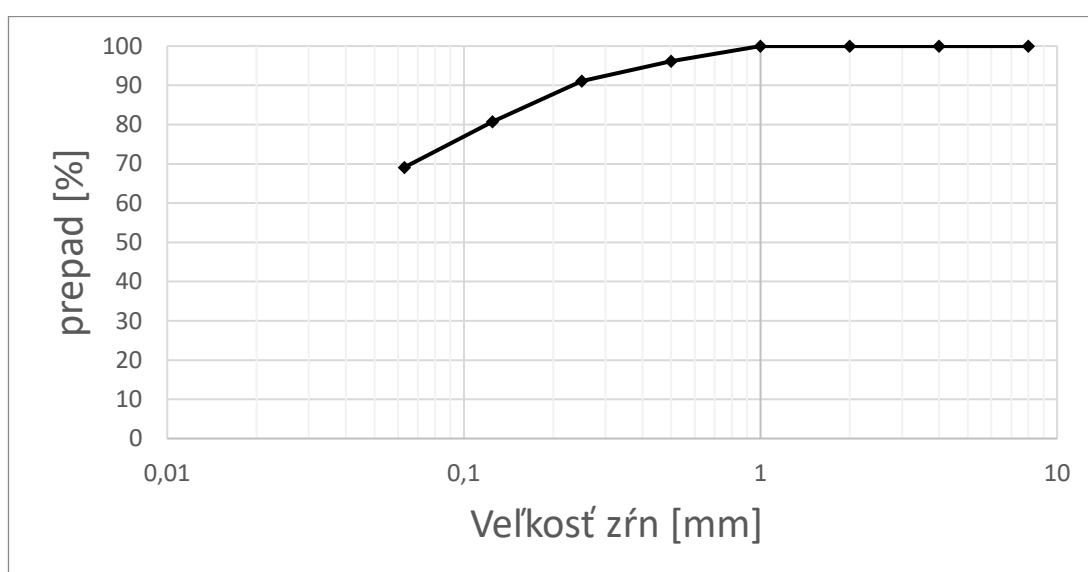
Metóda RTG slúži ku stanoveniu mineralogického zloženia kryštalických látok. Táto metóda vychádza z princípu difrakcie röntgenového žiarenia dopadajúceho na kryštalickú látku. Pri dopade monochromatického zväzku röntgenových lúčov dochádza k rozptylu na atómy do všetkých smerov. Každý kryštál vykazuje súbor rovnobežných kryštalických rovín, a preto sa vybudené rozptýlené žiarenie interferenciou v niektorých smeroch zosilňuje a produkuje difraktované žiarenie. Ak poznáme hodnoty medzirovinných vzdialeností jednotlivých minerálov a ak poznáme hodnotu medzirovinných vzdialeností skúmanej látky stanovené RTG, môžeme určiť aké minerály sú v látke obsiahnuté. U všetkých surovín bolo mineralogické zloženie zisťované pomocou RTG [22].

### **9.2.1.2 Výrobná zmes Hranice**

V závode Hranice sa vyrábajú pálené strešné tašky z vápenatej výrobnej zmesi zloženej z ílu a sprašovej hlíny približne v pomere 1:1. Do zmesi je ešte pridávaná korekčná nevápenatá zemina v množstve 10 hm. %. Jedná sa o veľmi jemne namletú zmes, ktorej granulometriu vyjadruje krivka zrnitosti.

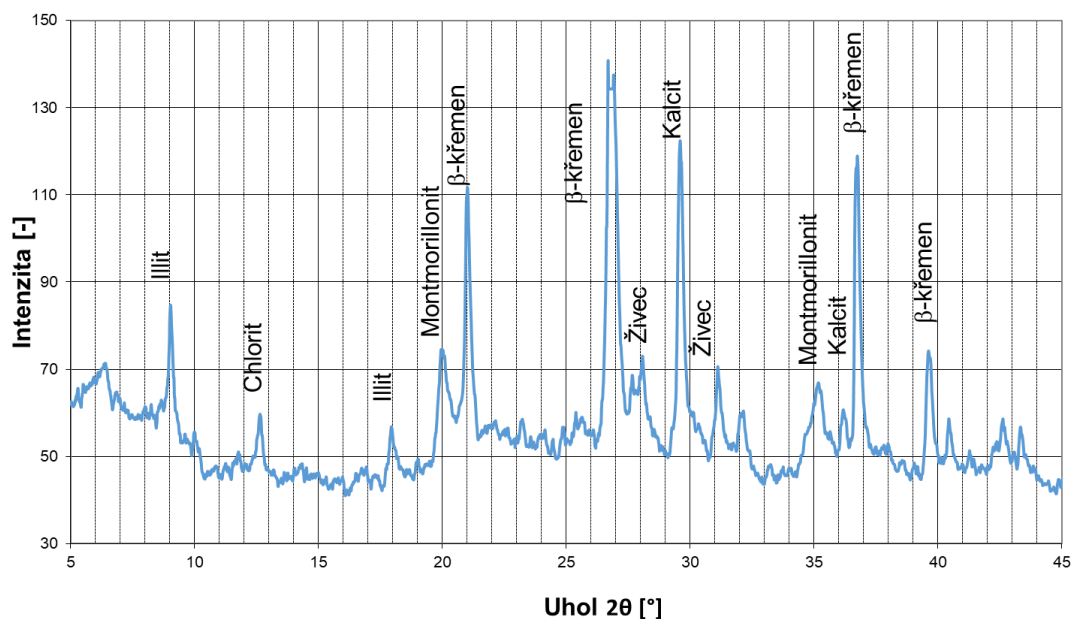
Tabuľka 6: Celkové prepady pre jednotlivé sita a ich nadsitné

vápenatá výr. zmes Hranice		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepad [%]
8	0	100
4	0	100,0
2	0,0	100,0
1	0,0	100,0
0,5	3,9	96,1
0,25	8,5	91,1
0,125	18,9	80,7
0,063	30,5	69,1



Obrázok 14: Granulometria vápenatej výrobnej zmesi Hranice

Záznam RTG dokazuje prítomnosť vápenca vo výrobnej zmesi. Zmes ďalej obsahuje ílové minerály – illit, chlorit, montmorillonit. Z neplastických zložiek je to predovšetkým kremeň, živec a kalcit.



Obrázok 15: RTG diagram vápenatej výrobnéj zmesi Hranice

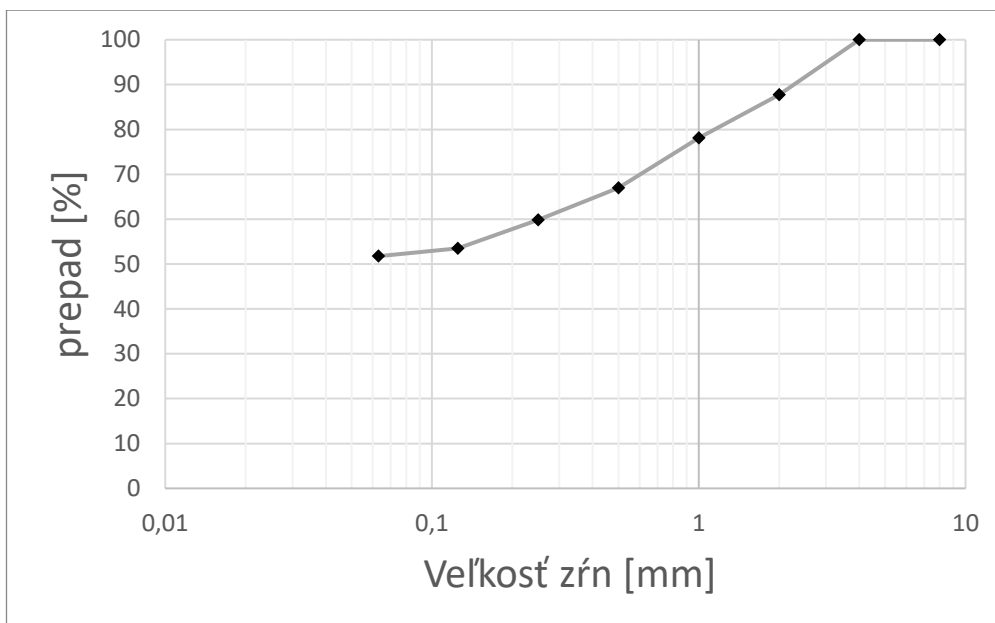
Vápenatá výrobná zmes Hranice bude ďalej v tejto práci značená aj **VH**.

### 9.2.1.3 Výrobná zmes Stod

Výrobná zmes zo Stodu sa tiež používa pre výrobu pálených strešných tašiek. Jedná sa o zmes nevápenatej zeminy s korekčným nevápenatým ílom. Granulometriu vyjadruje nasledujúca krivka zrnitosti.

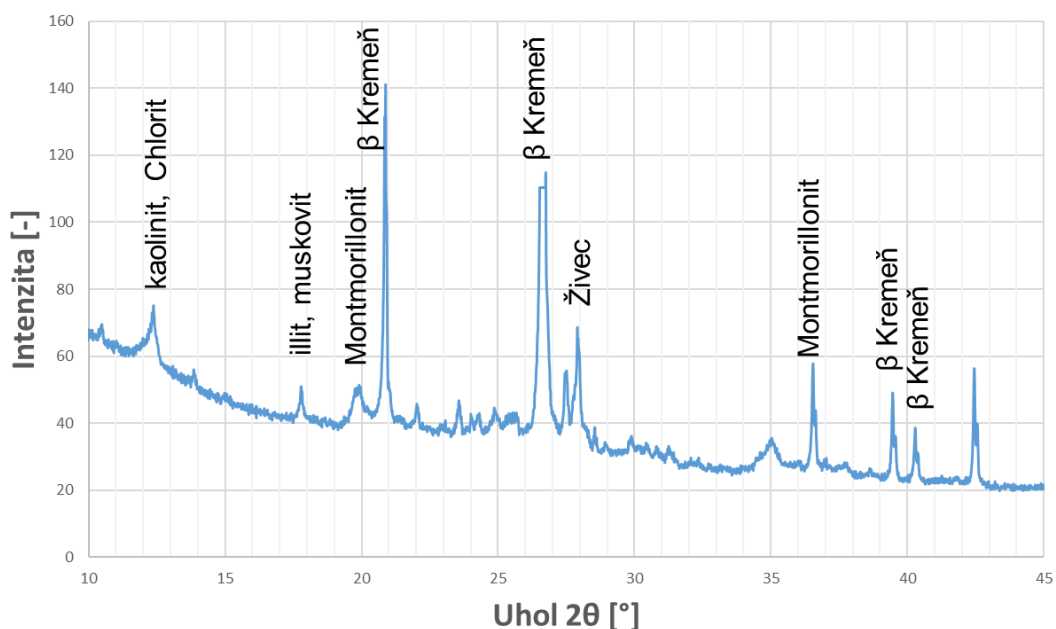
Tabuľka 7: Celkový prepád pre jednotlivé sítá a ich nadsitné

nevápenatá výr. zmes Stod		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepád [%]
8	0	100
4	0	100,0
2	6,1	87,7
1	10,9	78,1
0,5	16,5	67,0
0,25	20,1	59,9
0,125	23,2	53,5
0,063	25,9	51,8



Obrázok 16: Granulometria nevápenatej výrobnej zmesi Stod

Mineralogické zloženie výrobnej zmesi Stod je veľmi podobné ako v Hraniciach. Táto zmes akurát neobsahuje minerál kalcit. Z ílových minerálov obsahuje kaolinit, illit, chlorit, montmorillonit a z neplastických zložiek je to kremeň a živec.



Obrázok 17: RTG diagram nevápenatej výrobnej zmesi

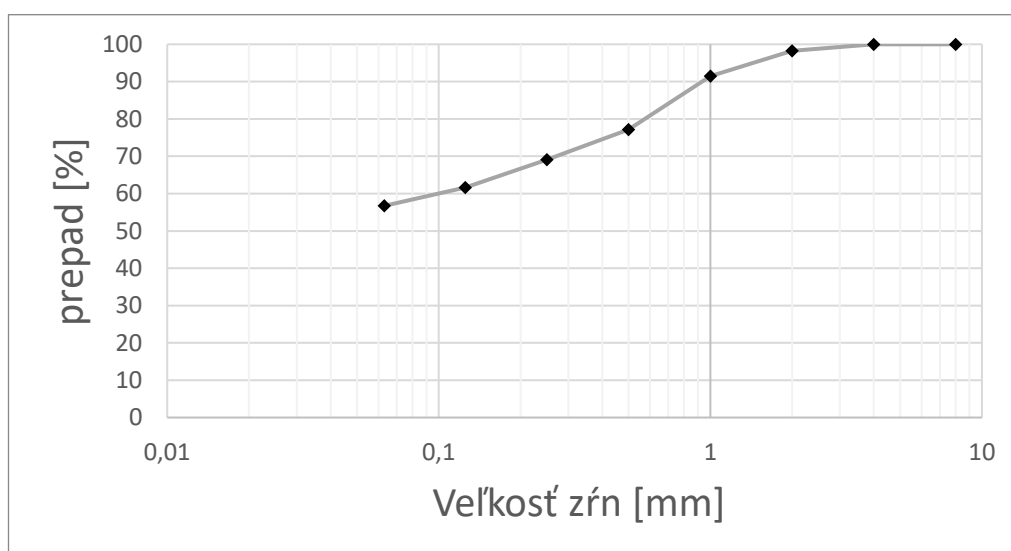
Nevápenatá výrobná zmes Stod bude ďalej v tejto práci značená aj **NS**.

#### 9.2.1.4 Výrobná zmes Stod + Íl B1

Zmes pre výrobu pálených strešných tašiek zo Stodu je v tomto prípade zmiešaná s ílom B1. Íl B1 je radený medzi žiaruvzdorné väzné kaolinitické íly. V prvom rade sa vyznačuje dobrou slínavosťou, vysokou väznosťou a pevným hutným črepom po vypálení. Používa sa ako väzná a žiaruvzdorná zložka pri výrobe žiaruvzdorných materiálov s vysokou hutnosťou a tiež pevnosťou za sucha, aj po vypálení. Tieto íly sú dôležitou zložkou pri výrobe dlaždíc, slinutých dlaždíc, obkladačiek, elektroporcelánu, šamot, strešných škridiel, smaltov, úžitkovej keramiky a tiež vložiek do komínov. Granulometriu tejto zmesi vyjadruje nasledujúca krivka zrnitosti.

Tabuľka 8: Celkový prepád pre jednotlivé sítá a ich nadsitné

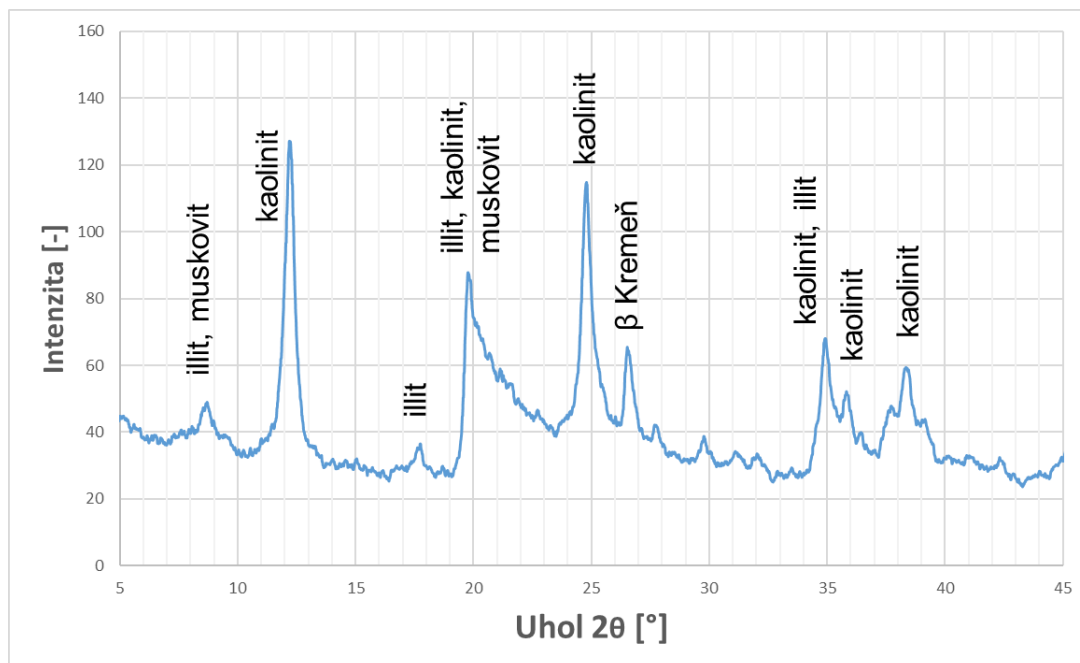
nevápenatá výr. zmes Stod + íl B1		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepád [%]
8	0	100
4	0	100,0
2	1,7	98,3
1	8,5	91,5
0,5	22,9	77,1
0,25	30,9	69,1
0,125	38,4	61,6
0,063	43,3	56,7



Obrázok 18: Granulometria nevápenatej výrobnej zmesi Stod s ílom B1



Mineralogické zloženie ílu B1 sa vyznačuje veľkým množstvom minerálu kaolinit, ďalej obsahuje muskovit, illit a z neplastických minerálov kremeň.



Obrázok 19: RTG pre íl B1

Nevápenatá výrobná zmes Stod prímiesou ílu B1 bude ďalej v tejto práci značená aj **NS + B1**.

#### 9.2.1.5 Fluidný elektrárenský popolček Ledvice

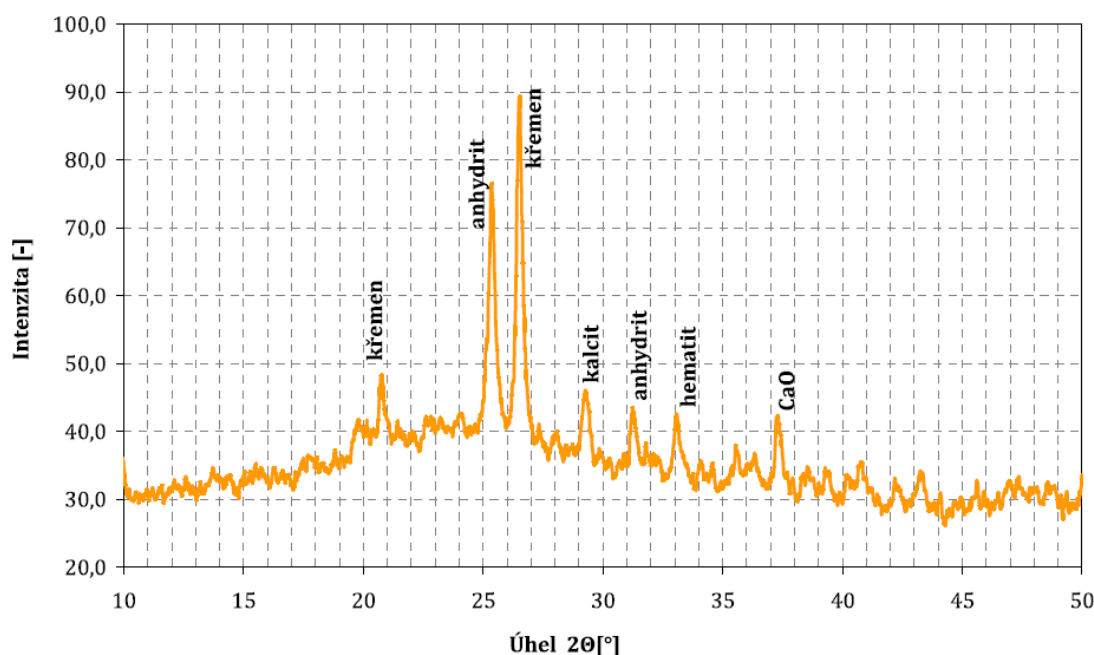
Pre náš výskum bol použitý fluidný popolček z elektrárne Ledvice. Elektrárň sa nachádza na úpätí východných častí Krušných hôr, medzi kúpeľnými mestami Teplice a Bílina. Tepelná elektrárň má celkový výkon 640 MW a po ukončení výstavby v roku 1969 bola zdrojová elektrárň tvorená celkom piatimi energetickými blokmi. Po oprave turbíny č. 4 v roku 1998 bolo zahájené skúšobné prevádzkovanie bloku č. 4. ako energetického zdroja v blokovom usporiadaní turbíny s fluidným kotlom. Technológia fluidného kotla rieši celý komplex emisií plynov, oxidu siričitého, oxidu dusíku, oxidu uhoľnatého a emisií prachových častíc [22].

