



# 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

# VYHOŘÍVÁNÍ ORGANICKÝCH LEHČIV V CIHLÁŘSKÉM STŘEPU

THE COMBUSTION OF ORGANIC LIGHTWEIGHTING AGENT IN BRICK BODY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milada Kašíková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.

BRNO 2017



# 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
PRACOVISŤE	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	<b>Bc. Milada Kašíková</b>
NÁZEV	Vyhořívání organických lehkiv v cihlářském střepu
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

Vedoucí ústavu

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

Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- [1] Valenta, L. Keramická příručka. Vydavatelství technické literatury. Horní Maršov 1999.  
[2] Motyčka, L. Výpočty v keramice. Silikátová společnost České republiky. Praha, 1996.  
[3] Hanykýř, V, Kutzendorfner. Technologie keramiky. Vega. Hradec Králové 2001.  
[4] Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN 80-7204-234-3

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Standardními lehčivými v cihlářské technologii jsou vyhořívající organické látky, jejichž stále rostoucí podíl v surovinové směsi ve snaze o maximální vylehčení často v praxi vede k problémům regulace výpalu v tunelových pecích. Řešení může spočívat v přesné definici teplotního intervalu, v němž dochází k vyhořívání konkrétního lehčiva.

Cíle diplomové práce:

- shrnout doposud publikované výsledky výzkumu v oblasti vyhořívání organických látek v keramických střepech,
- v rámci experimentální části práce navrhnout metodiku posuzování teplotního intervalu odpovídající vyhořívání organických látek v cihlářském střepu,
- definovat teplotní intervaly vyhořívání nejběžnějších organických cihlářských lehčiv (piliny, papírenský kal, rašelina, petrolekoks, otruby, mouka, sláma) v závislosti na typu použité cihlářské zeminy (vápenatá, nevápnitá a rychlosti nárůstu teploty,
- navrhnout optimální kombinaci organických lehčiv pro možnost maximálního vylehčení střepu a bezproblémovou regulaci pálicího procesu.

Doporučený rozsah práce 60 - 70 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

**VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:**

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

.....

**doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.**

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá vyhoříváním organických látek v cihlářském střepu za použití různých druhů lehčiv pro různé typy zemin. V teoretické části jsou shrnuty jednotlivé způsoby vylehčení a popis organických vyhořívajících látek. V praktické části jsou uvedeny výsledky z jednotlivých experimentů a jednotlivé grafy s průběhem růstu teplot během výpalu za použití jednotlivých vyhořívajících látek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

cihlářský výrobek, vyhořívající lehčivo, organické látky, vylehčení, vyhořívání

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the burnout of organic substances in the brick body using different types of lightener for different types of soils. The theoretical part summarizes the different ways of lightening and a description of burnable organic substances. The practical part contains the results of various experiments and individual graphs with the course of temperature increase during firing using various burnable substances.

## **KEYWORDS**

brick body, burnable lightener, organic substances, lightening, burnout

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Milada Kašíková *Vyhořívání organických lehčiv v cihlářském střepe*. Brno, 2017. 100 stran. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 13. 1. 2017

---

Bc. Milada Kašíková  
autor práce

**PODĚKOVÁNÍ:**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a odborné vedení při zpracování této diplomové práce.

# Obsah

Úvod .....	11
<b>1. Cihlářská výroba .....</b>	<b>12</b>
1.1. Historie cihlářské výroby.....	12
1.2. Cihlářské zeminy .....	12
1.3. Těžba.....	13
1.4. Vytváření .....	13
1.5. Sušení .....	13
1.6. Výpal.....	13
1.6.1. Děje při výpalu .....	13
1.6.2. Pece pro výpal cihlářských výrobků .....	14
1.6.3. Výpal v tunelové peci .....	14
<b>2. Lehčení cihlářského střepu .....</b>	<b>16</b>
2.1. Historie a současnost .....	16
2.2. Principy vylehčování .....	17
2.3. Organická lehčiva .....	19
2.3.1. Dřevěné piliny .....	19
2.3.2. Sláma.....	21
2.3.3. Rašelina .....	21
2.3.4. Antracit.....	22
2.3.5. Mouka .....	22
2.3.6. Otruby .....	22
2.3.7. Kukuřičná podestýlka .....	22
2.3.8. Konopné pazdeří.....	22
2.3.9. Papírenský kal .....	23
<b>3. Rešerše dosavadních výsledků.....</b>	<b>26</b>



3.1.	Dřevěné piliny [21], [29].....	26
3.2.	Sláma [22] .....	27
3.3.	Papírenský kal [23].....	29
3.4.	Čistírenský kal [24] .....	33
3.5.	Vuppor [25].....	36
3.6.	Polystyren [26].....	38
<b>4.</b>	<b>Tvarovky typu THERM.....</b>	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>Emise unikající při výpalu - SO<sub>2</sub> a CO .....</b>	<b>41</b>
<b>6.</b>	<b>Metodika zkoušek .....</b>	<b>42</b>
6.1.	Zkoušky vstupních surovin .....	42
6.1.1.	Rentgenová difrakční analýza (RTG).....	42
6.1.2.	Diferenční termická analýza (DTA) – ČSN 72 1083.....	42
6.1.3.	Dilatometrická termická analýza (DKTA) – ČSN 72 1083 .....	42
6.2.	Zkoušky plastického těsta.....	43
6.2.1.	Plastičnost podle Pfefferkorna – ČSN 72 1074 .....	43
6.2.2.	Stanovení vlhkosti pracovní směsi .....	43
6.2.3.	Stanovení citlivosti k sušení – ČSN 72 1565 – 11.....	44
6.3.	Zkoušky na vysušeném vzorku.....	45
6.3.1.	Délková změna sušením – ČSN 72 1565 – 5 .....	45
6.4.	Zkoušky na vypáleném vzorku .....	45
6.4.1.	Délková změna pálením – ČSN 72 1565 – 11 .....	45
6.4.2.	Ztráta hmotnost pálením .....	46
6.4.3.	Objemová hmotnost .....	46
6.4.4.	Nasákavost .....	47
6.4.5.	Zdánlivá pórovitost.....	47
6.4.6.	Zdánlivá hustota.....	48

6.4.7.	Pevnost v tahu za ohybu.....	48
6.4.8.	Součinitel tepelné vodivosti.....	49
<b>7.</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>50</b>
7.1.	Vytváření zkušebních vzorků.....	52
7.2.	Zemina Novosedly.....	54
7.2.1.	Kukuřice.....	55
7.2.2.	Sláma.....	56
7.2.3.	Konopné pazdeří.....	57
7.2.4.	Rašelina.....	58
7.2.5.	Papírenský kal.....	59
7.2.6.	Antracit.....	60
7.2.7.	Mouka.....	61
7.2.8.	Otruby.....	62
7.2.9.	Piliny.....	63
7.3.	Zemina Týn nad Vltavou.....	64
7.3.1.	Antracit.....	64
7.3.2.	Mouka.....	65
7.3.3.	Otruby.....	66
7.3.4.	Piliny.....	67
7.4.	Porovnání výsledků.....	68
7.5.	Diskuze výsledků.....	83
	<b>Závěr.....</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>89</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam tabulek, obrázků a grafů.....</b>	<b>95</b>

## Úvod

Jedním ze závažných světových problémů, kterým je potřeba se zabývat, je možnost druhotného využívání odpadů. Ve všech oblastech průmyslu se hledají nová řešení, jak znova zužitkovat materiály a produkty, které již splnili svoji primární funkci. Z ekologického hlediska již nelze počítat s ukládáním veškerých odpadů na skládky nebo jejich spálením, protože tyto neekonomické procesy nenávratně poškozují životní prostředí. S touto problematikou se setkáváme i v cihlářském průmyslu.

Na snížení objemové hmotnosti cihlářského střepu se používají běžně dostupná vyhořívající lehčiva (dřevěné piliny, papírenské kaly, aj.). Z nichž např. dřevěné piliny se dají dále použít na výrobu pelet s vysokou výhřevností, a proto se na trhu setkáváme s jejich nedostatkem nebo se zvýšenou cenou. Proto je potřeba vyhledávat a používat ekonomicky výhodné druhy lehčiv, které by mohly piliny a jiná běžně používaná lehčiva nahradit.

Úvodní kapitoly jsou svým charakterem teoretickým základem pro praktickou část práce. První kapitola seznámí čtenáře s obecnou výrobou cihlářských výrobků. Ve druhé kapitole se čtenář seznámí s principem vylehčování cihlářského střepu a s organickými vyhořívajícími lehčivy. Třetí kapitola je věnována doposud publikovaným výsledkům z oblasti vylehčování a vyhořívání organických látek. Poslední dvě teoretické kapitoly pojednávají o tvarovkách typu THERM a o emisích, které unikají při výpalu cihlářského střepu.

Praktická část spočívala v návrhu metodiky posouzení teplotního intervalu odpovídajícímu vyhořívání organických látek v cihlářském střepu za použití analogového teploměru K204. Vzorky byly vyrobeny ze dvou druhů zemin (vápenatá a nevápenatá) a z několika druhů organických vyhořívajících látek. Na takto vyrobených vzorcích byla sledovaná teplota uvnitř střepu během výpalu společně se sledováním teploty uvnitř střepu pouze z dané zeminy.

# 1. Cihlářská výroba

Pod pojmem cihlářské výrobky rozumíme nežáruvzdorné výrobky s pórovitým střepelem. Mají typické červené zbarvení, způsobené obsahem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a používají se ke stavebním účelům. Tyto výrobky se vypalují obvykle na teploty v rozmezí 900 až 1000 °C. Jedná se o stavební materiál poměrně snadno dostupný jak z hlediska surovin, tak z hlediska konečné ceny [4].

## 1.1. Historie cihlářské výroby

Cihlářství je hned po hrnčířství nejstarší keramický obor. V některých oblastech rozvinutých civilizací se hlína vytvarovaná do určitých pravidelných útvarů ukázala být vhodným stavebním materiálem jak pro svoji dostupnost, tak pro své výhodné vlastnosti, které má již v suchém stavu. Cihly byly nepálené nebo pálené na nízkou teplotu. Rozměry a tvary výrobků byly různé, teplota výpalu kolísala, stejně tak i složení surovinových směsí a tím i konečná kvalita výrobků. Významné období rozvoje cihlářské výroby nastalo v 50. letech 19. století, kdy byla sestrojena kruhová pec, která byla později doplněna plynovým topením, začalo se využívat kanálových sušáren a ve Francii byla v roce 1910 postavena první tunelová pec. Koncem 19. století byl v Evropě sjednocen formát cihel a byly vydány první normy pro jejich výrobu [6].

Po roce 1989 začal být kladen důraz na kvalitu a přesnost výrobků, na hospodárnost a ekologická hlediska při výrobě. Dnešní trendy rozvoje cihlářské výroby směřují spíše k výrobkům větších rozměrů s odlehčeným střepelem [6].

## 1.2. Cihlářské zeminy

Pro cihlářskou výrobu se používají suroviny plastické, tzv. cihlářské zeminy, které s vodou vytváří plastické těsto. K zemině se dále přidávají ostřiva a lehčiva. Přísady dovedou ovlivnit jak vlastnosti výrobku, tak průběh technologického procesu [1].

Ložiska a zásoby cihlářských zemin se nachází prakticky po celém území České Republiky. Zeminy se podle obsahu  $\text{CaCO}_3$  dělí na:

- vápenaté (uhličitanové) s obsahem  $\text{CaCO}_3 > 5 \%$ ,
- bezvápenaté s obsahem  $\text{CaCO}_3$  do 5 % [2], [3].