V elektrárni je spaľované hnedé uhlie o výhrevnosti 11-13 MJ/kg z bane Bílina. Uhlie je dopravované priamo zo susednej úpravne uhlia Ledvice pásovými dopravníkmi. Uhlie je dopravované priamo do jednotlivých kotlov a na manipulačnú skládku, ktorá má kapacitu 40 000 t [22].

Zo spaľovacích procesov prebiehajúcich pri výrobe elektriny a tepla vznikajú vedľajšie energetické produkty, ktoré po splnení technických a zákonných podmienok postupujú k ďalšiemu spracovaniu a výrobe. Tieto odpady z procesu spaľovania a odsírenia sa prepracujú na druhotnú surovinu využiteľnú hlavne stavebníctve a pre rekultiváciu lomu Fučík. Táto surovina je stabilizát vznikajúci z koncového produktu odsírenia, popolčeka a vody v miešacom zariadení [22].

#### 9.2.1.5.1 Vlastnosti

Záznam röntgenovej difrakčnej analýzy potvrdzuje vo fluidnom popolčeku prítomnosť anhydritu, kremeňa. V menšej miere sa v popolčeku nachádza kalcit, voľné vápno, hematit.

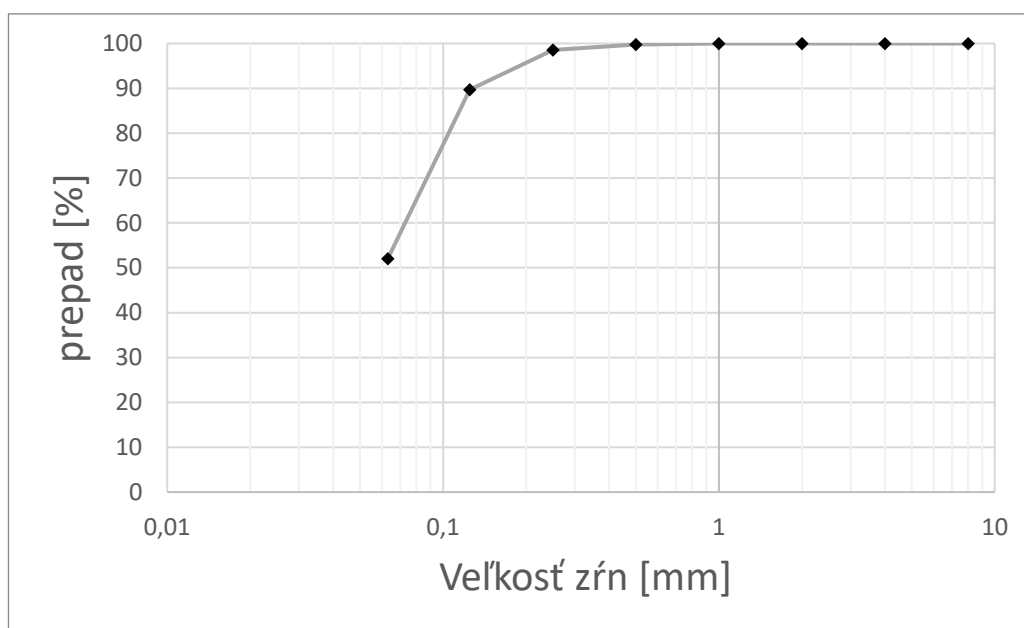


Obrázok 20: RTG analýza fluidného popolčeka Ledvice [22]

Granulometriu fluidného popolčeka vyjadruje nasledujúca krivka zrnitosti. Je zreteľné, že fluidný popolček obsahuje až 37,7 % frakcie 0,063-0,125 mm.

Tabuľka 9: Celkový prepád pre jednotlivé sítá a ich nadsitné

fluidný popolček		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepád [%]
8	0	100
4	0	100,0
2	0,0	100,0
1	0,0	100,0
0,5	0,2	99,8
0,25	1,5	98,5
0,125	10,3	89,7
0,063	48,0	52,0

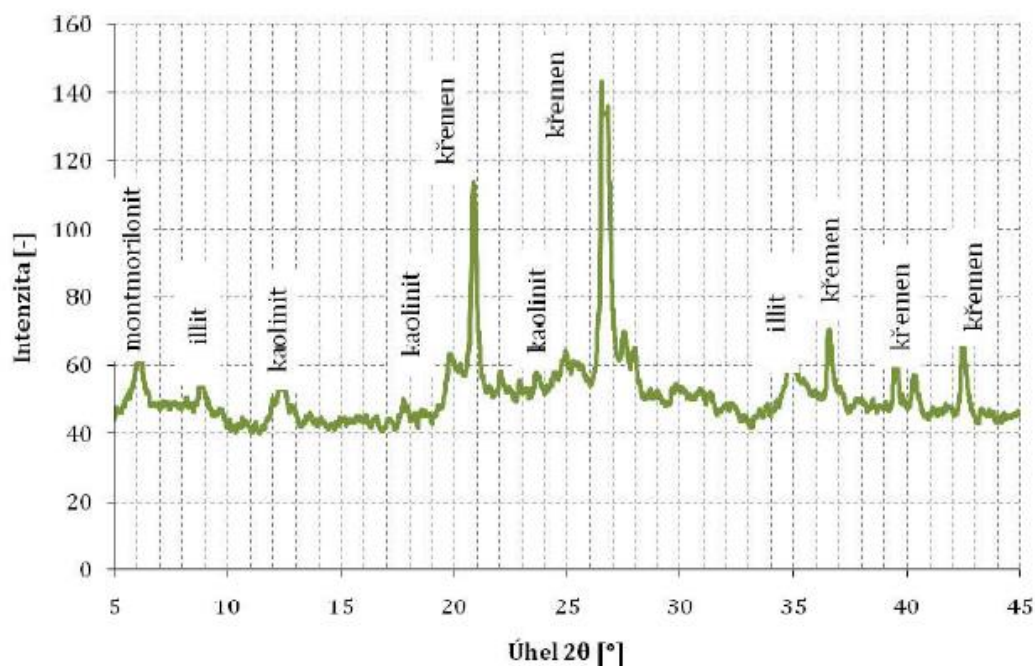


Obrázok 21: Granulometria fluidného popolčeka Ledvice

Fluidný popolček bude ďalej v tejto práci značený aj **FP**.

#### 9.2.1.6 Prach z brúsenia tehál Týn nad Vltavou

Prach vznikol po brúsení tehál vo fáze úpravy povrchu a rozmerov. Tehliarskou surovinou bola nevápenatá zemina s mineralogickým obsahom znázorneným v RTG diagrame.



Obrázok 22: RTG analýza nevápenatej suroviny pre výrobu tehlového prachu [22]

Jedna časť prachu z murovacích prvkov bola dodatočne pomletá v kolovom mlyne, pretože tento prach obsahoval vo svojom obsahu malé množstvo veľkých úlomkov, ktoré boli ťažko viditeľné pri vytváraní navážky.

K spozorovaniu, že tieto úlomky sa nachádzajú v prachu došlo až pri ručnom hnetení zmesi s vodou, a preto sa pristúpilo v prvom kroku k domletiu cesta (značeného ďalej ako VH + N prach) na valcoch.

V druhom kroku sa navrhla ešte úprava a došlo k výrobe novej zmesi, v ktorej sa prach najprv namlel v kolovom mlyne, potom sa pristúpilo k výrobe surovínovej zmesi ručným hnetením a následne došlo ešte k domletiu cesta (značeného ďalej ako VH + DPN prach) na valcoch.

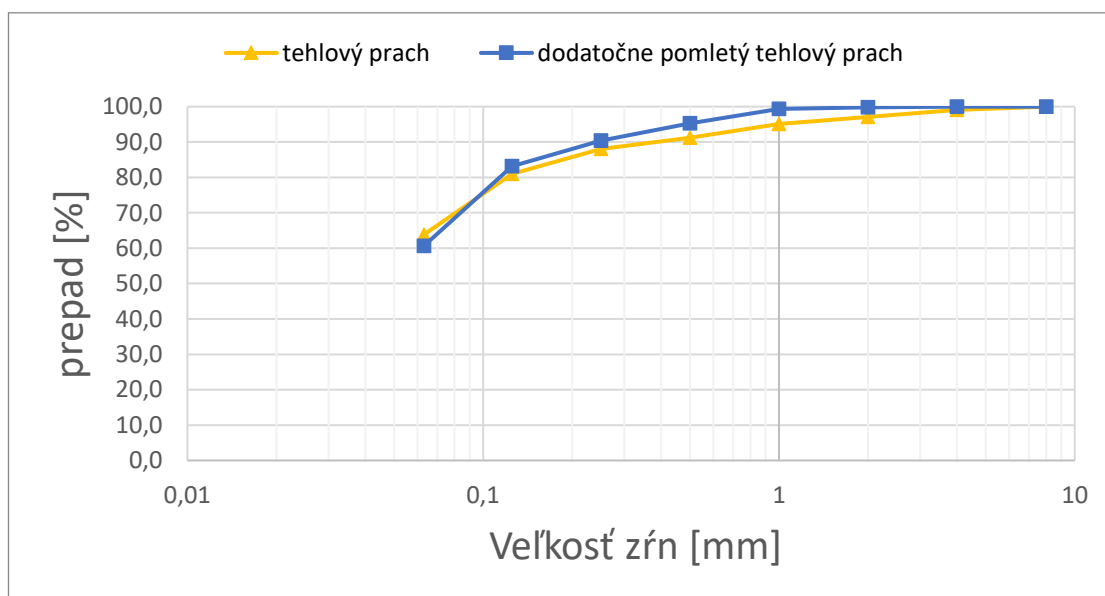
Alternatívou by bolo aj presitovanie cez sito o veľkosti ok napr. 8 mm. Granulometrie sú zaznamenané v nasledujúcich grafoch a tabuľkách.

Tabuľka 10: Granulometria nevápenatého prachu z murovacích prvkov

nevápenatý tehlový prach		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepad [%]
8	0	100,0
4	0,9	99,1
2	2,9	97,1
1	5,0	95,1
0,5	8,9	91,2
0,25	12,3	88,0
0,125	19,6	81,0
0,063	37,2	63,8

Tabuľka 11: Granulometria dodatočne pomletého nevápenatého prachu z murovacích prvkov

dodatočne pomletý nevápenatý tehlový prach		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepad [%]
8	0	100
4	0	100
2	0,2	99,8
1	0,6	99,4
0,5	4,7	95,3
0,25	9,6	90,4
0,125	16,9	83,1
0,063	39,4	60,6



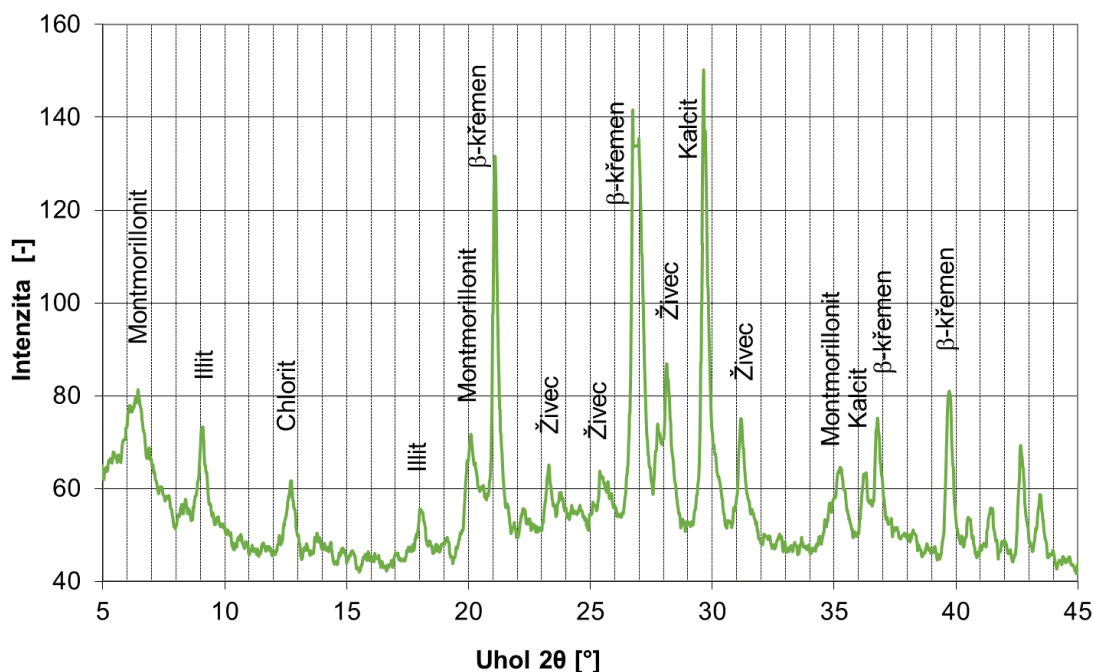
Obrázok 23: Porovnanie krivky zrnitosti **nevápenatého** tehlového prachu priamo dovezeného z výroby a krivky zrnitosti pri dodatočnom pomletí v kolovom mlyne.

Krivky obdivoch nevápenatých prachov nie sú veľmi rozdielne, pretože veľkých úlomkov v prachu bolo veľmi malé množstvo a pri sitovaní sa ukázal len 1 úlomok.

Dodatočne pomletý nevápenatý tehlový prach bude ďalej v tejto práci označovaný aj ako **DPN prach**. Nemletý nevápenatý tehlový prach sa bude označovať **N prach**.

### 9.2.1.7 prach z brúsenia tehál Šlapanice

Prach vznikol takisto po brúsení tehál vo fáze úpravy povrchu. Rozdiel medzi prachom tehliarskej výroby v Šlapaniciach a prachom z výroby v Týne nad Vltavou je, že prach zo Šlapaníc je brúsený z murovacích prvkov, ktoré obsahovali ako vstupnú surovinu hlinu s obsahom vápenca. Tento fakt dokazuje RTG diagram.

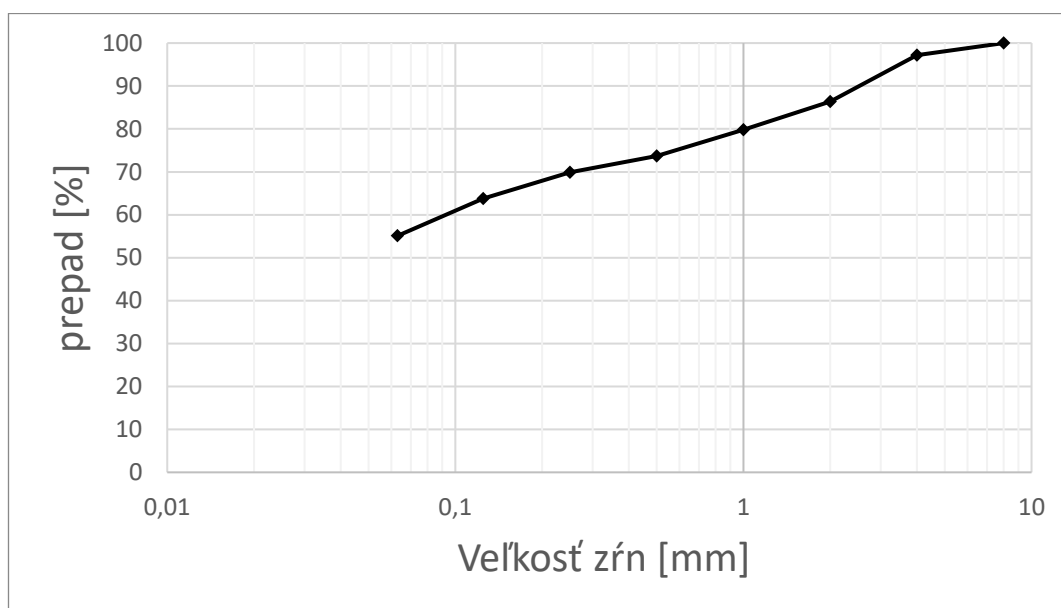


Obrázok 24: RTG analýza vápenatej tehliarskej zeminy pre výrobu tehlového prachu

Pre vápenatý prach z murovacích prvkov bola takisto vykonávaná granulometria, pričom tento prach sa dodatočne nemlel, pretože neobsahoval nadmerne veľké zrna pre výrobu plastického cesta.

Tabuľka 12: Celkový prepád pre jednotlivé sítá a ich nadsitné

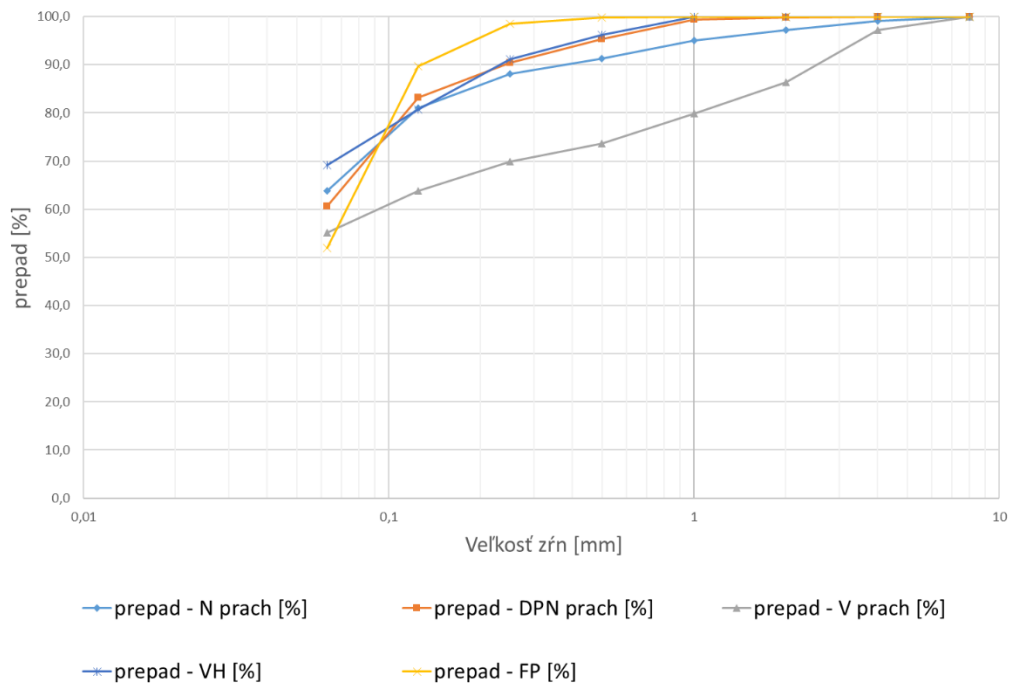
vápenatý tehlový prach		
zrno [mm]	nadsitné [%]	prepád [%]
8	0	100
4	2,84	97,16
2	13,6	86,4
1	20,2	79,8
0,5	26,3	73,7
0,25	30,1	69,9
0,125	36,2	63,8
0,063	44,9	55,1



Obrázok 25: Granulometria vápenatého tehlového prachu Šľapanice

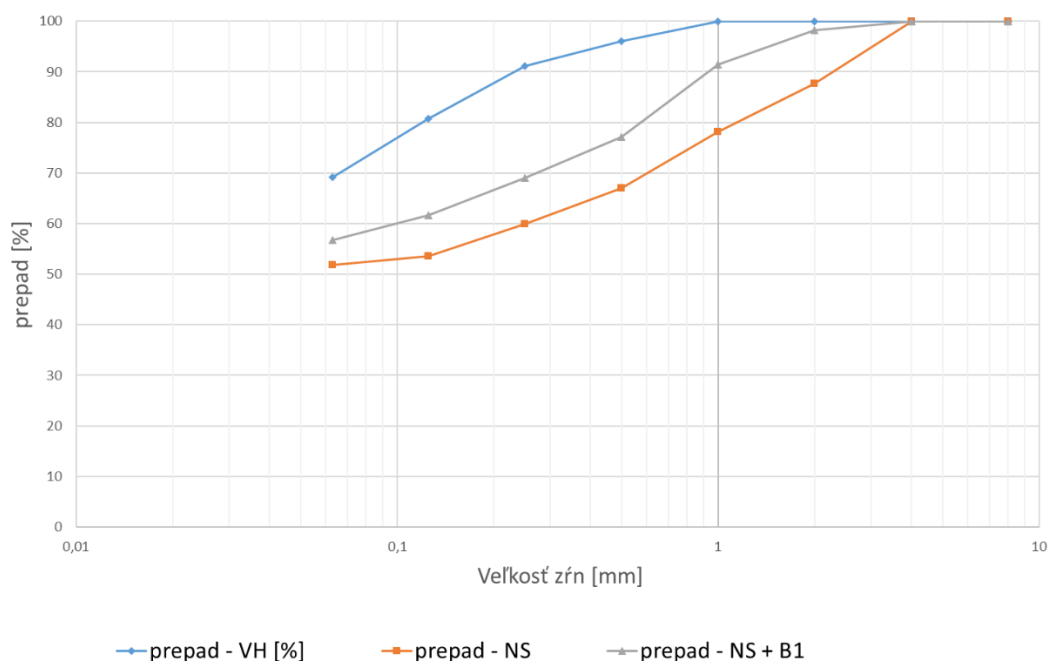
Vápenatý tehlový prach zo Šľapanic bude ďalej v tejto práci značený aj ako **V prach**.