### **1.3. Těžba**

Cihlářské zeminy se těží povrchově v jedné etáži, která je v blízkosti cihelny. Nejčastěji se k těžbě používají korečková nebo lžícová rypadla. Zemina se poté dopraví pásovými dopravníky nebo nákladními automobily na haldy, kde dochází k homogenizaci suroviny, což zlepšuje její stejnorodost [5].

### **1.4. Vytváření**

Pro výrobu keramických tvarovek z plastického těsta se nejčastěji využívá tažení plastického těsta – extrudování na horizontálním šnekovém lisu. Těsto s obsahem 19 – 27 % vlhkosti je kontinuálně protlačováno skrz ústí šnekového lisu za použití lisovacího tlaku 0,4 – 1,4 MPa [2], [7].

### **1.5. Sušení**

Sušení představuje energeticky náročný technologický proces. Sušení se provádí v sušárnách s možností regulace sušícího procesu. Protože se při výrobě vychází z plastického těsta o vlhkosti kolem 20 % a požaduje se vysušení na vlhkost do 2 % (většinou do 1,5 %), je úbytek vlhkosti při sušení vždy doprovázen značným smrštěním [8].

K sušení se používají komorové nebo kanálové sušárny. Doba sušení závisí na druhu výrobků a na vlastnostech hmoty. Celková doba sušení se pohybuje v rozmezí od 30 do 300 hodin. V sušárnách je nutno dodržet předepsanou teplotu sušícího vzduchu a zajistit vhodný způsob jeho proudění [8].

### **1.6. Výpal**

Výpalem získávají cihlářské výrobky své konečné charakteristické vlastnosti, jako jsou pevnost, pórovitost, odolnost proti povětrnostním vlivům a také svůj typický vzhled. K dosažení těchto vlastností vede řada jak chemických, tak i fyzikálních dějů uvnitř střepe [9].

#### **1.6.1. Děje při výpalu**

Jako první krok se z výsušků odstraňuje technologická voda, která zbyla po vysušení (1 – 1,5 %), dále dochází k uvolňování chemicky vázané vody z jílových

minerálů. Tento děj je doprovázen dočasným snížením pevnosti. Lehčiva, jenž používáme pro výrobu cihlářských výrobků, se při výpalů výsušků postupně mění a vzniká pórovitost. Při teplotách 850 – 900 °C dochází k rozkladu uhličitanů (zejména  $\text{CaCO}_3$ ) opět za vzniku pórovitosti. Takto vzniklý  $\text{CaO}$  reaguje s  $\text{SiO}_2$ , uvolněním z jílových minerálů při jejich rozkladu (při dehydroxidaci), na křemičitany vápenaté. Důležité je, aby  $\text{CaCO}_3$  byl jemně rozptýlen, jinak by ve střepu zůstaly velké shluky  $\text{CaO}$ , které by při styku vypáleného výrobku se vzdušnou vlhkostí hydratovaly na  $\text{Ca(OH)}_2$  za značného nárůstu objemu. Tento proces by mohl vést k rozpadu výrobků [9].

Teplota výpalu je různá dle složení hmot, nejčastěji se pohybuje v rozmezí od 900 – 1000 °C, u některých výrobků může být i vyšší [9].

### **1.6.2. Pece pro výpal cihlářských výrobků**

V dnešních moderních provozech se výrobky vypalují většinou ve velkoprofilových tunelových pecích, které jsou vytápěné zemním plynem. Kvůli velkému objemu výroby bývají pece konstruovány se závěsným stropem, což umožňuje větší profil pecního kanálu. Doba výpalu se pohybuje od 10 do 30 hodin [9].

### **1.6.3. Výpal v tunelové peci**

Z hlediska teploty se tunelová pec dělí na tři pásma – předehřívací, žárové a chladící. Každé pásmo se dělí na několik sekcí s různou teplotou. Průběh výpalu je dán jak rychlostí pohybu vozů s polotovary pecním kanálem, tak délkou úseků s nastavenými různými teplotami [9].

#### **1.6.3.1. Předehřívací pásmo**

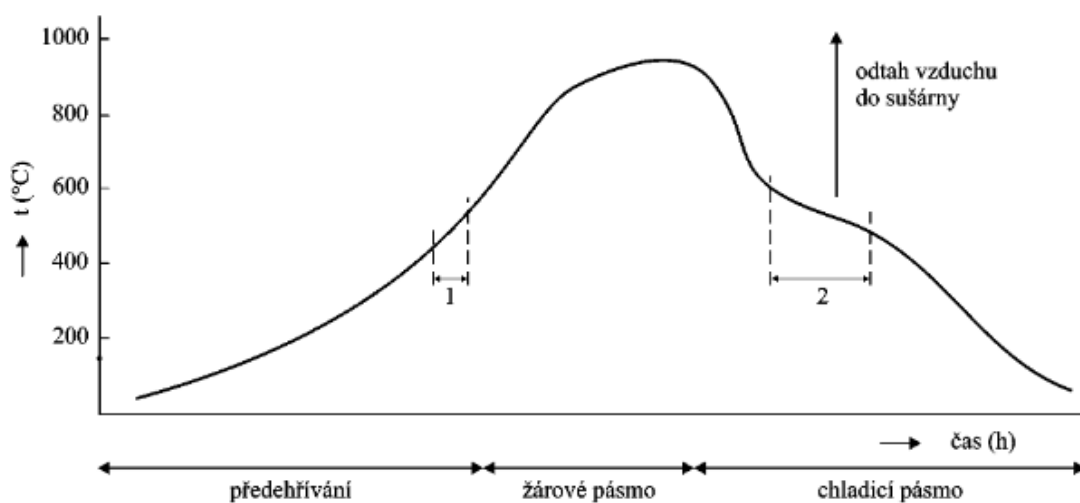
V předehřívacím pásmu dochází k postupnému zahřívání polotovarů z normální teploty na teplotu cca 600 °C. V průběhu předehřívání je nejdůležitějším dějem uvolňování chemicky vázané vody z jílových minerálů. Vznik vodní páry ve střepu je spojen s poklesem pevnosti. Dalším důležitým dějem ve střepu je modifikační přeměna  $\beta$ -křemene na  $\alpha$ -křemen, ke kterému dochází při teplotě 573 °C. Tato přeměna je spojena s objemovým nárůstem zrn křemene. Rychlost nárůstu teploty v tomto pásmu musí být takové, aby nedošlo k popraskání materiálu [11].