### 9.2.1.8 Vyhodnotenie granulometrie



Obrázok 26: Porovnanie granulometrie Hranickej nevápenatej výrobnej zmesi ku prímiesiam





Obrázok 27: Porovnanie granulometrie výrobných zmesí

Z kriviek zrnitosti je viditeľné, že najviac jemných zrn pod 0,063 mm obsahovala Hranická výrobná zmes. Fluidný popolček mal najnižší obsah zrn nad sito 0,125 mm. Potom nastala zmena, pretože obsahoval veľké množstvo zrn o frakcii 0,063 -0,125 mm.

Z grafu na obrázku 27 je viditeľný jednoznačný rozdiel medzi Stodskou a Hranickou výrobnou zmesou. Obsah jemných zrn pod 0,063 bol takisto najvyšší u Hranickej vyr. zmesi.

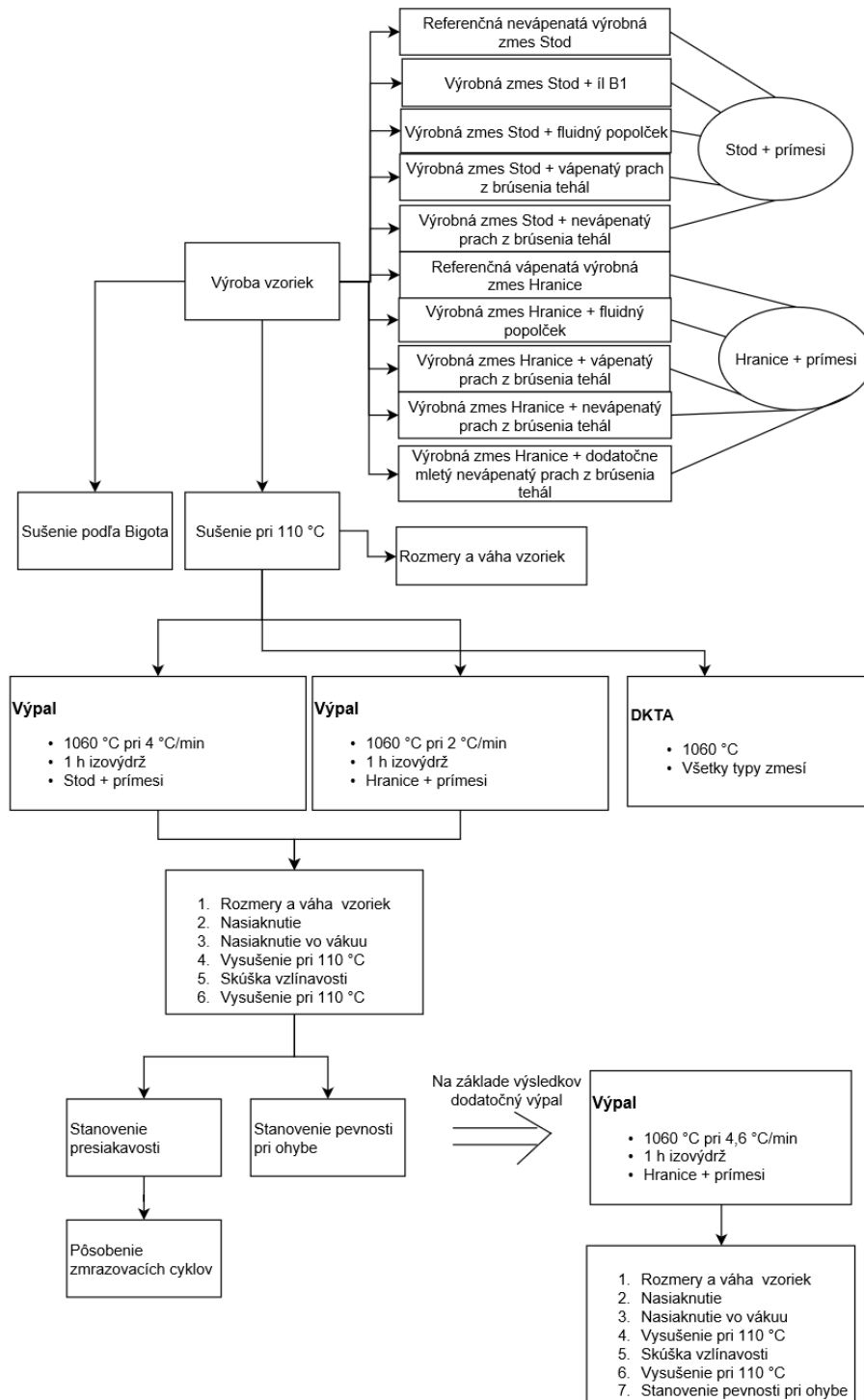
## 9.2.2 Príprava vzoriek

Príprava vzoriek pozostávala z navlhlej výrobnéj zmesi zo Stodu a jemne pomletej výrobnéj zmesi z Hranic. Stodská výrobnú zmes sa vysušila pri teplote 60 °C, a ďalej bola pomletá aj s prímiesami na kolovom mlyne podľa receptúry spomenutej v kapitole 9.2.

Hranickú výrobnú zmes už nebolo potrebné sušiť a mlieť, takže sa rovno zmiešala s prímiesami podľa receptúry v kapitole 9.2. Nevápenatý tehlový prach sa ešte domieľal podľa postupu spomenutého v kapitole 9.2.1.6.

Hranické a stodské zmesi sa zhomogenizovali pomocou laboratórneho homogenizátoru po dobu 24 hod. Zhomogenizované zmesi sa zmiešali s vodou pri okamžitej plasticite podľa Pfefferkorna 0,7 a nechali sa odležať vo vákuovom uložení po dobu 24 hod. Po odležaní sa pristúpilo k výrobe tehličiek pomocou ručného vytvárania do kovovej formy rovnakým spôsobom ako v kapitole 9.1.1.

## 9.2.3 Postup prác



## 9.3 Vykonávané skúšky

### 9.3.1 Stanovenie Bigotovej krivky

Podľa normy ČSN 72 1565-11 [31]

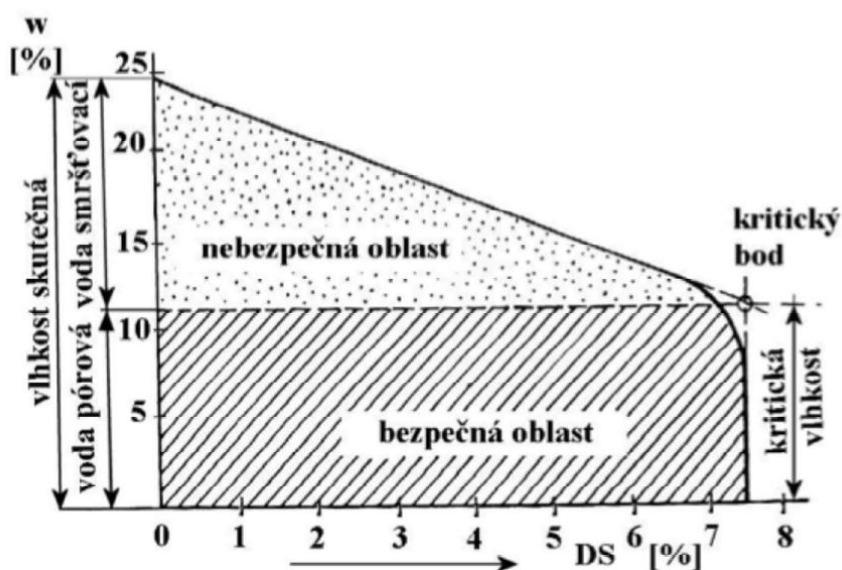
Vytvorená vzorka je po vybratí z formy umiestnený do skúšobnej aparatúry pripojenej k PC. Aparatúra je tvorená digitálnou váhou schopnou zaznamenávať kontinuálne úbytky hmotnosti vzorky s presnosťou 0,01 g a laserovým snímačom sa sleduje zmena rozmeru vzorky na hrane tehličky s presnosťou na 0,1 μm. Počas sušenia totiž dochádza k zmršťovaniu. Celá táto mieriaca aparatúra je vložená do sušiarne s nastavenou teplotou sušenia 40 °C. Z nameraných hodnôt sa vyniesli Bigotové krivky. Výpočet citlivosti k sušeniu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$CSB = \frac{w_r - w_k}{w_k}$$

$w_r$ .....skutočná vlhkosť cesta [%]

$w_k$ .....kritická vlhkosť cesta [%]

CSB.....koeficient citlivosti k sušeniu podľa Bigota [-]



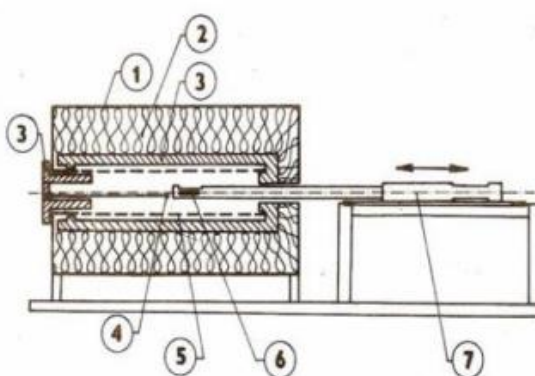
Obrázok 28: Vzorové vyhodnotenie Bigotovej krivky

Obrázok 22 znázorňuje priebeh Bigotovej krivky, na ktorej je vidno, že k zmrašťovaniu dochádza pri odparovaní vody zmrašťovanej. Pri odparovaní poréznej vody je už zmrašťovanie minimálne.

### 9.3.2 Kontrakčne dilatačne termická analýza (DKTA)

Pomocou DKTA sa pozorujú lineárne zmeny črepu v závislosti na teplote. V priebehu ohrievania a ochladzovania vzorky dochádza k nevratným zmenám, ktoré vznikajú ako dôsledok fyzikálnych a chemických procesov. DKTA sa tiež používa ako podklad pre určenie páliacich kriviek. Páliaca krivka sa upravuje aby nedošlo vplyvom napätia k porušeniu vzorky. Meracie zariadenie dilatometer tvorí snímaciu časť so vzorkou. Vzorka so snímacím nástavcom je umiestnená v pecnom telese. Vo vnútornom priestore je ďalej nainštalovaný regulačný termočlánok. Snímací nástavec spolu s elektronickým nástavcom tvorí vlastný merací prvok dilatometru. Vzorky sa pripravujú najčastejšie v podobe tyčínok, ale záleží od typu použitého prístroja.

V našom prípade boli skúšané 2 vzorky pri rýchlosti nábehu teploty  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  a  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  v rozmedzí teplôt 35 až  $1060^{\circ}\text{C}$ . Z výsledného grafu sa môže usúdiť vplyv rýchlosti výpalu na rozťažnosť črepu [21].



Obrázok 29: Príklad usporiadania dilatometru: 1 – ocelový plášť, 2 – izolácia, 3 – šamotové izolačné teleso, 4 – regulačný termočlánok, 5 – cussilitové topné teleso, 6 – snímací nástavec so vzorkou, 7 – elektronický snímač [19]

### 9.3.3 Stanovenie dĺžkovej zmeny

Podľa normy ČSN 72 1565-5 [32]

Z dĺžkových zmien sa môže usudzovať zmrštenie tehliarskych črepov v závislosti na rýchlosti nábehu teploty pri výpale a veľkosti redukčného jadra. Po výpale sa zmerali vzorky a zo zmeny dĺžok po sušení a po výpale sa vypočítala dĺžková zmena sušením, pálením a celková [21].

Dĺžková zmena sušením:

$$DS = \frac{l_s - l_z}{l_z} \cdot 100 [\%]$$

Dĺžková zmena pálením:

$$DP = \frac{l_p - l_s}{l_s} \cdot 100 [\%]$$

Celková dĺžková zmena:

$$DC = \frac{l_p - l_z}{l_z} \cdot 100 [\%]$$

$l_z$ .....dĺžka vzorky po vybratí z formy [mm]

$l_s$ .....dĺžka vzorky po vysušení [mm]

$l_p$ .....dĺžka vzorky po výpale [mm]

### 9.3.4 Strata hmotnosti pálením

Podľa normy ČSN 72 1565-6

Skúšobné vzorky boli zvážené pred a po výpale. Stratu žíhaním vypočítame podľa vzťahu [21]:

$$ZP = \frac{m_s - m_p}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

$m_s$ .....hmotnosť vzorky po vysušení [g]

$m_p$ .....hmotnosť vzorky po výpale [g]

### 9.3.5 Nasiakavosť pri atmosférickom tlaku

Podľa normy ČSN 72 1565-6 [33]

Vypálené vzorky boli zvážené a umiestnené do misky s vodou po dobu 24 h. Po danej dobe sa vzorky otreli vlhkou handrou a zistila sa hmotnosť po nasiaknutí. Nasiakavosť sa vypočíta podľa vzťahu [21]:

$$N = \frac{m_n - m_p}{m_p} \cdot 100 [\%]$$

$m_s$ .....hmotnosť skúšobnej vzorky po výpalu [g]

$m_n$ .....hmotnosť skúšobnej vzorky po nasiaknutí vodou [g]

### 9.3.6 Nasiakavosť vákuovou metódou

Podľa normy ČSN EN ISO 10545 – 3 [34]

Vypálené vzorky sa po skúške nasiakavosti pri atmosférickom tlaku umiestnili do exsikátoru tak aby sa nedotýkali. Potom sa odsaje vzduch aby bolo dosiahnuté vákuum. Po odsatí vzduchu sa napustila do exsikátoru voda, tak aby boli vzorky 5 cm pod hladinou. Po 20 minútach sa otvorí kohútik, ktorým pustíme do exsikátoru vzduch. Potom sa vzorky odoberú z nádoby, otrú suchou handrou a zvážia. Nasiakavosť sa vypočíta podľa rovnakého vzťahu ako pri atmosférickom tlaku [21].

Nasiakavosť v tejto diplomovej práci bude značená  $N_{vak}$  pre nasiakavosť vákuovou metódou a  $N_{atm}$  pre nasiakavosť pri atmosférickom tlaku.

### 9.3.7 Objemová hmotnosť

Podľa normy ČSN 72 1565-6 [35]

Objemová hmotnosť udáva hmotnosť črepu vrátane dutín a pórov na jednotku objemu. Stanovíme ju z rozmerov a hmotnosti vysušenej vzorky pri pravidelnom tvare črepu. Pri nerovnomernej vzorku je presnejšie stanovenie z hydrostatického váženia a z hmotnosti nasiaknutej vzorky. Pri objemovej

hmotnosti vysušených vzoriek sme použili výpočet z rozmerov a pri vypálenom črepe druhý spôsob [21].

Hydrostatické váženie sa vykonáva po skúške nasiakavosti vákuovou metódou. Skúšobné vzorky sa vyberú z exsikátoru a vložia sa do misky s vodou. Váženie prebieha na hydrostatických váhach. Nasýtené vzorky sa zavesia na pomocnú konštrukciu a ponoria sa do vody, tak aby sa nedotýkali stien nádoby, a aby bola celá vzorka pod vodou. Následne sa odčíta hmotnosť  $m_{nw}$ . Po odvážení vzorky hydrostaticky sa otrie vlhkou handrou a zváži na vzduchu. Výpočet podľa vzťahov [21]:

Objemová hmotnosť vysušenej vzorky:

$$\rho = \frac{m_s}{V} [kg/m^3]$$

Objemová hmotnosť vypálenej vzorky:

$$\rho = \frac{m_p}{m_n - m_{nv}} \cdot \rho_v [kg/m^3]$$

$m_{nv}$ .....hmotnosť skúšobnej vzorky hydrostaticky zváženej [kg]

$\rho_v$  ..... hustota vody [kg/m<sup>3</sup>]

$V$ .....objem skúšobnej vzorky [m<sup>3</sup>]

### 9.3.8 Zdanlivá pórovitosť

Podľa normy ČSN 72 1565-6 [35]

Zdanlivá pórovitosť udáva pomer objemu otvorených pórov k celkovému objemu vzorky vrátane pórov. Skúšku vykonávame spoločne so stanovením objemovej hmotnosti a nasiakavosti. Výpočet podľa vzťahu [21]:

$$PZ = \frac{m_n - m_p}{m_n - m_{nv}} \cdot 100 [\%]$$

### 9.3.9 Zdanlivá hustota

Zdanlivá hustota nám udáva hmotnosť vypálenej vzorky na jednotku objemu vrátane uzavretých pórov. Vzorky sa vážia hydrostaticky. Výpočet podľa vzťahu [21]:



$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot \rho_v \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

### 9.3.10 Stanovenie presiakavosti

Nepresiakavosť je veľmi dôležitá u pálených strešných tašiek, a preto je dôležité zistiť ako redukčné jadro, ktoré u týchto tašiek môže vzniknúť, ovplyvňuje túto vlastnosť [21].

Presiakavosť pálených strešných tašiek sa podľa normy ČSN EN 539 – 1 [36] skúša dvoma možnými metódami. Prvá metóda spočíva v stanovení množstva vody, ktoré presiakne 1 cm<sup>2</sup> povrchu keramického črepu za 48 hodín. Výsledná hodnota sa nazýva faktor presiakavosti. Výpočet podľa vzťahu [21]:

$$IF = \frac{V_1 - V_2}{A \cdot 2} \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{deň}} \right]$$

V<sub>1</sub>.....objem vody, ktorý presiakne za 2 dni [cm<sup>3</sup>]

V<sub>2</sub>.....objem vody, ktorý sa odparí za 2 dni [cm<sup>3</sup>]

A.....priemerná plocha skúšobného telesa [cm<sup>2</sup>]

Druhá metóda stanovuje dobu, kedy presiakne prvá kvapka vody pri pôsobení vody na povrch tašky. Zo stanovenej doby sa ďalej vypočíta faktor presiakavosti podľa vzťahu [21]:

$$IC = \frac{20 - X_l}{20} \text{ [h]}$$

X<sub>l</sub>..... doba, za ktorú odkvapne prvá kvapka z tašky [h]

Pre skúšanie presiakavosti bola použitá upravená skúška. Nasiaknuté vzorky sa vysušili a uložili po dobu aspoň 20 hodín pri laboratórnej teplote 15 – 30 °C a relatívnej vlhkosti 30 %. Pomocou silikónového lepidla sa nalepila plastová nádoba na povrch vzorky. Lepidlo sa nechalo pôsobiť po dobu 24 hodín. Spodná strana vzorky sa položila na uzavretú nádobu s na ktorej boli umiestnené elektródy. Na povrch vzorky do hornej nádoby sa naliala voda.

Voda na črep pôsobila tlakom vodného stĺpca. Pri presiaknutí vzorky došlo k vychýleniu, ktoré bolo zaznamenané v PC. Následne sa stanovil čas presiaknutia [21]. Pre stanovenie doby presiaknutia vzorky sa určilo označenie DPV(doba za ktorú presiakla vzorka). Toto označenie sa používalo v tejto práci.

### **9.3.11 Stanovenie vzlínavosti**

Pri styku neslinutého črepu s kvapalinou začne kvapalina účinkom kapilárnych síl vnikáť do otvorených pórov a to i proti pôsobeniu gravitačnej sily. Táto vlastnosť sa označuje ako vzlínavosť (VZ). Rýchlosť vzlínavania závisí hlavne na priemere kapilár (na stupni slinutia) a na vlastnostiach kvapaliny. Rozdielnosť v rýchlosti vzlínavania pri rôznom usporiadaní pórov sa prejaví, ak sú v črepe takmer nepostrehnuteľné mikrotrhlinky, ktoré črep znehodnocujú. Týmito trhlinkami vzlína kvapalina rýchlejšie, ako ostatnými kapilármi. Skúška na zistenie vzlínavosti sa vykonáva aj ako nepriama metóda na zistenie presiakavosti (čím rýchlejšie voda vzlína, tým je väčšia presiakavosť črepu) - medznou hodnotou je vzlinutie 50 mm/90 min [21].

Na zadnú stranu tehličky sa nakreslí meradlo. Tehličky sa postaví na výšku do misky s vodou o výške hladiny 10 mm. Zaznamenáva sa hodnota každé dve minúty. Po 90 minútach sa určí kritérium presiakavosti [21].

### **9.3.12 Stanovenie mrazuvzdornosti**

Priame metódy stanovenia mrazuvzdornosti tehliarskych črepov sú založené na princípe opakovaného zmrazovania a rozmrazovania vzoriek. Mrazuvzdornosť sa zisťuje na vodou nasiaknutých vzorkách. Pálené strešné tašky musia vyhovieť na mrazuvzdornosť podľa normy ČSN EN 539-2 [37]. Pre Českú republiku platí, že musí vyhovieť 150 zmrazovacím a rozmrazovacím cyklom. Po vykonanej skúške sa následne kontroluje vzhľad vzoriek. Pri výskyte praskliny, lomu alebo odlupovania, tehliarsky črep nevyhoví skúške mrazuvzdornosti. Nevýhodou skúšky je jej časová náročnosť [21].

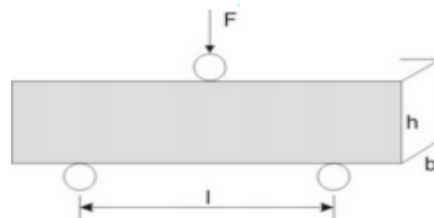
V našom prípade boli skúšané hrubšie vzorky s rôzne vyvinutým redukčným jadrom podľa normy ČSN 72 1565-14 [38]. Vzorky sa uložili do vody na 24 hodín, otreli sa vlhkou handrou a vložili sa do zmrazovacieho zariadenia na dobu 6 hodín pri teplote  $-20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ . Ďalej sa vzorky vybrali a vložili sa na 2 hodiny do vody o teplote  $15 - 30\text{ °C}$ . Cykly sa opakovali. Vzorky sa skúšali na maximálny počet cyklov 25. Tie, u ktorých došlo k porušeniu sa označia ako nemrazuvzdorné. Ako mrazuvzdorné sa označia vzorky, ktoré po 25 cykloch nejavia známku porušenia a ich pevnosť v ťahu za ohybu sa po ukončení cyklov zníži maximálne o 20 % [21].

### 9.3.13 Stanovenie pevnosti v ohybu

Podľa normy ČSN 72 1565-7 [39]

Skúšobná vzorka je podopretá dvoma podporami vo vzdialenosti  $l$ . Z vrchu na ňu tlačí sila vo vzdialenosti  $l/2$  od podpory. Sila pôsobí na vzorku kým nedôjde k porušeniu vzorky. Pevnosť v ťahu za ohybu sa vypočíta z nasledujúceho vzťahu [21]:

$$\sigma_{po} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$



$F$ .....sila potrebná k porušeniu vzorky [N]

$b$ .....šírka vzorky [mm]

$h$  .....výška vzorky [mm]

$l_0$ .....dĺžka medzi podporami [mm]

### 9.3.14 Stanovenie KTR jadra a črepu

. DKTA analýzou je možné zistiť aj Koeficient dĺžkovej teplotnej rozťažnosti  $\alpha$ . KTR sa buď odčítava priamo z nameraných hodnôt dilatometru alebo sa zisťuje nasledujúcim vzťahom [21]:

$$KTR_{\alpha} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} [K^{-1}]$$

$\Delta l$  .....zmena dĺžky vzorky spôsobená zmenou teploty  $t_1 - t_0$  [mm]

$l_0$ .....dĺžka vzorky pri teplote  $t_0$  [mm]

$\Delta t (t_1 - t_0)$ .....rozdiel teplôt výpalu [K]

Rozdiel medzi KTR vypočítaným a skutočne nameraným dilatometricky sa môže líšiť v rozmedzí 2-5 % [21].

### **9.3.15 Metóda vysokotlakovej ortuťovej porozimetrie**

Metóda ortuťovej porozimetrie je založená na jave kapilárnej depresie. Pri ponorení pórovitého materiálu do kvapaliny (ortuti), ktorá ju nezmačča (uhol zmaččania má väčší ako  $90^\circ$ ), môže táto kvapalina vniknúť do pórov len pôsobením vonkajšieho tlaku. Pri zvyšovaní tlaku ortuť postupne vniká do pórov o menšom polomere. Pri súčasnom zvyšovaní tlaku a merania objemu úbytku ortuti (ktorá je tlačaná do pórov) je možné zistiť rozdelenie objemu pórov podľa veľkosti [21].

## 10 Vyhodnotenie

### 10.1 Vlastnosti pri sušení

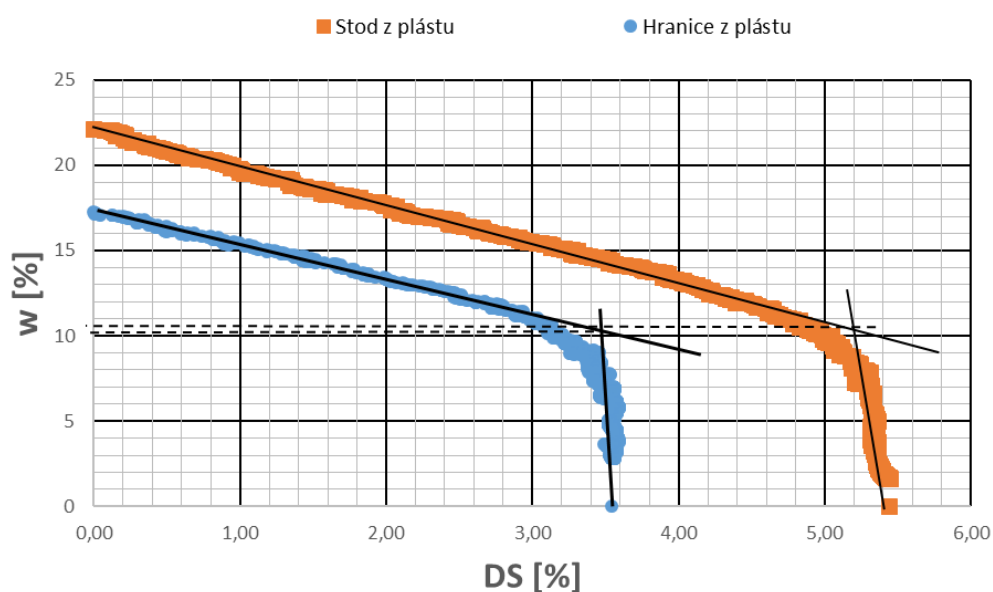
#### 10.1.1 Vyhodnotenie I. etapy

Tabuľka 13: Vypočítané hodnoty pred a po sušení pre nevápenatú zmes Stod pri teplote sušenia 110 °C

$\rho_{\text{výlisu}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
2100	2050	-4,56	21,30

Tabuľka 14: Vypočítané hodnoty pred a po sušení pre vápenatú zmes Hranice pri teplote sušenia 110 °C

$\rho_{\text{výlisu}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
2210	2030	-3,00	17,23



Obrázok 30: Porovnanie Bigotovej krivky nevápenatej zmesi vyrobenej z plástu a vápenatej zmesi vyrobenej z plástu

Plásty pre výrobu vzoriek boli zabalené vo fólii a ponechané v laboratórnom prostredí. Vápenatá zmes bola uchovaná pre experimenty dlhšiu dobu ako nevápenatá zo Stodu. Kvôli tomuto faktoru došlo k čiastočnému

vysušeniu a zmraženiu vápenatej zmesi z Hranic. Cesto bolo tvrdšie pri vytváraní a došlo k zmraženiu len -3,00 %. Objemová hmotnosť výsuškov už bola veľmi podobná u oboch zmesí. Z Bigotovej krivky je zreteľné, že aj keď obidve zmesi začínali pri dosť odlišnej pracovnej vlhkosti, obidve končili pri podobnej hodnote vlhkosti pri vysušení zmrašťovanej vody.

Dĺžková zmena sušením(DS) je nižšia v tabuľkách 9 a 10 ako v grafe 1, pretože tabuľková zmena dĺžky bola zistená pri teplote sušenia 110 °C počas 24 hodinovej doby sušenia v sušiarňi. Bigotová krivka je presnejšia a sušenie prebieha pri teplote 40 °C až do doby kedy sa už nemení dĺžková zmena. Potom sa vzorky ešte dosušujú v sušiarňi na 110 °C, a až táto hmotnosť a dĺžka vzorky je konečná.

## 10.1.2 Porovnanie vlastností z I. etapy so vzorkami z II. etapy

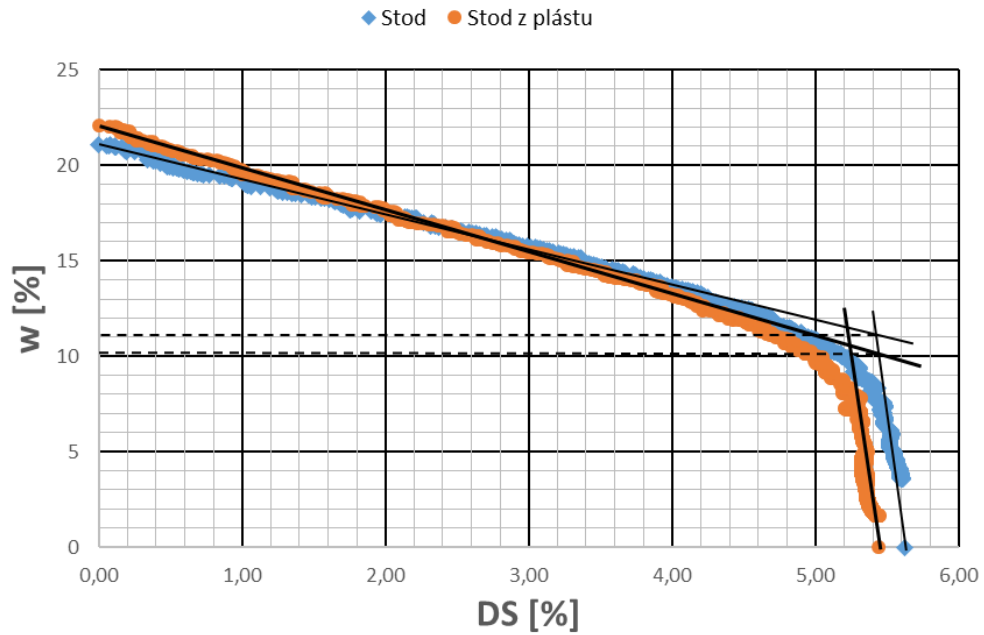
Tabuľka 15: Porovnanie vlastností pred a po sušení medzi jednotlivými vzorkami z vápenatého plástu Hranice

Označenie <sup>*1</sup>	$\rho_{\text{výlisku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
VH	1910	1940	-6,20	23,92
VHP	2210	2030	-3,00	17,23

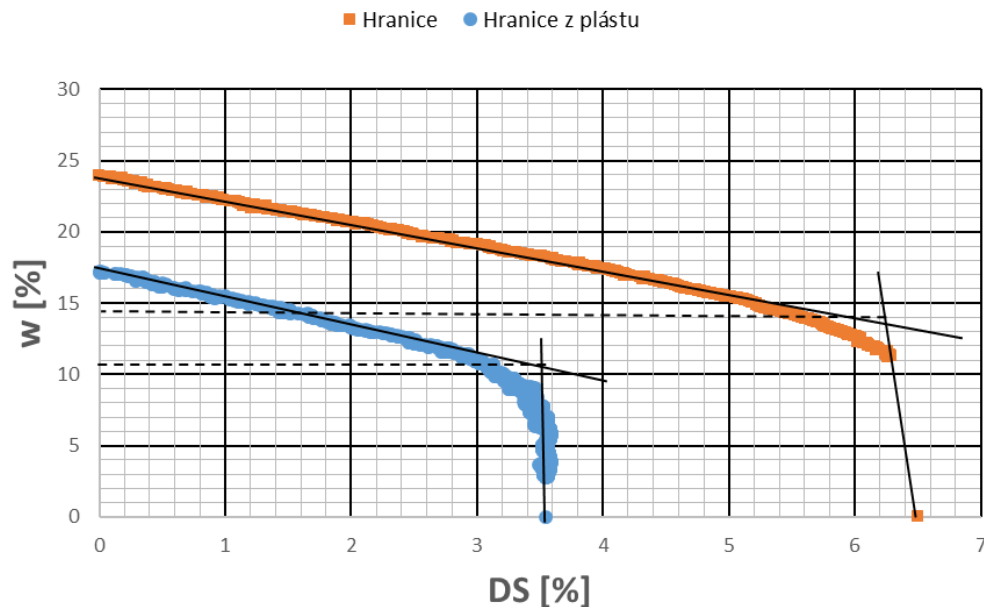
\*1 V metodike popísané vysvetlenie označení

Tabuľka 16: Porovnanie vlastností pred a po sušení medzi jednotlivými vzorkami z nevápenatého plástu Stod

označenie	$\rho_{\text{výlisku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
NS	2030	2020	-5,61	21,08
NSP	2100	2050	-4,56	21,30



Obrázok 31: Porovnanie Bigotových kriviek medzi nevápenatou výrobnou zmesou vytváranou ručne a na šnekovom lise do plástov

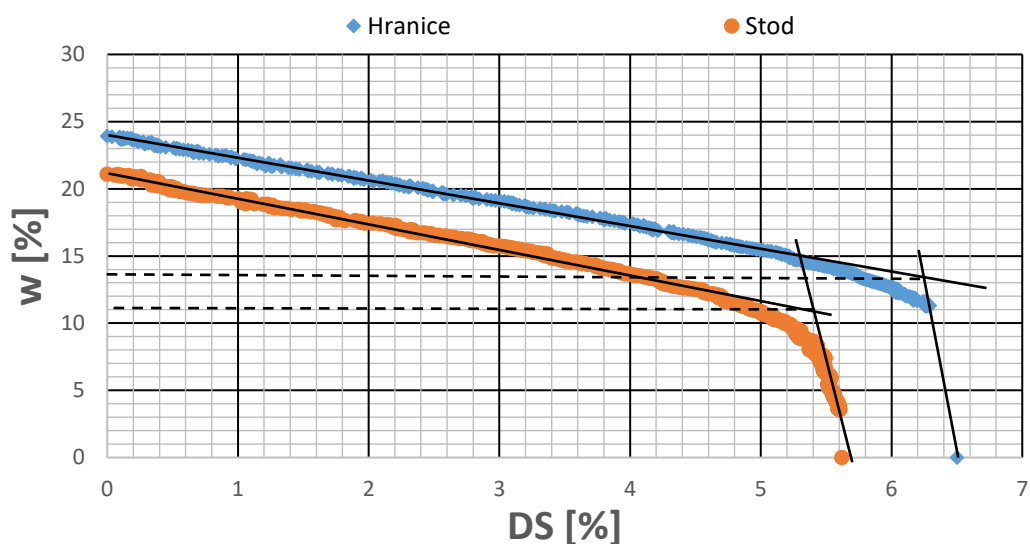


Obrázok 32: Porovnanie Bigotových kriviek medzi vápenatou výrobnou zmesou vytváranou ručne a na šnekovom lise do plástov

Z nasledujúcich výsledkov je možné usudzovať rozdiel medzi zmesou vytlačovanou na šnekovom lise a zmesou vyrábanou ručným hnetením. Z Bigotových kriviek je viditeľné, že vzorky vytlačované na šnekovom lise, a potom ručným vytíkaním do formy majú nižšiu vlhkosť v kritickom bode. To napovedá vyššej hutnosti, čiže nižšej pórovitosti cesta. Preto majú vzorky vyrábané ručným hnetením nižšiu objemovú hmotnosť vylisku aj výsušku. Pri hrubšej granulometrii výrobnej zmesi zo Stodu je menší rozdiel v hodnotách

objemovej hmotnosti (Stod z plástu : Stod referenčné). Vzorky miešané len ručným hnetením majú tým pádom aj nižšiu pórovitosť.

### 10.1.3 Vyhodnotenie II. etapy



Obrázok 33: Porovnanie Bigotových kriviek referenčných zmesí vyrábaných ručne

Zmesi boli vyrábané na konštantnú plasticitu podľa Pfefferkorna 0,7. Z Grafu 4 je viditeľné porovnanie Bigotových kriviek Hranickej zmesi a Stodskej. Keďže Hranická výrobná zmes sa vyznačuje veľkým množstvom jemných zrn (väčší merný povrch), tak je možné, že pri konštantnej plasticite nasiakne viac vody ako hrubozrnnejšia Stodská vyr. zmes. Môže byť predmetom ďalšieho výskumu. Bigotové krivky majú veľmi podobný priebeh, a preto sa Hranická zmes vyznačuje aj väčšou dĺžkovou zmenou a vlhkosťou v kritickom bode.

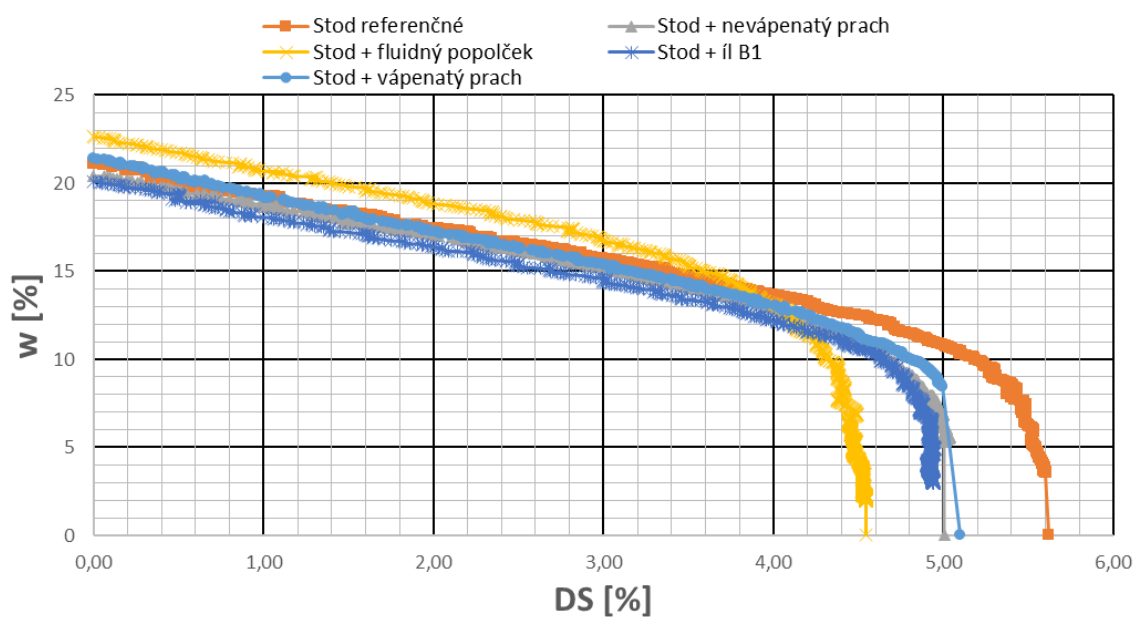


Tabuľka 17: Porovnanie vlastností pred a po sušení nevápenatých surovín s prímiesami

označenie	$\rho_{\text{výlisku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
NS	2030	2020	-5,61	21,08
NS + FP	2010	1860	-4,05	22,67
NS + N prach	2020	1970	-4,80	21,43
NS + V prach	2010	1970	-4,79	21,39
NS + B1	2025	2030	-4,95	20,11

Tabuľka 18: Porovnanie vlastností pred a po sušení vápenatých surovín s prímiesami

označenie	$\rho_{\text{výlisku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{výsušku}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DS [%]	w [%]
VH	1910	1940	-6,20	23,92
VH + FP	1870	1750	-4,30	26,96
VH + N prach	1970	1930	-4,85	21,29
VH + DPN prach	1960	1920	-5,78	22,83
VH + V prach	1950	1900	-5,45	24,01



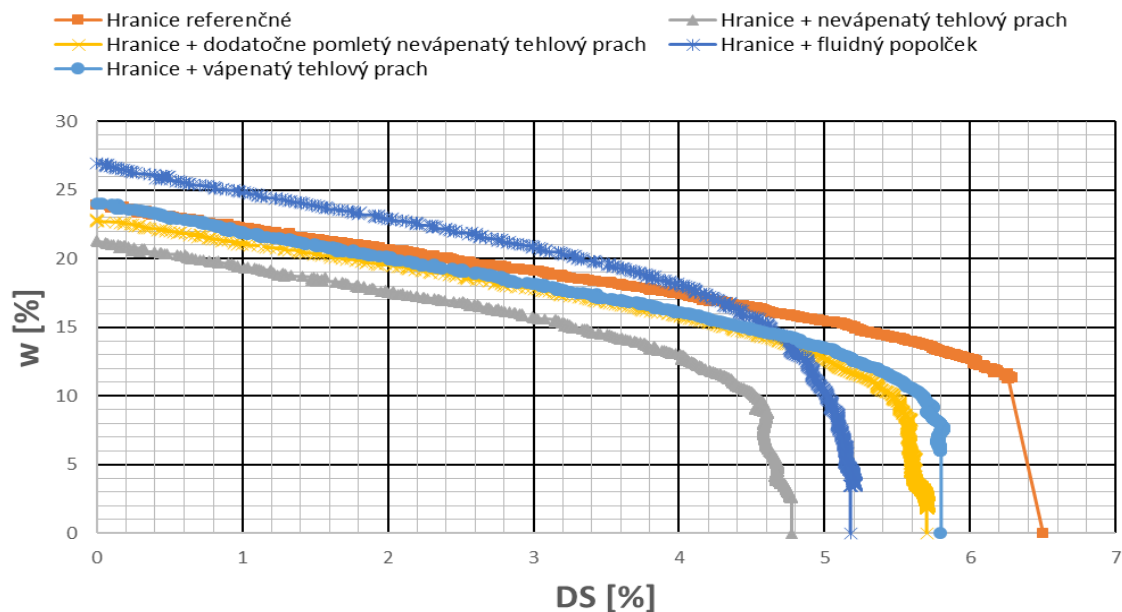
Obrázok 34: Porovnanie Bigotových kriviek nevápenatých surovín zo Stodu s prímiesami

Všetky prímеси pôsobia ako ostrivá, čiže znižujú zmrašťovanie zmesi a citlivosť k sušeniu. Ostrivá sa v určitej fáze sušenia už nezúčastňujú na zmrašťovaní. Ostrohrannejšie hrubšie zrna majú priaznivý vplyv na zníženie zmrašťovania. Ostrivá môžu pôsobiť aj ako ľahčivá svojou poréznu štruktúrou a nevytvárajú plastické cesto. Stodská vyr. zmes s prímесou fluidného popolčeka vykazovala najnižšiu dĺžkovú zmenu sušením. Fluidný popolček je jemnozrný a porézny, takže si počas výroby plastického cesta natiahol najviac vody z prímесí. Počas sušenia, kvôli svojmu obsahu pórov, znížil zmrašťovanie vzoriek najviac. Má tendenciu tuhnúť a tvrdnúť s vodou, kvôli obsahu anhydritu, preto po odležaní výrobnej zmesi menil celkom výrazne plasticitu podľa Pfefferkorna. Dokazuje to tabuľka 19.