### 1.6.3.2. Žárové pásmo

Žárové pásmo je takový úsek, kde je polotovar po určitou dobu vystaven maximální teplotě. V tomto pásmu je nutné zajistit rovnoměrné prohřívání celé skládky v průřezu pecního kanálu. Důležitý je nejen způsob uložení vypalovaných polotovarů, ale také vhodné rozmístění hořáků, které zajišťuje vhodnou cirkulaci plamene [9].

### 1.6.3.3. Chladicí pásmo

Chladicí pásmo je velmi choulostivou záležitostí z hlediska vzniku vad. Při procesu chlazení dochází ke smrštění materiálu. Pokud by rychlost chlazení byla velmi rychlá, teplota ve střepu by se nestačila vyrovnávat a došlo by ke vzniku tahových napětí v povrchových vrstvách. Příliš velké pnutí by mohlo narušit celistvost výrobku. V počáteční fázi chlazení (do 600 °C) lze využít přítomnost určitého množství taveniny ve střepu, která může pnutí vyrovnávat. Při chlazení z teploty 600 °C se musí respektovat zpětná modifikační přeměna křemene, při níž dochází ke smrštění zrn křemene. To má za následek vznik tahového napětí ve střepu, společně s napětím, které je vyvoláno teplotním gradientem, to může vést ke vzniku trhlin. Je nutné v oblasti modifikační přeměny křemenu (při teplotě 600 – 450 °C) zařadit při chlazení prodlevu, aby se vyrovnal teplotní gradient v tělese a modifikační přeměna křemenu mohla bez problému proběhnout. Jakmile se překoná tento teplotní interval, lze průběh chlazení opět urychlit [10].



**Obr. č. 1.:** Příklad vypalovací křivky cihlářských výrobků v tunelové peci [10]

(1 – dehydroxilace jílových materiálů, 2 – přeměna  $\alpha$ -křemene na  $\beta$ -křemen)

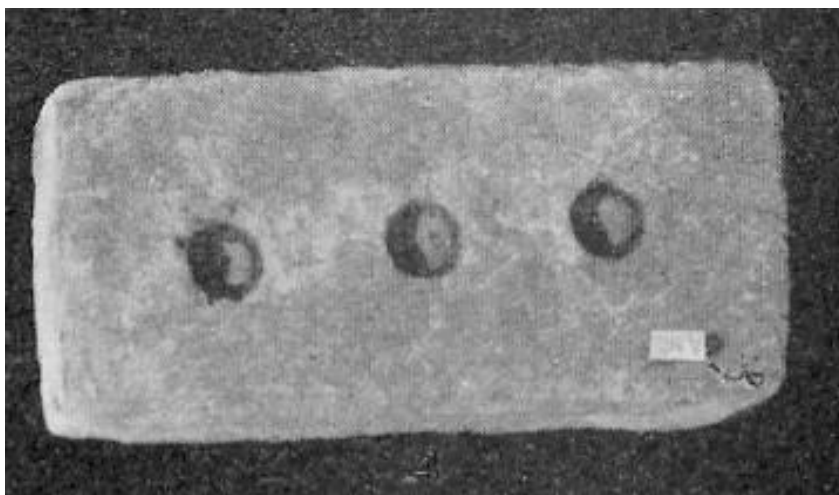
## 2. Lehčení cihlářského střepe

Cihla se jako stavební materiál používá už více než 10 000 let. Jako nejstarší umělé stavivo prošlo dlouhým vývojem, který se v posledních dvou stoletích výrazně zrychlil. V dnešní době je základem všech moderních cihlových systémů velkorozměrová vylehčená příčně děrovaná cihelná tvarovka typu THERM.

### 2.1. Historie a současnost

Cihla je nejstarší umělé stavivo, jehož historie začíná téměř s počátkem naší civilizace. Vznik nepálených cihel se datuje do období až 10 000 let př. n. l. Už od počátku je výroba cihel spojena s vylehčováním. Před smícháním s vodou byla konzistence podle potřeby upravována jak minerálními, tak rostlinnými přísadami. Mezi rostlinné přísady patřila sekaná sláma, bylinné zbytky, piliny, popel nebo písek, které zpomalovali vysychání a bránili tak praskání již hotového díla [12].

Zmínky o lehčených cihlách se objevují ve spisech italských architektů Albertiho (1512) a Palladia (1571), kteří radili cihlářům jak si ulehčit výrobu, manipulaci a jak zlepšit kvalitu svých výrobků. Dle jejich tvrzení postačí cihly ve dvou nebo třech místech propíchnout špičatým kolíkem, aby mohli lépe prosychat a vypalovat se, dojde tím k lepšímu odpařování vlhkosti. Tento efekt lehčení byl objeven i na nejstarší české děrované cihle z Vlašského dvora z 15. – 16. století [12].



**Obr. č. 2.:** Nejstarší česká lehčená cihla [12]

Další významnou událostí v cihlářství se stalo období průmyslové revoluce, kdy nastal objev lehčené – dutinové cihly (výrobu umožnil nástup pásmového lisu). Angličan Benford Deacon podal patent na dutý blok v roce 1813, jeho objev



značně rozvinul technické vlastnosti cihel. Použité dutiny snížily váhu, zlepšily manipulaci s cihlou, ale také zvýšily pevnost v tlaku a především tepelnou i zvukovou izolaci. Takto vyrobené cihly mohly být větší, což znamenalo nejen šetření časem, ale také manuální prací [12], [13].