*Tabuľka 19: Zmena deformačného modulu podľa Pfefferkorna po zamiešaní zmesi Hranice + Fluidný popolček s vodou a odležaní za neprístupu vzduchu*

označenie	d okamžité [-]	d po 24 h [-]	d po 3dňoch [-]
VH + FP	0,70	0,82	0,87

Hranická zmes mala najnižšiu dĺžkovú zmenu počas zmrašťovania pri využití prímеси nevápenatého tehlového prachu. Môže to byť zapríčinené tým, že sa v tehlovom prachu nachádzal určitý obsah väčších ostrohranných zrn frakcie 4-8 mm. Pri dodatočnom pomletí tehlového prachu v kolovom mlyne bolo zmrašťovanie podobné ako pri využití prímеси vápenatého tehlového prachu. Využitie fluidného popolčeka aj v Hranickej zmesi pozitívne ovplyvňuje zmrašťovanie, pričom pracovná vlhkosť zmesi Hranice + fluidný popolček vychádza až na 26,96 %.



Obrázok 35: Porovnanie Bigotových kriviek vápenatých surovín z Hranic s prímiesami

## 10.2 Dĺžkové zmeny pálením

### 10.2.1 Vyhodnotenie I. etapy

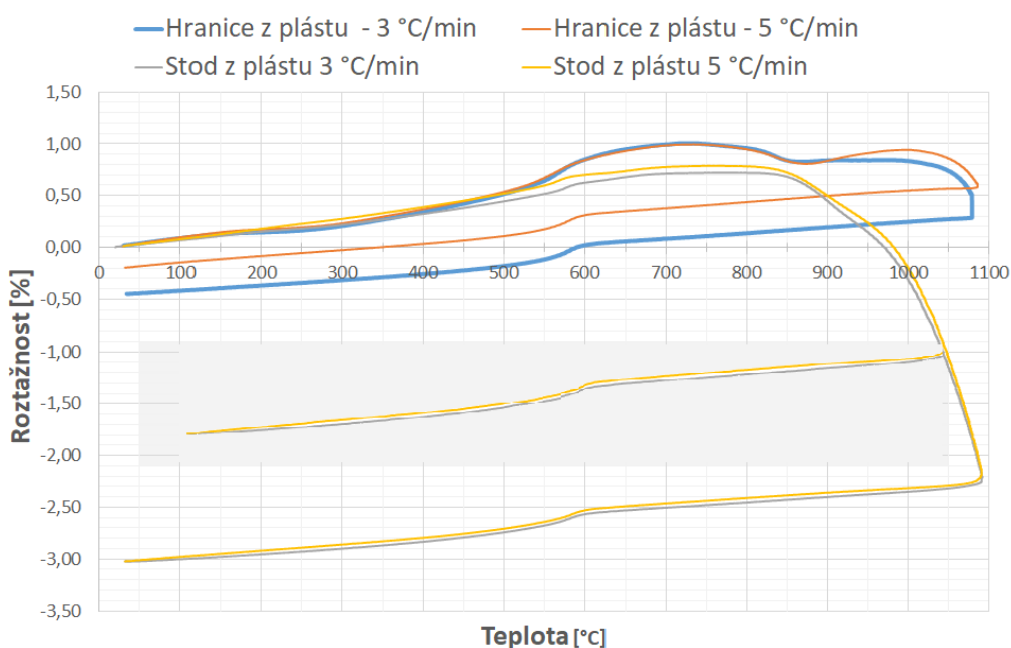
Graf DKTA vyjadruje vplyv rýchlosti nábehu teploty počas výpalu na paliacu krivku, čiže nevratné dĺžkové zmeny.

Tabuľka 20: Porovnanie vlastností po výpale na nevápenatej zmesi zo Stodu pri vzorkách vyrobených z plástu na rozmere 100x50x20 mm

max. vyp. Teplota	rýchlosť výpalu [°C/min]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
1060	0,5	-4,55	-8,60	5,85
	1	-4,87	-9,17	5,88
	2	-4,79	-9,11	5,88
	3	-4,69	-9,17	6,02
	4	-4,78	-9,15	5,92
	6	-2,49	-7,19	5,73
1020	2	-1,43	-5,96	5,88
850	4	0,39	-4,09	5,64

Tabuľka 21: Porovnanie vlastností po výpale na vápenatej zmesi z Hranic pri vzorkách vyrobených z plástu na rozmere 100x50x20 mm

max. vyp. Teplota	rýchlosť výpalu [°C/min]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
1060	0,5	-2,30	-5,79	7,56
	1	-2,27	-4,72	7,63
	2	-2,18	-3,95	7,77
	3	-2,31	-4,83	7,86
	4	-2,20	-5,07	7,94
1020	2	0,02	-2,87	7,67
850	2	0,22	-3,31	7,49



Obrázok 36: Porovnanie DKTA vápenatej a nevápenatej zmesi vyrobených z plástu

Graf DKTA vyjadruje vplyv rýchlosti nábehu teploty (rýchlosti výpalu) počas výpalu na páliacu krivku. V I. etape sa porovnávali pomocou kontrakčne dilatačne termickej analýzy (DKTA) vzorky vyrobené z plástov. Stodská zmes (nevápenatá) sa vyznačovala o dosť väčšími dĺžkovými zmenami ako Hranická (vápenatá), pozri graf 7. Je to zapríčinené vznikom anortitu, prejavujúcim sa typickou oblasťou rozmerových zmien na krivke DKTA [29]. V oblasti teplôt 600 – 750 °C dochádza u vápenatej zmesi k rozkladu kalcitu, čo sprevádza zväčšenie objemu. Pri teplote 573 °C je objemová zmena

sprevádzaná u oboch zmesí modifikačnou premenou  $\beta$  – kremeňa na  $\alpha$ -kremeň. Pri chladení pri rovnakej teplote nastáva spätná premena.

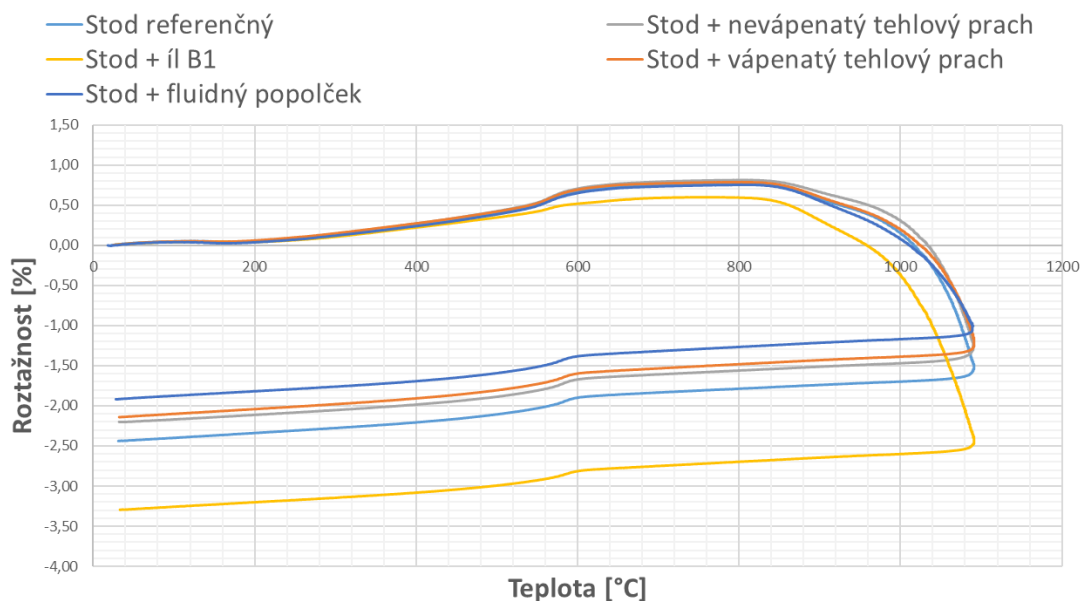
Do grafu DKTA bola umelo pridaná chladiaca krivka (označená sivým pozadím) pri nižšej maximálnej teplote výpalu. Táto krivka ukazuje ako by vyzerala páliaca krivka, keby bola maximálna teplota v Stodskej zmesi nižšia. Tento fakt potvrdzuje aj tabuľka 15 a 16, kde je jasne viditeľné, že znížením maximálnej teploty sa docielia nižšie zmraštenie vypáleného črepu. Vápenatá zmes pri maximálnej teplote výpalu 1020 °C vykazovala dokonca nulové zmraštenie. Pri teplote 850 °C došlo u oboch zmesí až ku predĺženiu vzoriek.

Rýchlosť výpalu na páliacu krivku v nevápenatej zmesi Stod nemá vplyv, pretože v tejto výr. zmesi nevzniká redukčné jadro a nedochádza k nafúknutiu v oblasti teplôt 900 – 1080 °C. Tento fakt nie je zapríčinený obsahom kalcitu v surovine. Je to spôsobené tým že Hranická výr. zmes je veľmi jemne namletá kvôli odstráneniu cicvárov. Stodská výrobná zmes má hrubšiu granulometriu (dokazuje krivka zrnitosti v kapitole 9.2.1.1).

## 10.2.2 Vyhodnotenie II. etapy

Tabuľka 22: Porovnanie vlastností počas výpalu na nevápenatej zmesi s prímiesami (vzorky 100x50x20 mm)

Rýchlosť výpalu 4°C/min při max. teplote 1060 °C			
označenie	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
NS	-2,96	-8,41	4,60
NS + FP	-2,11	-6,07	4,72
NS + N prach	-3,00	-7,65	4,15
NS + V prach	-2,60	-7,26	4,31
NS + B1	-3,61	-8,38	5,65



Obrázok 37: Porovnanie DKTA nevápenatých zmesí s prímiesami

Pri rozklade ílových minerálov dochádza k najväčšej strate hmotnosti pálením. Tento fakt popisuje prečo Stodská výrobná zmes s prímiesou ílu B1 stratila najväčšie množstvo hmotnosti z porovnávaných zmesí. Íl B1 kvôli svojmu vysokému obsahu kaolinitu je doprevádzaný aj veľmi dobrou slínavosťou v okolí teploty 1000 °C a spôsobuje vyššie zmrašťovanie ako Stodská zmes.

Tabuľka 23: Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prímiesami časť 1 (vzorky 100x50x20 mm)

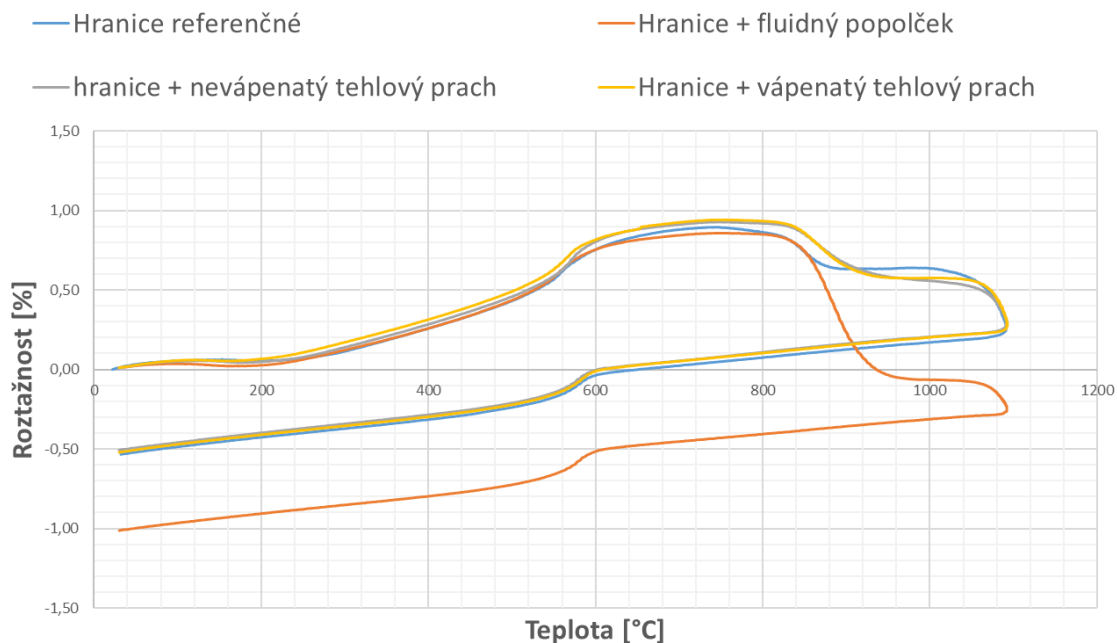
Rýchlosť výpalu 2 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C			
označenie	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
VH	-0,38	-6,53	7,50
VH + FP	-0,88	-5,15	7,39
VH + N prach	-0,43	-5,26	6,74
VH + DPN prach	-0,35	-5,77	6,79
VH + V prach	-0,75	-6,16	6,87

Tabuľka 24: Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prísadami časť 2 (vzorky 100x50x20 mm)

Rýchlosť výpalu 4 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C			
označenie	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
VH	-0,94	-6,98	7,60
VH + FP	-1,26	-5,67	7,34
VH + N prach	-0,75	-5,26	6,81
VH + DPN prach	-0,57	-5,63	6,83
VH + V prach	-0,72	-5,88	6,8

Tabuľka 25: Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prísadami časť 3 (vzorky 100x50x20 mm)

Rýchlosť výpalu 6 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C			
označenie vápenatej suroviny	DP [%]	DC [%]	ZP [%]
VH	-0,83	-7,05	7,66
VH + FP	-0,91	-5,17	7,34
VH + N prach	-0,94	-5,45	6,75
VH + DPN prach	-0,72	-6,11	6,79
VH + V prach	-0,75	-6,16	6,82



Obrázok 38: porovnanie DKTA vápenatých zmesí s prímiesami

Hranická zmes sa vyznačuje väčšou stratou hmotnosti pálením. Táto zmena nastáva pravdepodobne tým, že surovina obsahuje kalcit, ktorý sa pri teplote 600-750 °C rozkladá. Zmes s fluidným popolčekom vykazuje v rozmedzí teplôt 850-950 °C väčšie zmrašťovanie, čo môže byť spôsobené rozkladom kalcitu vápenatej zmesi aj fluidného popolčeka [].

Rozdiel v strate hmotnosti pálením medzi jednotlivými zmesami je zapríčinený redukciami ílových minerálov a kalcitu pomocou prísad. Rozdiel medzi vápenatým tehlovým prachom a nevápenatým je pri výpale zanedbateľný.



## 10.3 Porovnanie vlastností črepu po výpale

### 10.3.1 Vyhodnotenie I. etapy

Tabuľka 26: Vypočítané hodnoty pre nevápenaté Stodské vzorky – vzorky z plástu

max. vyp. Teplota	rýchlosť výpalu [°C/min]	N <sub>atm</sub> [%]	N <sub>vak</sub> [%]	ρ[kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>po</sub> [MPa]
1060	0,5	4,4	4,5	2190	9,9	2430	10,7
	1	4,1	4,2	2201	9,3	2430	11,7
	2	4,5	4,7	2190	10,3	2450	20,6
	3	4,4	4,5	2200	10,0	2440	7,5
	4	4,0	4,0	2230	9,0	2440	14,2
	6	4,0	4,0	2200	8,8	2410	12,0
1020	2	6,3	6,4	2120	13,6	2450	8,0
850	4	11,5	11,7	1980	23,0	2570	7,0

Nevápenaté vzorky, ktoré boli vytvorené z plástov sa podrobili výpale pri maximálnej teplote 1060 °C. Hľadala sa rýchlosť nábehu teploty počas výpalu, pri ktorej by vzniklo nejaké redukčné jadro. Posledná skúšaná rýchlosť bola 6 °C/min, no ani pri nej redukčné jadro nevzniklo. Z týchto výsledkov sa dá dedukovať, že redukčné jadro nevzniká ani pri vysokej rýchlosti nábehu teploty počas výpalu. Je to pravdepodobne zapríčinené hrubšou granulometriou, kedy počas výpalu nenastane stav nedostatku kyslíka vo vnútri črepu. Hrubšie zrna nevytvoria tak dokonalé slinutie povrchovej vrstvy ako je to u veľmi jemnozrnnej výr.zmesi.

Po zistení, že v Stodskej výr. zmesi nie je možné vytvoriť redukčné jadro v závislosti na rýchlosti nábehu teploty, sa výskum začal orientovať na zistenie optimálnych fyzikálne mechanických vlastností v závislosti na rýchlosti nábehu teploty. Najlepšie vlastnosti, vzhľadom na výrobu pálených strešných tašiek, vykazovali vzorky pri rýchlosti nábehu teploty 4 °C/min. Vzorky vykazovali nízku nasiakavosť (len 4,0 %), čo by malo korelovať s vysokou mrazuvzdornosťou. Ďalej mali tieto vzorky najlepšie hodnoty presiakavosti a vzliňavosti, čo bude popísané v ďalšej kapitole. Pevnosť v ťahu pri ohybe vyšla druhá najvyššia v hodnote 14,2 MPa, čo je pre pálenú krytinu úplne dostačujúce. Zaujímavá je hodnota pevnosti v ťahu pri ohybe získaná zo vzoriek vypaľovaných pri rýchlosti 3 °C/min. Pevnosť vyšla v hodnote 7,5 MPa,

čo sa môže zdať málo v porovnaní s ostatnými vzorkami vypaľovaných pri maximálnej teplote výpalu 1060 °C.

Vykonal sa výpal aj pri maximálnych teplotách 850 °C a 1020 °C pre stanovenie, či nevykazujú vzorky pri týchto max. teplotách lepšie vlastnosti. S nižšou maximálnou teplotou výpalu narastá nasiakavosť a zdanlivá pórovitosť v Stodskej zmesi, čo môže nevhodne ovplyvniť mrazuvzdornosť črepu. Zároveň klesá pevnosť v ťahu pri ohybe. Každopádne zaujímavé je stanovenie vzĺnavosti a presiakavosti na vzorkách o max. teplote výpalu 850 a 1020 °C, popísané v kapitole 10.4.

Tabuľka 27: vypočítané hodnoty pre vápenaté Hranické vzorky - vzorky z plástu

rýchlosť výpalu [°C/min]	max. vyp. Teplota	N <sub>atm</sub> [%]	N <sub>vak</sub> [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>po</sub> [MPa]
0,5	1060	7,9	8,9	1980	17,6	2400	14,1
1		6,9	7,3	1980	14,5	2320	9,6
2		5,6	6,6	1880	12,5	2160	16,2
3		5,9	6,3	1830	11,6	2070	12,3
4		5,8	6,4	1750	11,2	1970	18,7
2	1020	7,7	8,4	1940	16,3	2320	11,1
2	850	9,4	9,4	1920	18,0	2350	16,2

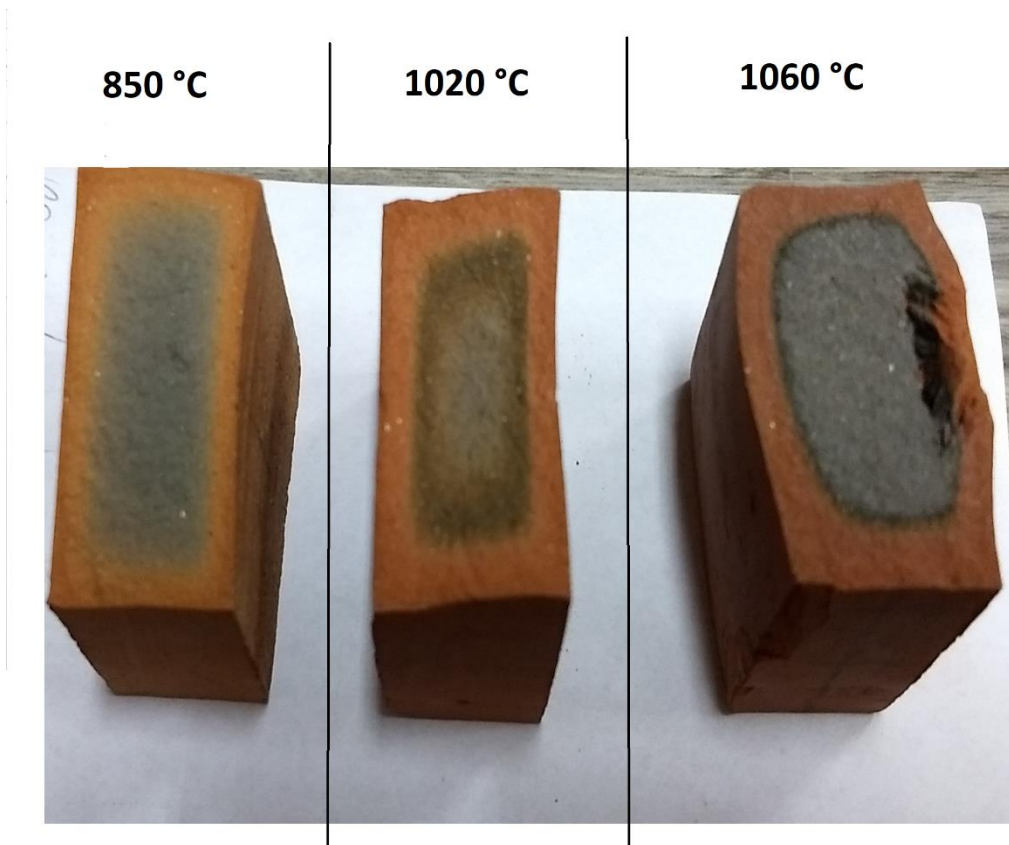
Hranické vzorky sa správajú inak ako Stodské, kvôli výskytu redukčného jadra. Vzorky vypálené na maximálnu teplotu 850 °C majú dokonca najvyššiu pevnosť pri ohybe (ak neberieme nafúknuté črepy). Majú podobnú zdanlivú pórovitosť a objemovú hmotnosť ako vzorky vypálené pri rýchlosti výpalu 2 °C/min a majú o niečo vyššiu nasiakavosť, pozri tabuľku 22.

Zdanlivá pórovitosť udáva len množstvo otvorených pórov a v prípade redukčného jadra pórov v povrchovej vrstve, pretože medzi povrchovou vrstvou a redukčným jadrom je horšie prepojenie pórov a voda pri nasiakavosti vo vákuu sa do nich dostane pravdepodobne len čiastočne.

Redukčné jadro vzniká, pri maximálnej teplote výpalu 850 °C, rovnakej veľkosti ako pri 1020 a 1060 °C. Je to zapríčinené tým, že k redukcii železa dochádza pod teplotou 850 °C. Na obrázku 23 je viditeľný rozdiel redukčného jadra v závislosti na maximálnej vypaľovacej teplote. Redukčné jadro pri max. teplote 1060 °C je väčšie ako ostatné len kvôli nafúknutiu črepu kvôli

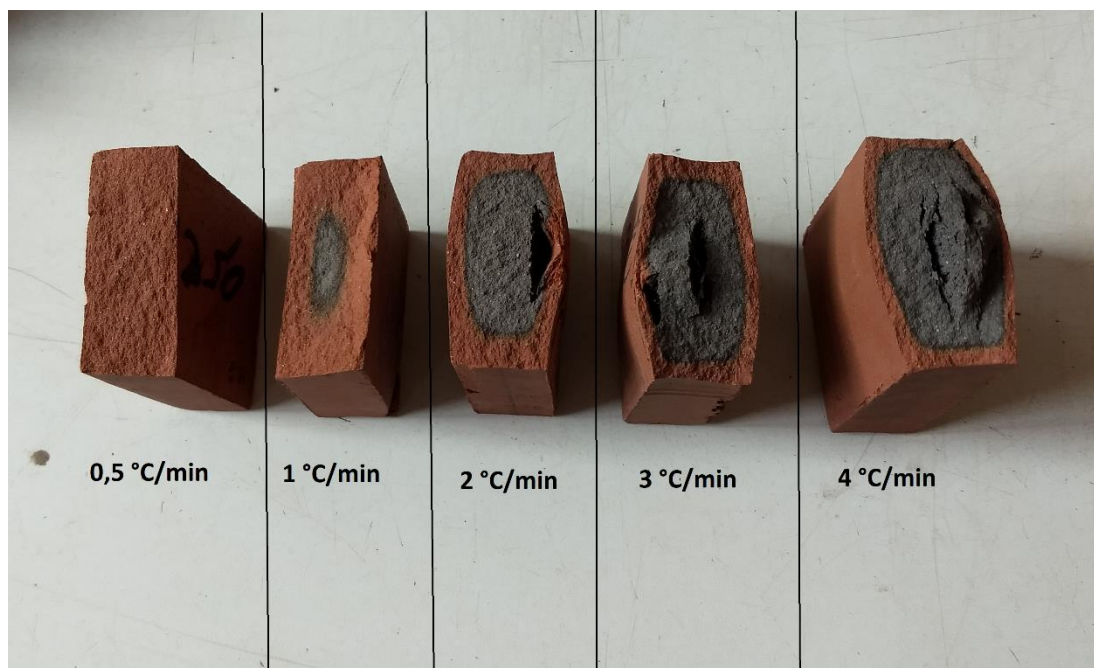
zadržiavanie plynov z rozkladu uhličitanov vo vnútri črepu. Povrchová vrstva má ale tendenciu slinovaním sa zmrašťovať.

Uzavretie redukčného jadra vo vnútri črepu pri teplote 950 - 1000 °C môže byť spôsobené aj redukciou  $\text{Fe}^{3+}$  na  $\text{Fe}^{2+}$  a následnou reakciou s  $\text{SiO}_2$  za vzniku ľahko tavitelných zlúčenín a uvoľňovania kyslíka  $\text{O}_2$  [1].



Obrázok 39: Vplyv maximálnej vypaľovacej teploty na vznik redukčného jadra pri rýchlosti výpalu 2 °C/min

Obrázok 30 znázorňuje zmenu veľkosti redukčného jadra v závislosti na rýchlosti výpalu. K nafúknutiu črepu došlo už pri rýchlosti 2 °C/min. Tento výsledok je rozdielny oproti bakalárskej práci [21], v ktorej sa nafúknutie črepu neprejavilo pri rovnakej rýchlosti výpalu a rozmeroch vzorky (100x50x20mm). To len dokazuje že veľkosť je ovplyvnená aj ďalšími faktormi (pórovitosťou, plnením pece atď.). Eliminácia redukčného jadra nastala len pri rýchlosti výpalu 0,5 °C/min.



Obrázok 40: Vplyv rýchlosti nábehu teploty počas výpalu na veľkosť redukčného jadra

### 10.3.2 Vyhodnotenie II. etapy

Tabuľka 28: Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Stod + prímiesy

označenie	$N_{atm}$ [%]	$N_{vak}$ [%]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{po}$ [MPa]
NS	6,1	7,1	2170	15,4	2560	8,4
NS + FP	11,4	13,1	1920	24,9	2550	7,4
NS + N prach	6,5	7,8	2120	16,6	2540	9,6
NS + V prach	8,1	9,4	2080	19,5	2580	9,2
NS + B1	5,2	5,8	2190	12,6	2500	6,3

Vzorky zo Stodskej nevápenatej výrobnnej zmesi síce redukčné jadro nevytvorili, ale určité kladné vlastnosti využitím prímies sa našli. Využitím nevápenatého prachu došlo len k miernej zmene vlastností nasiakavosti, objemovej hmotnosti, zdanlivej pórovitosti. Pevnosť v ohybe sa dokonca zväčšila z hodnoty 8,4 MPa na 9,6 MPa. Každopádne dôležité sú výsledky z presiakavosti v oblasti pálených strešných tašiek.

Tabuľka 29: Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímеси část 1

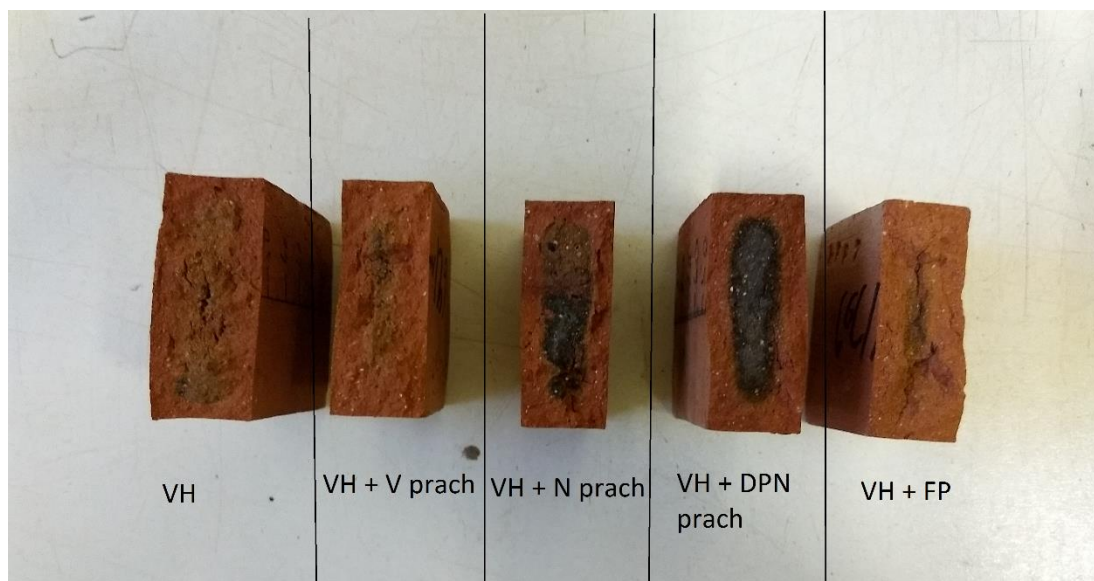
Rýchlosť výpalu 2 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C						
označenie	N <sub>atm</sub> [%]	N <sub>vak</sub> [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>po</sub> [MPa]
VH	10,9	12	1890	22,6	2440	3,7
VH + FP	16,7	18,7	1720	32,1	2530	3,4
VH + N prach	12,1	13,2	1870	24,7	2490	6,5
VH + DPN prach	11,1	12,5	1880	23,3	2450	10,7
VH + V prach	12,9	13,9	1870	25,8	2510	7,6

Tabuľka 30: Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímеси část 2

Rýchlosť výpalu 4 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C						
označenie	N <sub>atm</sub> [%]	N <sub>vak</sub> [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>po</sub> [MPa]
VH	8,3	9,6	1847	17,7	2244	5,5
VH + FP	16,3	18,8	1714	32,2	2526	5,2
VH + N prach	10,0	11,8	1868	22,1	2399	7,5
VH + DPN prach	9,8	11,3	1874	21,2	2378	9,2
VH + V prach	13,0	14,2	1849	26,3	2510	3,6

Tabuľka 31: Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímеси část 3

Rýchlosť výpalu 6 °C/min pri maximálnej teplote 1060 °C						
označenie	N <sub>atm</sub> [%]	N <sub>vak</sub> [%]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ [%]	ZH [kg/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>po</sub> [MPa]
VH	8,3	9,0	1805	16,3	2157	3,3
VH + FP	15,8	18,5	1709	31,7	2503	3,9
VH + N prach	9,1	10,1	1859	18,9	2290	6,6
VH + DPN prach	8,5	10,1	1841	18,6	2261	11,0
VH + V prach	11,9	13,4	1850	24,8	2459	5,3



Obrázok 41: Závaznosť použitej prímеси na veľkosti redukčného jadra pri rýchlosti nábehu teploty počas výpalu 6 °C/min (max. teplota výpalu 1060 °C)

Z laboratórnych výsledkov vložených v tejto kapitole sa zistili nasledujúce informácie. Viditeľné Redukčné jadro vznikalo až pri rýchlosti výpalu 6 °C/min. Je to pravdepodobne spôsobené tým, že vzorky sa vyrábali len ručný hnetení a potom tĺkaním do formy. Počas výroby nebolo vykonané také zhutnenie výliskov ako pri vzorkách z plástu. To sa odzrkadlilo na nižšej objemovej hmotnosti a vyššej pórovitosti vzoriek ako u vzoriek z plástu. Zvýšením rýchlosti výpalu sa ale podarilo redukčné jadro vytvoriť a mohli sa pozorovať zmeny pri použití rôznych prímесí.

Najlepšie viditeľné redukčné jadro vzniklo pri vzorkách VH + DPN prach. Najväčšie ale bolo pri vzorkách VH. Vo vzorkách VH vzniklo aj nafúknutie črepu, redukčné jadro je však slabo viditeľné kvôli nerovnomerným trhlinkám vzniknutých počas výroby. Určitá časť jadra tým pádom mala väčší prístup kyslíka počas výpalu oproti ostatným častiam a vzniklo nerovnomerné redukčné jadro.

K najúčinnejšiemu eliminovaniu redukčného jadra došlo pri využití prímеси vápenatý tehlový prach. Pri tejto vzorke je viditeľne len malé slabo viditeľné redukčné jadro. Fluidný popolček takisto znížil veľkosť redukčného jadra.

Vzorky VH + FP sa vyznačovali najvyššou zdanlivou pórovitosťou a z toho vychádza účinok na zníženie redukčného jadra, aj keď hlavný je

medián polomeru pórov [11]. Tehlové prachy boli všetky rozdielnej granulometrie. Je vidno, že vápenatý prach eliminoval najlepšie redukčné jadro a vyznačoval sa hrubozrnnejšou granulometriou ako ostatné prachy. Takisto vzorky VH + V prach mali o 6 % vyššiu zdanlivú pórovitosť ako VH + DPN prach a VH + N prach. Či má obsah kalcitu, voľného vápna alebo anortitu vplyv na redukčné jadro sa v tejto práci nedokázalo ani nevyvrátilo.

# 10.4 Presiakavosť

## 10.4.1 Vyhodnotenie I. etapy

Tabuľka 32: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlinavosti pre vzorky NSP

čas merania [min]	rýchlosť výpalu [°C/min]												Max. vypalovacia teplota [°C]	označenie vzorky					
	0,5		1		2		3		4		6				2	4			
	NSP1	NSP2	NSP4	NSP5	NSP7	NSP8	NSP10	NSP11	NSP14	NSP15	NSP18	NSP19			NSP20	NSP16	NSP17	NSP25	NSP22
5	14	11	13	11	14	14	13	12	11	13	11	11	11	15	15	15	10	10	10
10	14	12	15	13	15	15	14	13	14	15	12	12	12	17	17	17	11	11	11
15	15	14	16	14	15	15	15	14	15	16	13	13	13	19	19	19	14	14	15
20	15	14	18	15	17	16	14	15	15	16	14	14	14	20	20	20	15	15	15
25	16	14	18	15	18	16	15	15	17	18	15	15	15	22	21	21	15	15	15
30	17	14	19	17	20	17	16	15	17	18	16	16	16	22	23	23	15	15	15
35	18	14	20	18	21	17	16	15	18	19	17	17	17	23	24	25	16	16	17
40	20	15	20	19	21	17	16	15	19	20	18	18	18	25	25	25	16	16	17
45	20	15	20	20	21	17	16	15	20	20	19	19	19	26	26	26	15	15	19
50	20	15	20	20	23	18	16	15	20	20	20	20	20	26	27	28	16	16	19
55	20	15	20	20	25	19	18	17	20	20	20	20	20	27	28	29	16	16	19
60	20	15	20	20	26	20	19	19	20	20	21	21	21	29	30	30	17	17	19
65	20	15	20	20	27	20	20	20	20	20	21	21	21	29	30	30	17	17	19
70	21	15	21	20	30	20	20	20	20	20	22	22	22	30	31	31	17	17	19
75	23	15	23	20	30	20	21	21	21	21	23	23	23	31	33	33	17	17	19
80	25	15	25	20	30	20	23	21	21	22	23	23	23	32	35	35	18	18	20
85	25	15	25	20	30	20	25	22	22	24	24	24	24	35	35	35	18	18	20
90	25	15	25	20	30	20	26	22	22	25	25	25	25	38	38	37	18	18	20
ms [g]	162,12	163,66	162,32	161,73	160,53	162,49	160,72	163,95	164,7	164,36	161,89	163,46	163,26	164,62	163,54	162,02	160,83	164,39	163,28
mv [g]	164,22	165,68	164,62	163,54	162,8	164,18	162,25	165,71	166,11	166,1	163,41	165,27	165,32	168,4	167,8	165,84	164,2	168,25	167,03
Δm [g]	2,1	2,02	2,3	1,81	2,27	1,69	1,53	1,76	1,41	1,74	1,52	1,81	2,06	3,78	4,26	3,82	3,37	3,86	3,75
Δm [%]	1,26		1,27		1,23		1,01		0,96		1,10		2,42		2,25				



Tabuľka 33: Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách NSP

	Maximálna teplota výpalu [°C]							
	1060						1020	850
	rýchlosť výpalu [°C/min]							
	0,5	1	2	3	4	6	2	4
DPV [h] <sup>*1</sup>	3,775	4,6	2,96	5,36	6,55	2,52	3,625	6,16

\*1 Doba, za ktorú presiakla vzorka

Na Stodských vzorkách vyrobených z plástu boli porovnávané vlastnosti vzlínavosti a presiakavosti. Vzlínavosťou sa nepriamo môžu posudzovať vlastnosti presiakavosti. Obecne platí, že ak vzorka prekročí hodnotu vzlínavosti 50 mm za 90 min, tak sa vyhodnotí za nevyhovujúcu (nazývané kritérium presiakavosti). Zo skúšky vzlínavosti sa dá však zistiť aj množstvo vzlínutej vody z rozdielu hmotností pred skúškou a po skúške. Takže spojením skúšky presiakavosti a vzlínavosti sa dajú získať celkom hodnotné výsledky presiakavosti črepu.