Lehčené cihly byly vítány všude tam, kde bylo nezbytné snížit hmotnosti stěn. Největší technický pokrok nastal na přelomu 19. a 20. století. Kvůli pracnosti na stavbě, zjednodušení odborné práce a úspoře času se začaly vyrábět cihly větších rozměrů. Jenže jejich vysoká objemová hmotnost (až 1800 kg/m<sup>3</sup>) způsobovala problémy s manipulací, dopravou a spotřebou materiálu. Pevnost keramického střepu, i finálního výrobku byla dostatečná, proto bylo vylehčování cihlářského střepu ideálním řešením [12].

Novodobým milníkem je patent švédského inženýra Svena Fernhofa v roce 1958. Dal silný podnět k výrobě porotonové cihly. Poroton je obchodní název cihel lehčených vyhořívající plastickou látkou – polystyrénem, který se do cihlářské suroviny přidává v drobných napěněných granulcích, které po výpalu vytvoří jemné kulovité dutinky [12].

Od 50. let se začala sledovat tepelná izolace budov a její nároky se začaly zvyšovat. Tento tlak nutí cihláře k vynálezu nových výrobků. Dochází k rozvoji technologie porotonu, ale při jeho použití je nutné čistit kouřové plyny. Proto se začínají masivně využívat dřevěné piliny a papírenský kal [12].

## **2.2. Principy vylehčování**

Vylehčování cihlářského střepu umožňuje nejen snížení objemové hmotnosti výrobků, ale také nižší spotřebu základní suroviny, snazší manipulaci, atd. Vylehčování je možné třemi způsoby:

- zvětšením pórovitosti střepu – přidavek lehčiv do výrobní směsi,
- vytvářením pórů – zmenšení podílu střepu v celém objemu výrobku,
- oběma způsoby – střepově i objemově lehčený výrobek.

Pórovitost (přítomnost pórů) je typickým znakem mikrostruktury cihlářských výrobků. Pórem je označován prostor, který je zaplněn kapalnou nebo plynnou fází a jehož rozměr je menší než rozměr uvažovaného tuhého tělesa. Mohou

ovlivnit do značné míry fyzikálně-mechanické vlastnosti výrobků. Podle velikosti (průměru) se póry dělí na:

- dutiny a trhlinky –  $d > 1 \text{ mm}$ ,
- póry:
  - velké –  $d > 15 \text{ }\mu\text{m}$ ,
  - střední –  $d = 0,1 - 15 \text{ }\mu\text{m}$ ,
  - jemné –  $d = 0,015 - 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ,
  - mikropóry –  $d < 0,015 \text{ }\mu\text{m}$ .

Podle povahy a působení lehčiva na vznik pórovité mikrostruktury rozeznáváme:

- Lehčiva působící nepřímo
  - Tato lehčiva způsobují vylehčení střepe díky své vlastní objemové hmotnosti, která je nižší než objemová hmotnost vypáleného střepe.
  - Podle původu mohou být přírodní (křemelina), přírodní upravená (expandovaný perlit) nebo z odpadů (popílek).
- Lehčiva působící přímo
  - Jedná se o suroviny, které se přimíchají do plastického těsta a během procesu výpalu vyhoří, čímž vytvoří ve střepe pórovou strukturu. Jejich účinnost závisí na obsahu nespalitelných látek (popela).
  - Nejčastěji se používají dřevěné piliny, papírenské kaly, aj. Lze ale využít i jiné nejrůznější materiály, jako jsou polystyren, textilní odpad, uhelný prach, odpady ze zemědělství, aj.

Dalším způsobem jak vylehčit cihlářský střepe jsou přísady, jejichž užitím lze ovlivnit množství rozdělavací vody. Jestliže její množství zvýšíme, zvýšíme tím objem vody ve výlisku, který v procesu sušení a výpalu výlisek opouští, a tím docílíme rozsáhlejší pórové struktury [14].

V praxi se využívají zejména lehčiva působící na vznik pórovité mikrostruktury střepe přímo. Vylehčení cihlářského střepe neovlivňuje pouze objemovou hmotnost výrobku. Lehčiva, jenž se používají v cihlářství, působí i na jiné vlastnosti. Mohou snižovat plasticitu těsta, smrštění sušením, pevnost výsušků, citlivost k sušení podle Bigota, pevnost v tlaku či tepelnou vodivost [14].

## 2.3. Organická lehčiva

Vylehčování cihlářského střepe se zpravidla řeší vyhoříváním organických látek přidaných jako příměs do suroviny. Využíváním lehčiv sledujeme jednak snížení objemové hmotnost, tak snížení spotřeby paliva využitím kalorické hodnoty příměsi a jednak dosažení kvalitního výrobku (vyloučení vzniku černých jader a nebezpečí nadýmání střepe) [5].

Určujícím jevem vyhořívání je difúze kyslíku dovnitř střepe a produktů spalování ze střepe za katalytického působení cihlářské suroviny. Difúzní hoření nastává ve střepe při teplotách 300 – 400 °C [5].

Efektivnost vyhořívání je ovlivněna chemickým a mineralogickým složením suroviny. Velký význam mají sloučeniny železa, zvláště FeO vytváří nízkotavitelná eutektika (již od 650 – 700 °C) a za přítomnosti vyhořelého uhlíku vzniká černé sklovité jádro s jemně rozptýleným uhlíkem, a pokud se vlivem taveniny uzavře povrch střepe, nastane nadýmání. Dalšími vlivy působící na vyhořívání je prostředí a teplota výpalu (oxidační atmosféra při teplotách 500 až 700 °C), nejvhodnější granulometrie lehčiva jsou zrna do 1 mm [5].