Z výsledkov na Stodskej výrobnéj zmesi z plástu je zrejmé, že najlepšou variantou v závislosti rýchlosti výpalu a maximálnej teploty výpalu sú vzorky vypálené na teplotu 1060 °C pri rýchlosti 4 °C/min a vzorky vypálené na teplotu 850 °C pri rýchlosti 4 °C/min. Tieto vzorky sa vyznačovali dobou presiaknutia až v okolí 6 h. Ich výsledná hodnota vzlínavosti po 90 min sa pohybovala v rozmedzí podobných hodnôt 18 – 22 mm. Zaujímavý je rozdiel medzi množstvom nasiaknutej vody pomocou skúšky vzlínavosti. Vzorky pri maximálnej teplote výpalu 1060 °C a rýchlosti 4 °C/min nasiakli do seba 0,96 % vody a vzorky pri max. teplote 850 °C a rýchlosti 4 °C/min do seba nasiakli 2,25 % vody. Tieto výsledky odzrkadľujú aj hodnoty nasiakavosti týchto vzoriek. Z toho vyplýva, že vzorky pri nižšej teplote síce nasiaknu do svojej pórovitejšej štruktúry viac vody, ale prepojenie pórov, trhlín je nízke. Obidva typy výpalu sú optimálne z hľadiska presiakavosti.

Tabuľka 34: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlinavosti pre vzorky VHP

čas merania [min]	typ výpalu [°C/min]									
	0,5		1		2			2		
	Max. vypalovacia teplota [°C]									
	1060				1020			850		
	označenie vzorky									
	VHP2	VHP3	VHP4	VHP5	VHP13	VHP14	VHP16	VHP25	VHP26	VHP27
Výška vzlinutia [mm]										
5	14	13	14	13	14	15	15	10	10	10
10	16	15	15	14	16	18	15	10	10	10
15	18	17	17	16	19	20	15	11	11	11
20	20	19	23	21	20	21	21	11	11	11
25	21	19	25	21	22	25	21	11	12	11
30	23	21	27	23	24	26	23	11	12	11
35	25	22	30	24	25	26	25	12	12	14
40	26	24	30	24	26	26	26	12	13	12
45	27	25	34	25	29	30	30	14	14	12
50	27	26	34	27	30	30	30	14	15	14
55	30	29	35	29	30	30	30	16	17	17
60	31	29	35	30	31	32	32	16	17	17
65	33	30	35	30	32	32	32	16	17	17
70	35	30	36	31	34	32	34	16	17	17
75	36	31	37	31	34	34	34	16	17	17
80	37	31	37	31	35	35	35	16	17	17
85	38	32	38	32	36	35	35	16	18	18
90	39	32	39	33	36	36	36	16	18	19
ms [g]	170,71	176,22	173,18	173,86	169,89	171,23	172,5	168,07	166,37	167,58
mv [g]	175,86	181,53	177,94	177,89	174,2	176,4	177,64	170,04	168,65	169,9
Δm [g]	5,15	5,31	4,76	4,03	4,31	5,17	5,14	1,97	2,28	2,32
Δm [g]	5,23		4,39		4,87			2,19		
Δm [%]	3,02		2,53		2,85			1,31		

Tabuľka 35: Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách VHP

DPV [h]	Maximálna teplota výpalu [°C]			
	1060		1020	850
	rýchlosť výpalu [°C/min]			
	0,5	1	2	2
		1,17	3,25	3,75

Skúšky vzlinavosti a presiakavosti neboli vyhodnotené na vápenatých Hranických vzorkách, pri ktorých došlo k nafúknutiu, pretože také vzorky sú pre prax (minimálne kvôli rozmerovej nestálosti) nepoužiteľné. Z porovnávaných vzoriek nedošlo k vzniku redukčného jadra len pri max. teplote výpalu 1060 °C a rýchlosti 0,5 °C/min. Ostatné vzorky vykazovali redukčné jadro, pozri obrázok 39.

Už v bakalárskej práci [21] bolo zistené, že so zväčšujúcim redukčným jadrom sa zväčšuje schopnosť vypáleného črepu odolávať presiaknutiu.

Z daných výsledkov diplomovej práce je očividné, že zmena maximálnej teploty výpalu z 1060 na 1020 °C nezvýši veľmi schopnosť odolať presiaknutiu vo vypálenom črepe ale zníženie teploty výpalu na max. teplotu 850 °C zdvojnásobí dobu, za ktorú presiakne vzorka. Vzĺnavosť len potvrdzuje výsledky, keď pri max. teplote výpalu 850 °C dôjde ku výške vzĺnutia len 16-19 mm. Dokonca nastane nasiaknutie len 1,31 % pomocou skúšky vzĺnavosti, čo je oproti Stodským nevápenatým vzorkám o polovicu nižšia hodnota pri rovnakej max. teplote výpalu 850 °C.

Ešte je potrebné poznamenať, že kritériu presiakavosti 50 mm/90 min vyhovel všetky vzorky vyrobené z plástu.

## 10.4.2 Vyhodnotenie II. Etapy

Tabuľka 36: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzĺnavosti pre vzorky NS + prímiesi

čas merania [min]	rýchlosť výpalu 4 °C/min pri max. teplote 1060 °C				
	Označenie vzorky nevápnitých surovín s prímiesami				
	NS	NS + B1	NS + FP	NS + V prach	NS + N prach
5	15	10	32	26	25
10	25	15	42	32	30
15	28	18	48	30	30
20	28	20	<b>55</b>	35	35
25	30	23	<b>60</b>	40	38
30	33	25	<b>65</b>	45	40
35	33	25	<b>69</b>	46	44
40	33	25	<b>72</b>	48	48
45	33	25	<b>77</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
50	40	20	<b>80</b>	<b>59</b>	<b>53</b>
55	45	20	<b>85</b>	<b>55</b>	<b>55</b>
60	45	25	<b>87</b>	<b>57</b>	<b>55</b>
65	45	25	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
70	45	25	<b>95</b>	<b>65</b>	<b>60</b>
75	46	25	<b>95</b>	<b>65</b>	<b>62</b>
80	46	25	<b>95</b>	<b>65</b>	<b>63</b>
85	<b>50</b>	26	<b>95</b>	<b>68</b>	<b>64</b>
90	<b>50</b>	<b>27</b>	<b>95</b>	<b>70</b>	<b>65</b>
ms [g]	159,91	157,67	156,2	159,3	159,65
mv [g]	164,8	159,7	172,26	167,12	166,92
Δm [g]	4,89	2,03	16,06	7,82	7,27
Δm [%]	<b>3,06</b>	<b>1,29</b>	<b>10,28</b>	<b>4,91</b>	<b>4,55</b>

Tabuľka 37: Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách NS + prímеси

označenie	DPV [h]
NS	0,5
NS + FP	0,12
NS + N prach	0,33
NS + V prach	0,23
NS + B1	3

V II. etape presiakavosti boli porovnávané vzorky, ktoré vznikli ručným hnetením a vlačovaním do formy. Výsledky boli značne odlišné. Rozdiel vo výrobe spôsobil nedostatočnú hutnosť, trhlinky a pri výpale na vysokú teplotu 1060 °C pravdepodobne zlepšenie prepojenia pórov rozkladom uhličitanov.

Prekvapivé výsledky ponúkli vzorky Stodu s prímесou ílu B1. U týchto vzoriek bolo Bigotovou krivkou zistené najväčšie zmráštenie. Tieto vzorky sa dostali na hodnotu presiaknutia vzorky až 3 h, výšku vzlinutia 27 mm a zmenu hmotnosti nasiaknutím pomocou skúšky vzlinavosti len 1,29 %.

Ostatné vzorky dosahovali hodnôt DPV pod 0,51 h, pričom najlepšie výsledky mali referenčné Stodské vzorky. Hodnoty dosahovali DPV = 0,5 h, výšku vzlinutia 50 mm, čo tesne nespĺňuje kritérium presiakavosti.

DPV u vzoriek s prímесou fluidného popolčeka dosahovalo len 0,12 h a vzorky počas skúšky vzlinavosti úplne presiakli.

Vzniká otázka aká by platila analógia keby boli vzorky s prímесami vyrábané na vákuovom šnekovom lise tehliarskou technológiou.

Tabuľka 38: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlinavosti pre vzorky VH + prímеси

čas merania [min]	rýchlosť výpalu 2 °C/min pri max. teplote 1060 °C				
	Označenie				
	VH	VH + FP	VH + N prach	VH + DPN prach	VH + V prach
5	20	30	26	25	22
10	22	35	28	28	26
15	23	40	31	31	30
20	25	47	36	38	35
25	30	<u>52</u>	37	40	40
30	30	<u>55</u>	40	43	42
35	30	<u>60</u>	43	45	45
40	35	<u>65</u>	46	48	49
45	35	<u>70</u>	48	<u>50</u>	<u>50</u>
50	39	<u>75</u>	<u>52</u>	<u>55</u>	<u>51</u>
55	40	<u>78</u>	<u>55</u>	<u>57</u>	<u>55</u>
60	40	<u>80</u>	<u>57</u>	<u>59</u>	<u>56</u>
65	42	<u>82</u>	<u>57</u>	<u>60</u>	<u>59</u>
70	44	<u>86</u>	<u>57</u>	<u>62</u>	<u>62</u>
75	45	<u>90</u>	<u>60</u>	<u>65</u>	<u>65</u>
80	45	<u>95</u>	<u>62</u>	<u>67</u>	<u>66</u>
85	46	<u>95</u>	<u>64</u>	<u>67</u>	<u>69</u>
90	48	<u>95</u>	<u>65</u>	<u>68</u>	<u>70</u>
ms [g]	144,42	139,65	150,8	148,72	147,41
mv [g]	151,16	160,34	161,89	160	160,81
Δm [g]	6,74	20,69	11,09	11,28	13,4
Δm [%]	4,67	14,82	7,35	7,58	9,09

Tabuľka 39: Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách VH + prímеси pri rýchlosti výpalu 2 °C/min

označenie	DPV [h]
VH	0,25
VH + FP	0,12
VH + N prach	0,27
VH + DPN prach	0,27
VH + V prach	0,23

Tabuľka 40: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlínivosti pre vzorky VH + prímеси časť 2

čas merania [min]	rýchlosť výpalu 4 °C/min pri max. teplote 1060 °C				
	Označenie				
	VH	VH + FP	VH + N prach	VH + DPN prach	VH + V prach
5	16	27	20	20	21
10	20	36	21	22	27
15	21	40	28	29	31
20	25	<u>56</u>	30	31	36
25	28	<u>58</u>	32	33	39
30	30	<u>60</u>	35	35	42
35	30	<u>65</u>	39	40	47
40	32	<u>70</u>	40	41	49
45	35	<u>72</u>	41	45	<u>50</u>
50	39	<u>75</u>	45	45	<u>54</u>
55	39	<u>80</u>	46	48	<u>54</u>
60	40	<u>82</u>	48	<u>50</u>	<u>60</u>
65	40	<u>85</u>	<u>50</u>	<u>51</u>	<u>60</u>
70	40	<u>87</u>	<u>50</u>	<u>52</u>	<u>62</u>
75	40	<u>90</u>	<u>50</u>	<u>52</u>	<u>65</u>
80	40	<u>93</u>	<u>51</u>	<u>55</u>	<u>65</u>
85	41	<u>95</u>	<u>53</u>	<u>56</u>	<u>66</u>
90	41	<u>97</u>	<u>54</u>	<u>57</u>	<u>66</u>
ms [g]	146,19	135,09	151,98	150,6	147,07
mv [g]	150,96	154,59	159,43	158,96	159,05
Δm [g]	4,77	19,5	7,45	8,36	11,98
Δm [%]	3,26	14,43	4,90	5,55	8,15

Tabuľka 41: Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzĺnavosti pre vzorky VH + prímiesi časť 3

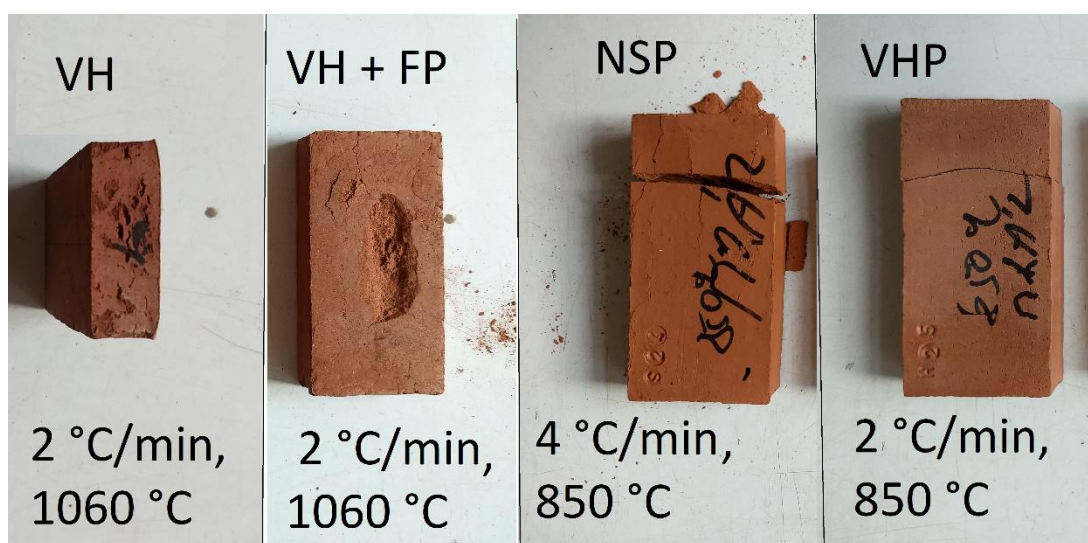
čas merania [min]	rýchlosť výpalu 6 °C/min pri max. teplote 1060 °C				
	Označenie				
	VH	VH + FP	VH + N prach	VH + DPN prach	VH + V prach
5	20	25	27	21	20
10	22	34	30	26	26
15	26	39	31	30	30
20	30	47	35	33	34
25	31	50	38	37	37
30	33	52	40	40	40
35	35	58	42	42	45
40	38	<u>62</u>	45	44	48
45	40	<u>65</u>	45	45	<u>50</u>
50	40	<u>69</u>	46	47	<u>51</u>
55	41	<u>72</u>	49	<u>50</u>	<u>54</u>
60	41	<u>76</u>	<u>50</u>	<u>51</u>	<u>55</u>
65	42	<u>78</u>	<u>51</u>	<u>52</u>	<u>57</u>
70	42	<u>80</u>	<u>53</u>	<u>53</u>	<u>60</u>
75	45	<u>82</u>	<u>54</u>	<u>55</u>	<u>60</u>
80	46	<u>84</u>	<u>56</u>	<u>56</u>	<u>62</u>
85	46	<u>86</u>	<u>56</u>	<u>58</u>	<u>64</u>
90	46	<u>87</u>	<u>57</u>	<u>60</u>	<u>66</u>
ms [g]	140,99	138,43	152,39	150,51	147,93
mv [g]	145,88	156,23	159,9	157,33	158,71
Δm [g]	4,89	17,8	7,51	6,82	10,78
Δm [%]	3,47	12,86	4,93	4,53	7,29

Hranické vzorky pri rýchlosti nábehu teploty 2 °C/min vykazovali najhoršie hodnoty vzĺnavosti. Vzorky s prímiesou fluidného popolčeka aj v tomto prípade prekročil kritérium presiakavosti už po 25 min merania.

Pri rýchlosti nábehu teploty 4°C/min sa výšky vzĺnavosti aj množstvo nasiaknutej vody zmenil k lepšiemu. Pri tejto rýchlosti výpalu už začalo vznikáť určité redukčné jadro.

## 10.5 Pôsobenie zmrazovacích cyklov

Kvôli časovej náročnosti skúšky mrazuvzdornosti a dostatočnom množstve odbornej literatúry vyjadrujúcej k vplyvu redukčného jadra na mrazuvzdornosť bola v diplomovej práci vykonaná nenormová metóda mrazuvzdornosti. Vzorky sa podrobili 25 zmrazovacím cyklom a pozorovalo sa narušenie štruktúry črepu. K úplnému rozpadnutiu došlo u nevápenatej vzorky s maximálnou teplotou výpalu 850 °C. U vápenatej vzorky s maximálnou teplotou výpalu zase došlo k rozlomeniu vzorky na poli. K narušeniu štruktúry došlo u vzoriek VH + FP a VH vypaľovaných pri rýchlosti nábehu teploty 2 °C/min a max. teplote 1060 °C. Vzorky s prímiesami s vyššou rýchlosťou výpalu neboli skúšané. Ostatné vzorky nevykazovali narušenie štruktúry. Ozrejmienie mrazuvzdornosti na vzorkách s prímiesami fluidného popolčeka a tehlového prachu by mohlo byť predmetom ďalšieho výskumu.



Obrázok 42: Porušené vzorky po skúške mrazuvzdornosti poznačenej rýchlosti výpalu a max. teplote výpalu



## 11 Zhrnutie výsledkov

Na základe dosiahnutých výsledkov na vzorkách vyrobených z plástu je možné konštatovať:

- Medzi porovnávanými výrobnými zmesami zo Stodu(nevápenatá) a Hranic(vápenatá) vyplynulo, že redukčné jadro v nevápenatej výrobnej zmesi nevzniká, pravdepodobne kvôli hrubšej granulometrii výrobnej zmesi. Hranické vzorky potvrdili výsledky bakalárskej práce [21], že odlišne vedením výpalom je možné ovplyvňovať veľkosť redukčného jadra. Tentoraz došlo k nafúknutiu črepu už pri rýchlosti nábehu teploty 2 °C/min. Pri rýchlosti 1 °C/min sa už vyskytovalo redukčné jadro. Eliminácia redukčného jadra nastala pri rýchlosti nábehu teploty 0,5 °C/min. Redukčné jadro sa vyskytovalo aj vo vzorkách vypálených na max. teplotu výpalu 850 °C a 1020 °C pri rýchlosti nábehu teploty 2 °C/min. Rozdielne bolo len sfarbenie jadra a pri týchto teplotách nebolo pozorované nafúknutie črepu.
- Vplyv obsahu kalcitu vo výrobnej zmesi nedokázal žiadny vplyv na vývin redukčného jadra. Každopádne to môže byť predmetom ďalšieho výskumu.
- Pri porovnávaní vlastností v závislosti na rýchlosti nábehu teploty počas výpalu a maximálnej teploty výpalu bolo zistené u nevápenatých vzorkách za optimum výpal pri rýchlosti 4 °C/min a maximálnej teplote 1060 °C. Tieto vzorky vykazovali nasiakavosť len 4,0 %, presiaknutie vzorky trvalo až nad 6 h a výška vzlinutia dosahovala hodnôt 22 mm. Pevnosť v ohybe na týchto vzorkách vychádza 14,2 MPa. Sľubné výsledky sa zaznamenali aj pri maximálnej teplote 850 °C a rýchlosti nábehu teploty 4 °C/min. Výška vzlinutia dosahovala len 18-20 mm a doba presiaknutia sa pohybovala takisto nad 6 h, lenže vzorky pri maximálnej teplote výpalu 850 °C sa vyznačujú slabou mrazuvzdornosťou, ktorá je pre výdrž pálenej krytiny podstatná
- Pri porovnávaní vlastností na vápenatých vzorkách sa dospelo k záveru, že najlepšie hodnoty nepresiakavosti (keď vyradíme nafúknuté vzorky) dosahujú vzorky pri maximálnej teplote výpalu 850 °C.

Na základe výsledkov na vzorkách vyrobených ručným hnetením môžeme konštatovať:

- Pomocou prímiesí fluidného popolčeka a prachu z murovacích prvkov je možné znížiť veľkosť redukčného jadra. Vlastnosti presiakavosti sa však pri využití fluidného popolčeka zhoršia oproti referenčnej vzorke. Doba presiaknutia referenčnej Hranickej vzorky vyšla 0,25 h. Hranická zmes s prímiesou fluidného popolčeka sa vyznačovala hodnotou 0,12 h. Najlepší výsledok bol získaný pri využití prímiesi nevápenatého prachu z murovacích prvkov. V tomto prípade bola doba presiaknutia 0,27 h.
- V Stodskej zmesi bol pozorovaný prípadný pozitívny dopad na vlastnosti vypálenej vzorky. Najlepšie výsledky ponúka využitie prímiesi ílu B1, kde sa dosiahla až 6-násobne vyššia doba presiaknutia vzorky ako v referenčnej Stodskej vzorke. Zmes Stod + íl B1.
- Bigotové krivky potvrdili využitie prímiesí ako ostrivo na zníženie zmrašťovania počas sušenia, čo by malo znížiť aj citlivosť k sušeniu

## 12 Záver

Diplomová práca sa v I. etape zaoberá porovnávaním dvoch výrobných zmesí používaných v Českej republike – TONDACH Česká republika s.r.o. na výrobu pálenej strešnej krytiny. Prvým porovnávaným typom je vápenatá výrobná zmes Hranice a druhým nevápenatá výrobná zmes Stod. Tieto zmesi sa vyznačujú veľmi podobným mineralogickým zložením s výnimkou obsahu kalcitu. Ďalším rozdielom je granulometria výrobných zmesí. Stodská zmes neobsahuje vo svojom mineralogickom zložení kalcit a vyznačuje sa hrubšími zrnami s menším množstvom jemného podielu pod 0,063 mm ako Hranická výrobná zmes.

Pri hľadaní spojitosti medzi redukčným jadrom a druhom výrobnej zmesi sa dospelo k záveru, že redukčné jadro vo vzorkách zo Stodskej výrobnej zmesi nevzniká. Kým v Hranických vzorkách došlo k vzniku redukčného jadra už pri rýchlosti náběhu teploty 1 °C/min, Stodské vzorky nezaznamenali ani náznaky redukčného jadra pri rýchlosti náběhu teploty 6 °C/min. K eliminácii redukčného jadra dochádza na vzorkách o rozmeroch 100 x 50 x 20 rýchlosťou náběhu teploty počas výpalu 0,5 °C/min.

Keďže redukčné jadro môže vznikáť pri výrobe pálených strešných tašiek na Hranických vzorkách, je podstatné určiť jeho negatívny dopad na mrazuvzdornosť a presiakavosť. V prípade mrazuvzdornosti je dokázané, že redukčné jadro znižuje mrazuvzdornosť. Záleží však na podmienkach. Pri maximálnej vypaľovacej teplote 850 °C je zníženie ohrozujúce kvalitu tašky, ale pri vypálených vzorkách na teplotu 1060 °C je zníženie mrazuvzdornosti na neprerezaných vzorkách minimálne [10]. Zníženie mrazuvzdornosti je zapríčinené rozdielnou dĺžkovou rozťažnosťou jadra a črepu, kvôli ich rozdielnej pórovitosti [21]. V oblasti presiakavosti redukčné jadro nevykazuje negatívny dopad. Nepresiakavosť sa s veľkosťou redukčného jadra dokonca zvyšuje. Znížením vypaľovacej teploty sa dosiahnu lepšie výsledky presiakavosti, ale mrazuvzdornosť sa znižuje. Problémom vzniku redukčného jadra je, že pri výpale môže dôjsť k nafúknutiu črepu, čím sa stáva strešná taška nepoužiteľná.

Redukčné jadro je možné odstrániť aj využitím chemickej prísady alebo ostriva [9]. II. etapa diplomovej práce sa zaoberá možnosťou využitia prímiesí fluidného popolčeka a prachov z murovacích prvkov.

V II. etape došlo k výrobe vzoriek ručným hnetením a nie šnekovým lisom ako je to pri výrobe plástov. Z tohto dôvodu k vytvoreniu redukčného jadra bolo potrebné použiť rýchlosť nábehu teploty až 6 °C/min. Pri tomto type výpalu bolo spozorované najväčšie redukčné jadro vo vnútri referenčnej Hranickej vzorky a Hranickej vzorky s prímiesou nevápenatého prachu z murovacích prvkov. Pomocou prímiesí fluidného popolčeka a vápenatého prachu z murovacích prvkov sa podarilo znížiť veľkosť redukčného jadra na minimum. Jednalo sa o prach najhrubšej granulometrie. Vplyv vápenca obsiahnutého vo výrobnnej zmesi na veľkosť redukčného jadra sa nezistil (môže byť predmetom ďalšieho výskumu).

Stodská výrobná zmes sa nevyznačovala vznikom redukčného jadra, a preto vznikla snaha nájsť typ výpalu, pri ktorom by sa vzorky vyrobené zo Stodskej výrobnnej zmesi vyznačovali najlepšimi vlastnosťami pre výrobu pálených strešných tašiek. Za optimálny pre výrobu strešných tašiek sa hodnotí výpal pri rýchlosti nábehu teploty 4 °C/min pri max. teplote 1060 °C (s ohľadom na presiakavosť a mrazuvzdornosť) .

Záverom sa dá zhrnúť, že veľkosť redukčného jadra je možné pomocou prachu z murovacích prvkov a fluidného popolčeka znížiť. Prímiesi boli dávkované v množstve 10 hm % z množstva Hranickej zmesi. Pre úplnú elimináciu je potrebný ďalší výskum najlepšie pri výrobe tehliarskou technológiou, pretože pri vytváraní vzoriek ručným hnetením môže dôjsť k nedostatočnej hutnosti vzoriek, čo ďalej negatívne ovplyvňuje vlastnosti (hlavne presiakavosť - vzorky s prímiesou fluidného popolčeka presiakli za 0,12 h.)

## 13 Zoznam použitých zdrojov

1. Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN 80-7204-234-3.
2. Hanykýř. V. Kutzendorfner Technologie keramiky. Vega. Hradec Králové 2001.
3. ŠVEDA, Mikuláš. Čierne jadro v tehliarskych výrobkoch a využitie poznania vzájomných vzťahov medzi fyzikálnymi vlastnosťami črepu v praxi (1. časť). In Silika. Roč. 15, č. 3-4 (2005), s.93-96. ISSN 1213-3930.
4. LACH, V.: Keramika 1. SNTL, Praha, 1986
5. Böhm, I.: Možnosti využitia dreveného odpadu v tehliarskej výrobe. Stavivo, 1984, roč. 62, č. 3, str. 115 - 118
6. LACH, V., NOVOTNÝ, B. VOBORSKÝ, Z.: Vyhořívání uhlíkatých látek zalisovaných do cihlářské suroviny. Cihlářský zpravodaj, 1984, roč. 19, č. 6., s. 229-235
7. LACH, V., VOBORSKÝ, Z.: Další poznatky o vyhořívání uhlíkatých látek z keramického střepeu. s. 95-98
8. ŠVEDA, M. The Reduction Core in Clay Roofing Tiles. Střechy, fasády, izolace, Vol. 13, 2003, No. 1, pp. 36 – 37 (in Slovak).
9. Šveda, M.: Čierne redukčné jadro v pálenej krytine a možnosti jeho odstránenia. Silika, roč. 12, 2002, č. 3–4, str. 96–99
10. Šveda, M. Mrazuvzdornost pálené krytiny s redukčným jádrom. Silika. 2003. Vol. 13, no. 5-6, s. 152-155.
11. ŠVEDA, Mikuláš. Vplyv pórovej štruktúry tehliarskeho črepu na veľkosť redukčného jadra. In Silika. Roč. 18, č. 3-4 (2008), s.100-102. ISSN 1213-3930
12. Yu. E Karev and E I. Bernshtein, "Formation of the black core in high-speed firing of floor tiles," Publ. NIIStroikeramika, Nos. 35 - 36, 71 - 86 (1972).
13. L. Gredmaier, C. J. Banks, R. B. Pearce, Calcium and sulphur distribution in fired clay brick in the presence of a black reduction core using micro X-ray fluorescence mapping

14. H. Violet: Poroton - Ein neuer Hochlochziegel. Sprechsaal, č. 2, 1970
15. Šveda, M.: Frost resistance of brick. American Ceramic Society Bulletin, Vol. 80, No. 9, 2001, pp. 46 -48
16. Seaverson, E., J., Brosman, D., A.: Dehnungserscheinungen beim Gefrieren wassergesättigter Ziegel und deren Auswirkung auf die Frostbeständigkeit. ZI Ziegelindustrie International, Vol. 54, No. 4, 2001, S. 12-19
17. Berthold, H, Thieda, D.: Erkenntnisse zur Ausbildung schwarzer Kerne und zur Frostbeständigkeit schnellgebrannter Dachziegel. Ziegel Zeitschrift, Vol. 5, No. 4, 2000, S. 228-231
18. Sokolář, R.: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, s. 36-37
19. Lach, V., Daňková, M. Mikrostruktura stavebních látek. Brno: VUT Brno, 1991.
20. Šveda, M, Sokolář, R, Janík, B, Štefunková, Z. : Reducing CO2 emissions in the production of porous fired clay bricks. Mater. Sci./Medziagotyra, 23 (2017), pp. 139-143. ISSN 1392-1320
21. Kučera, T. Vliv redukčního jádra na prosákavost a mrazuvzdornost cihelného střepu. Brno, 2018. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické v Brně, Stavebná fakulta, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2018-6-11
22. Keršnerová, L. Možnosti využití fluidních popílků v keramické technologii, Brno, 2015. Dizertační práce (Ph. D.). Vysoké učení technické v Brně, Stavebná fakulta, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2016-5-23
23. Burešová, E. Vývoj podmínek peletizace vedlejších energetických produktů, Brno, 2019. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické v Brně, Stavebná fakulta, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2019-6-10
24. Kovosta – FLUID, A.S. Schéma fluidního kotle [online]. 2013 [cit.2020-01-09]. Dostupné z www: < <http://www.kovosta.cz/schema-fluidního-kotle.html> >
25. Smetanová, L. Studium mikrostruktury střepu tenkostěnných za sucha lisovaných keramických obkladových prvků a návrh surovinové směsi

pro jejich výrobu na bázi elektrárenských popílků. Brno, 2008, 145 s. Dizertační práce. Vedoucí práce Ing. Radomír Sokolář, Ph. D.

26. Fečko, P.; Kušnierová, M.; Lyčková, B.; Čablík, V.; Farkašová, A., Popílký. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0327-5.
27. Erol, M., Küçükbayrak, S., Mericboyu, A., Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production. Fuel [online]. 2006, vol. 86, p. 706 – 714. [cit.2020-01-09]. Dostupné z www: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106003541>>
28. Jak se vyrábějí cihly HELUZ. Vše pro váš dům [online]. 2.11.2008 [cit. 2020-01-09]. Dostupné z www: < <http://www.vseprovasdum.cz/jak-se-vyrabeji-palene-cihly-heluz.html> >
29. Sokolář, R. Vliv kalcitu na zatažení a nevratnou vlhkostní roztažnost cihlářského střepu (Díl1)
30. Řezník, B., Rovnaniková, P., Alkalická aktivace mletého keramického střepu [online]. 2014 [cit.2020-01-09]. Dostupné z www: <[http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so\\_9-10/so\\_05\\_14\\_rezник.pdf](http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_9-10/so_05_14_rezник.pdf) >
31. ČSN 72 1565-11. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení maximální porovnávací rychlosti nezávadného sušení. Stanovení kritické vlhkosti
32. ČSN 72 1565-5. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení délkových změn sušením a pálením
33. ČSN 72 1565-6. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti
34. ČSN EN ISO 10545 – 3. Keramické obkladové prvky - Část 3: Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti, zdánlivé hustoty a objemové hmotnosti
35. ČSN 72 1565-6. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti
36. ČSN EN 539–1. Pálené střešní tašky pro skládané krytiny - Stanovení fyzikálních charakteristik - Část 1: Zkouška prosákavosti
37. ČSN EN 539-2. Pálené střešní tašky pro skládané krytiny - Stanovení fyzikálních charakteristik - Část 2: Zkouška mrazuvzdornosti

38. ČSN 72 1565-14. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení mrazuvzdornosti

39. ČSN 72 1565-7. Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení pevnosti v ohybu



## 14 Zoznam použitých obrázkov

**Obrázok 1:** Priečny rez nafúknutého črepu s redukčným jadrom [8]

**Obrázok 2:** Zjednodušený diagram procesov spôsobujúcich redukčné jadro tehly. CO, SO<sub>2</sub> a vodné pary sú plyny, ktoré vznikajú pri spaľovaní hliny [13]

**Obrázok 3:** Krytina uložená v hornej časti pecného voza [8] [21]

**Obrázok 4:** Krytina uložená v dolnej časti pecného voza [8]

**Obrázok 5:** Závislosť veľkosti redukčného jadra na celkovom objeme pórov v povrchovej vrstve črepu [11]

**Obrázok 6:** Závislosť veľkosti redukčného jadra od percentuálneho podielu pórov o dĺžke polomeru väčšom ako 335 nm (v povrchovej vrstve črepu). [11]

**Obrázok 7:** Detail lomovej plochy pálenej krytiny s redukčným jadrom v jeho okrajovej oblasti [10]

**Obrázok 8:** Skúšobné vzorky po vypálení pri konštantnej vypaľovacej teplote 960 °C. Dávka prísady Vuppor: a – 0 %, b – 0,2 %, c – 0,3 %, d – 0,4 %, e – 0,6 % [9]

**Obrázok 9:** Skúšobné vzorky po vypálení pri konštantnej vypaľovacej teplote 960 °C. Dávka pomletých črepov: a – 0 %, b – 5 %, c – 10 % [9]

**Obrázok 10:** Schéma fluidného spaľovania [24][22]

**Obrázok 11:** Porovnanie mineralogického zloženia vysokoteplotného a fluidného popolčeka [22]

**Obrázok 12:** Mikroštruktúra vysokoteplotného

**Obrázok 13:** Mikroštruktúra fluidného popolčeka Afsin Elbistan [27]

**Obrázok 14:** Granulometria vápenatej výrobnnej zmesi Hranice

**Obrázok 15:** RTG diagram vápenatej výrobnnej zmesi Hranice

**Obrázok 16:** Granulometria nevápenatej výrobnnej zmesi Stod

**Obrázok 17:** RTG diagram nevápenatej výrobnnej zmesi

**Obrázok 18:** Granulometria nevápenatej výrobnnej zmesi Stod s ílom B1

**Obrázok 19:** RTG pre íl B1

- Obrázok 20:** RTG analýza fluidného popolčeka Ledvice [22]
- Obrázok 21:** Granulometria fluidného popolčeka Ledvice
- Obrázok 22:** RTG analýza nevápenatej suroviny pre výrobu tehlového prachu [22]
- Obrázok 23:** Porovnanie krivky zrnitosti **nevápenatého** tehlového prachu priamo dovezeného z výroby a krivky zrnitosti pri dodatočnom pomletí v kolovom mlyne.
- Obrázok 24:** RTG analýza vápenatej tehliarskej zeminy pre výrobu tehlového prachu
- Obrázok 25:** Granulometria vápenatého tehlového prachu Šlapanice
- Obrázok 26:** Porovnanie granulometrie Hranickej nevápenatej výrobnej zmesi ku prímiesiam
- Obrázok 27:** Porovnanie granulometrie výrobných zmesí
- Obrázok 28:** Vzorové vyhodnotenie Bigotovej krivky
- Obrázok 29:** Príklad usporiadania dilatometru: 1 – ocelový plášť, 2 – izolácia, 3 – šamotové izolačné teleso, 4 – regulačný termočlánok, 5 – cussilitové topné teleso, 6 – snímací nástavec so vzorkou, 7 – elektronický snímač [19]
- Obrázok 30:** Porovnanie Bigotovej krivky nevápenatej zmesi vyrobenej z plástu a vápenatej zmesi vyrobenej z plástu
- Obrázok 31:** Porovnanie Bigotových kriviek medzi nevápenatou výrobnou zmesou vytváranou ručne a na šnekovom lise do plástov
- Obrázok 32:** Porovnanie Bigotových kriviek medzi vápenatou výrobnou zmesou vytváranou ručne a na šnekovom lise do plástov
- Obrázok 33:** Porovnanie Bigotových kriviek referenčných zmesí vyrábaných ručne
- Obrázok 34:** Porovnanie Bigotových kriviek nevápenatých surovín zo Stodu s prímiesami
- Obrázok 35:** Porovnanie Bigotových kriviek vápenatých surovín z Hranic s prímiesami
- Obrázok 36:** Porovnanie DKTA vápenatej a nevápenatej zmesí vyrobených z plástu
- Obrázok 37:** Porovnanie DKTA nevápenatých zmesí s prímiesami

**Obrázok 38:** porovnanie DKTA vápenatých zmesí s prísadami

**Obrázok 39:** Vplyv maximálnej vypaľovacej teploty na vznik redukčného jadra pri rýchlosti výpalu

**Obrázok 40:** Vplyv rýchlosti nábehu teploty počas výpalu na veľkosť redukčného jadra

**Obrázok 41:** Závislosť použitej prísady na veľkosti redukčného jadra pri rýchlosti nábehu teploty počas výpalu 6 °C/min ( max. teplota výpalu 1060 °C)

**Obrázok 42:** Porušené vzorky po skúške mrazuvzdornosti poznačenej rýchlosti výpalu a max. teploty výpalu

## 15 Zoznam tabuliek

**Tabuľka 1:** Výskyt prvej trhliny pri skúške mrazuvzdornosti [10]

**Tabuľka 2:** Vplyv prísady Vuppor na vybrané fyzikálne vlastnosti pri plasticite podľa Pfefferkorna = 36 mm [9]

**Tabuľka 3:** Ďalšie chemické prísady s odporúčaným dávkovaním vyskúšané pre elimináciu redukčného jadra [11]

**Tabuľka 4:** Vplyv pomletých črepov z vlastného výmetu na vybrané fyzikálne vlastnosti pri plasticite podľa Pfefferkorna = 32 mm. [9]

**Tabuľka 5:** ďalšie možné ostrivá s odporúčaným dávkovaním pre elimináciu redukčného jadra [11]

**Tabuľka 6:** Celkové prepady pre jednotlivé sita a ich nadsitné

**Tabuľka 7:** Celkový prepad pre jednotlivé sitá a ich nadsitné

**Tabuľka 8:** Celkový prepad pre jednotlivé sitá a ich nadsitné

**Tabuľka 9:** Celkový prepad pre jednotlivé sitá a ich nadsitné

**Tabuľka 10:** Granulometria nevápenatého prachu z murovacích prvkov

**Tabuľka 11:** Granulometria dodatočne pomletého nevápenatého prachu z murovacích prvkov

**Tabuľka 12:** Celkový prepad pre jednotlivé sitá a ich nadsitné

**Tabuľka 13:** Vypočítané hodnoty pred a po sušení pre nevápenatú zmes Stod pri teplote sušenia

**Tabuľka 14:** Vypočítané hodnoty pred a po sušení pre vápenatú zmes Hranice pri teplote sušenia 110 °C

**Tabuľka 15:** Porovnanie vlastností pred a po sušení medzi jednotlivými vzorkami z vápenatého plástu Hranice

**Tabuľka 16:** Porovnanie vlastností pred a po sušení medzi jednotlivými vzorkami z nevápenatého plástu Stod

**Tabuľka 17:** Porovnanie vlastností pred a po sušení nevápenatých surovín s prímiesami

**Tabuľka 18:** Porovnanie vlastností pred a po sušení vápenatých surovín s prímiesami

**Tabuľka 19:** Zmena deformačného modulu podľa Pfefferkorna po zamiešaní zmesi Hranice + Fluidný popolček s vodou a odležaní za neprístupu vzduchu

**Tabuľka 20:** Porovnanie vlastností po výpale na nevápenatej zmesi zo Stodu pri vzorkách vyrobených z plástu na rozmery 100x50x20 mm

**Tabuľka 21:** Porovnanie vlastností po výpale na vápenatej zmesi z Hranic pri vzorkách vyrobených z plástu na rozmery 100x50x20 mm

**Tabuľka 22:** Porovnanie vlastností počas výpalu na nevápenatej zmesi s prímiesami (vzorky 100x50x20 mm)

**Tabuľka 23:** Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prímiesami časť 1 (vzorky 100x50x20 mm)

**Tabuľka 24:** Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prímiesami časť 2 (vzorky 100x50x20 mm)

**Tabuľka 25:** Porovnanie vlastností počas výpalu na vápenatej zmesi s prímiesami časť 3 (vzorky 100x50x20 mm)

**Tabuľka 26:** Vypočítané hodnoty pre nevápenaté Stodské vzorky – vzorky z plástu

**Tabuľka 27:** vypočítané hodnoty pre vápenaté Hranické vzorky - vzorky z plástu

**Tabuľka 28:** Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Stod + prímiesy

**Tabuľka 29:** Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímiesi časť 1

**Tabuľka 30:** Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímiesi časť 2

**Tabuľka 31:** Porovnanie vypočítaných hodnôt pre vzorky Hranice + prímiesi časť 3

**Tabuľka 32:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vztlínivosti pre vzorky NSP

**Tabuľka 33:** Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách NSP

**Tabuľka 34:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vztlínivosti pre vzorky VHP

**Tabuľka 35:** Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách VHP

**Tabuľka 36:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlínavosti pre vzorky NS + prímеси

**Tabuľka 37:** Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách NS + prímеси

**Tabuľka 38:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlínavosti pre vzorky VH + prímеси

**Tabuľka 39:** Porovnanie vlastností presiakavosti na vzorkách VH + prímеси pri rýchlosti výpalu 2 °C/min

**Tabuľka 40:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlínavosti pre vzorky VH + prímеси časť 2

**Tabuľka 41:** Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt vzlínavosti pre vzorky VH + prímеси časť 3