### 2.3.1. Dřevěné piliny

Jedním z významných obnovitelných zdrojů je biomasa. Biomasa je hmota vznikající v přírodě biologickými procesy. Množství biomasy vyprodukované na planetě Zemi je zhruba  $2 \cdot 10^{14}$  kg, to odpovídá energetickému ekvivalentu 90 TWr. Největší procento biomasy představuje dřevní odpad, při jehož spalování dochází k nárůstu množství CO<sub>2</sub> v atmosféře [16].

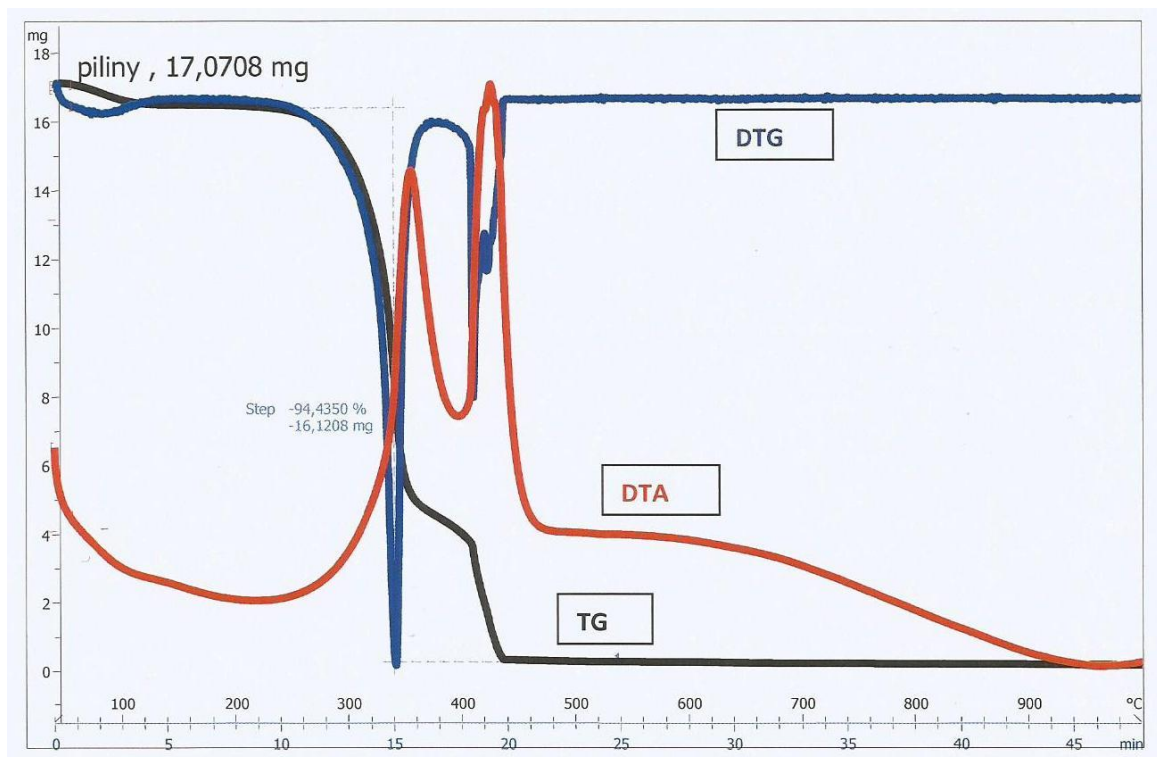
Piliny jsou u nás nejčastěji využívaným odpadem v cihlářství. Primárně se přidává jako vyhořívající lehčivo. Sekundárně se dá použít jako korekce vlhkosti připravované suroviny a taky jako ostřivo. Díky více možnostem využití (lisované brikety, výroba desek, aj.) bývá pilin nedostatek. Tento nedostatek se odráží v kolísání ceny (od 100 až do 400 Kč/m<sup>3</sup>) [16].

V popředí zájmu je energetické využívání dřevního odpadu v cihlářství. Tato metoda využívá piliny jako paliva bez zabudování komplikovaných hořáků, protože se přidávají do suroviny už při její přípravě. Toto řešení šetří nejen ener-

gii, ale kladně ovlivňuje kvalitu cihlářského těsta i konečného výrobku. Tyto spalitelné látky zalisované do suroviny umožňují zkrácení doby sušení, při výpalu vyhoří, odevzdávají svoje teplo a navíc dělají střepe pórovitější [16].

Chemické složení dřeva je i u různých dřevin skoro stejné a je tvořeno organickými prvky, jako je uhlík, vodík, kyslík a dusík. Kromě těchto organických prvků je ve dřevě celé řada anorganických prvků, které po shoření zůstávají ve formě popela (vápník, draslík, sodík, hořčík, aj.), jehož množství se pohybuje v rozmezí 0,2 – 2 % [16].

Přídavek pilin se obvykle dává v množství 4 – 5 % hmotnostních (tj. 20 – 25 % objemových), maximální rozměr dodávaných pilin je pod 4 mm, aby se nemusely drtit ještě před přípravou. Piliny zlepšují zpracovatelnost, kladně ovlivňují dobu sušení a zlepšují tepelně izolační vlastnosti střepe. Dokážou snížit pevnost až o 30 %, což ale vzhledem k vysoké pevnosti cihlářských výrobků není problematické. Používají se na výrobu tepelně izolačních tvarovek typu THERM, pro jejichž výrobu jsou nezbytné [16].



**Obr. č. 3.:** Analýza TG, DTA, DTG vzorku dřevěných pilin [26]

### 2.3.2. Sláma

Termín sláma označuje vymlácené vyschlé stonky a stébla z obilnin. Sláma je v omezené míře využívána jako krmivo, ale vedle toho je využívána k podestýlání, jako biopalivo, stavební materiál, suroviny pro výrobu aglomerovaných materiálů, jako materiál pro výrobu domácích ozdobných předmětů, může také sloužit pro výrobu papíru, briket nebo slámek [31].

Sláma obsahuje 80 – 82 % organických látek, z hlavních živin je nejbohatší na draslík, navíc obsahuje také síru a mikroelementy.

Sláma se dnes stává významnou energetickou komoditou jako biopalivo, zpracovaná jako brikety nebo pelety. V podobě slaměných balíků ji lze využít na stavbu slaměných domů či na jeho izolování.

V cihlářství ji lze využít, jako vyhořívající lehčivo, jenž by mohlo nahradit dřevěné piliny [31].

### 2.3.3. Rašelina

Rašelina je nahromaděný, částečně rozložený rostlinný materiál. Obsahuje převážně organické látky (celulózu) a organické kyseliny. Rašelina vzniká v rašeliništích, které se často nazývají močály nebo bažiny [17].

Celosvětové zásoby rašeliny jsou až 4 triliony m<sup>3</sup>, pokrývají 2 % zemského povrchu (což odpovídá 3 milionům km<sup>2</sup>). V Česku se těží rašelina například na Šumavě, ve Slavkovském lese u Krásna a v dalších lokalitách [17].

Rašelinu lze využít jako fosilní palivo (obsahuje 53 – 58 % spalitelných látek), v zemědělství a v zahradnictví (přidává se do půdy ke zvýšení schopnosti půdy uchovávat vlhkost), jako stelivo pro dobytek, na bahenní zába-ly, v potravinářství na výrobu sladové whisky nebo ve stavebnictví na izolace [17].

Ačkoli má rašelina pro člověka mnoho využití, tak ty zároveň přináší závažné problémy. Když je rašelina suchá, může vznikat nebezpečí požáru. Požáry v rašeliništích mohou hořet téměř do nekonečna (do vyčerpání paliva), a to i v podzemí, pokud je zde k mání kyslík [17].

#### **2.3.4. Antracit**

Antracit je druh černého uhlí, který se vyznačuje nejnižším obsahem těkavých hořlavých látek (8 – 12 % hmotnosti), vysokým obsahem uhlíku (90 – 96 %) a velkou výhřevností. Jedná se o černé uhlí, které bylo vystaveno velkému tlaku a teple. Používá se na vytápění a k výrobě chemikálií [32].

#### **2.3.5. Mouka**

Mouka je v podstatě rozmělněná vnitřní část obilného zrna (obilky) s menším podílem otrubnatých částic. Používá se zejména pro výrobu jídel a je běžně dostupná ve 4 druzích podle tloušťky zrn: hladká, polohrubá, hrubá a krupice [33].

#### **2.3.6. Otruby**

Otruby jsou odpadní produkty, které přepadávají při vysévání meliva z posledních šrotů, vymílacích a domílkových chodů, dále od loupání a kartáčování obilí. Podle granulace se dělá na hrubé (od kartáčování a šrotů) a jemné (z vymílání a loupání). Při mletí pšenice se získává asi 22 % otrub. Otrub se využívá hlavně v krmivářství [34].

#### **2.3.7. Kukuřičná podestýlka**

Tato podestýlka je vyrobena z kukuřičných vřeten.

#### **2.3.8. Konopné pazdeří**

Pazdeří je dřevitá dužina obsažená ve stoncích rostlin, ze kterých se získávají lýková textilní vlákna. Pazdeří se odděluje od vláken v procesu rozvolňování lněných a konopných stonků při průmyslovém zpracování [35].

Obsahuje 53 % celulózy, 21 % ligninu, 18 % ostatních látek a pod 10 % vody. Pazdeří z konopí je lehčí než podobný materiál z jiných přírodních látek, může

absorbovat tekutiny až ve čtyřnásobku vlastní váhy, je velmi pórezní a má vysokou izolační schopnost.

Průmyslové využití konopného pazdeří se rychle rozvíjí, má velkou budoucnost využití v ekologickém stavebnictví [35].

### **2.3.9. Papírenský kal**

Jedná se o kal, který pochází ze zpracování odpadového papíru technologií deinking. Obecně není považován za nebezpečný odpad, i když literatura uvádí, že v jednotlivých zemích se za něj považovat může. V dnešní době všechna kontaminace kalu pochází z pigmentů barviv a chlorovaných sloučenin, které byly v papíru přítomné při původním bílení a potisku.

Většina kalů produkovaného deinkingovými provozy končí na skládkách. Jedná se obvykle o směs vláken, atrementů, jílu, plniv a oxidů titaničitého a je obecně považován za netoxický. Tento kal může být zneškodněn spálením a následným skládkováním vzniklého popela. Jestliže se zjistí, že kal je netoxický, lze jej použít do betonů, jako plnidlo do vozovek a stavebních materiálů (např. cihlářských) [14], [16], [18].

Sběrový papír se technologickým postupem zpracovává dvěma způsoby.

#### **2.3.9.1. Rozvláknění sběrového papíru**

Balíky sběrového papíru přichází pásem přes rozvolňovač balíků a váhu do bubnového rozvlákňovače, do kterého se přivádí voda a chemikálie (louh sodný, komplexon, mýdlo, peroxid vodíku). Sběrový papír z rozvlákňovače přechází do třídění (vytřídí se odpad z plastů, sponek či dřeva). Vytříděný, ve vodě rozmočený papír (koncentrace 3,5 % papíru) se čerpá do třídičů husté látky, odkud přechází do nádrže na rozvlákněný papír. Z této nádrže se vodolátka čerpá na trojstupňové přetřídění, za kterým následuje dorozvláknění. Jemná rozvlákněná látka se čerpá do třídičů řídké látky. Vytříděná látka natéká do flotačního zařízení, ve kterém se z papíroviny odstraní tiskařská čerň a barviva. Vodolátka jde samospádem do mezinádrže, ze které se čerpá do jemného třídění a potom do kuželové odstředivky. Z odstředivky je vodolátka vedena do odpopelňovače. Odpopelňovaná látka se zahustí ve šnekovém zahušťa-

vači až na 30 % a padá samospádem do dispergačního zařízení. Před dispergací se látka zahřeje a při samotné dispergaci se naředí na 4,5 % a následně se shromažďuje ve sběrové nádrži. Z této nádrže se dále čerpá do papírenských strojů [14], [16], [18].

### **2.3.9.2. Úpravy sběrového papíru**

Tenký hygienický papír se vyrábí ze směsi upraveného sběrového papíru a bílé sulfitové nebo sulfátové buničiny. Papír se vyrábí v bílé barvě, v případě dohody s odběratelem lze papír obarvit.

Papírovina ze zpracování sběrového papíru se čerpá do zásobní nádrže a odtud se čerpá na vlastní zpracování. Sulfátová a sulfitová buničina přichází v balících. Nejprve se rozvlákní v hydropulpeře a po smíchání s papírovinou se mele v rafinériích na potřebnou délku vlákn. Všechny potřebné suroviny jsou dávkovány přes dávkovací centrálu (jejímž úkolem je kontinuálně v nastaveném poměru smíchat uvedené suroviny). Od dávkovací centrály je vodolátka o konzistenci 3 % přečerpána do strojní nádrže a následně do egalizační rafinérie, kde se dokonale promísí a udělá se korektura mletí. Z této rafinérie jde látka do prvního stupně třídění. Výplavy se zachytávají ve druhém stupni třídění. Výplavy z druhého stupně jdou do kanálu. Dobrá látka jde z třídění do vibračních třídičů a následně do vertikálních třídičů. Z tohoto třídiče jde vodolátka do nátokové skříně a následně přes výtokové štěrby po celé šířce do papírenského stroje. Podél sací skříně a přes vodící válce se začne na papírenském stroji vytvářet papírový list. Ten je dále dopravený k sušicímu válci, ze kterého se navíjí na kotouč [14], [16], [18].

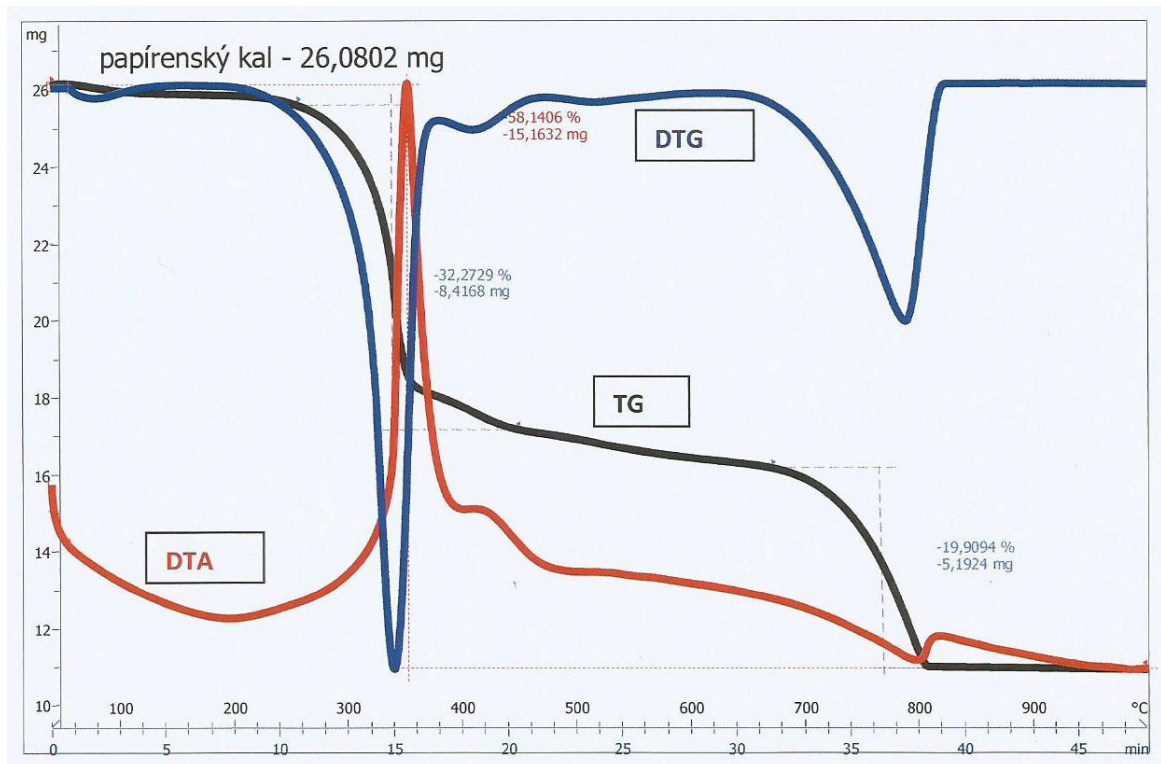
Odpadové vody z papírenských strojů obsahují vlákna, která je třeba zachytit a nově využít. Každý papírenský stroj má svoje čistící zařízení návratné vody, které se využívá opět ve výrobě. Nezachycená vlákna v odpadních vodách jdou na ČOV (čistírna odpadních vod), kde se zachytí sedimentací v usazovací nádrži jako kal. Kal je odvodněný v odvodňovacím zařízení na cca 55 % sušinu [14], [16], [18].

Výše uváděné procesy výroby hygienického papíru a tissue papíru se označují jako deinkingové procesy výroby papíru.



Kaly z předčištění odpadních vod z rozvlákňovače sběrového papíru a kaly z papírenských strojů se míchají a tvoří papírenské kaly. Obsah vody se pohybuje okolo 50 % (max. obsah vody je 55 %).

Díky své malé stlačitelnosti lze použít větší tlak při výrobě. Mohou tak vznikat stabilnější výlisky. Navíc svou vláknitou strukturou vyztužují výsušky. Ovšem na snížení objemové hmotnosti keramického střepu mají nižší vliv než dřevěné piliny [14], [16], [18].



Obr. č. 4.: Analýza TG, DTA, DTG vzorku papírenského kalu [26]

### 3. Rešerše dosavadních výsledků

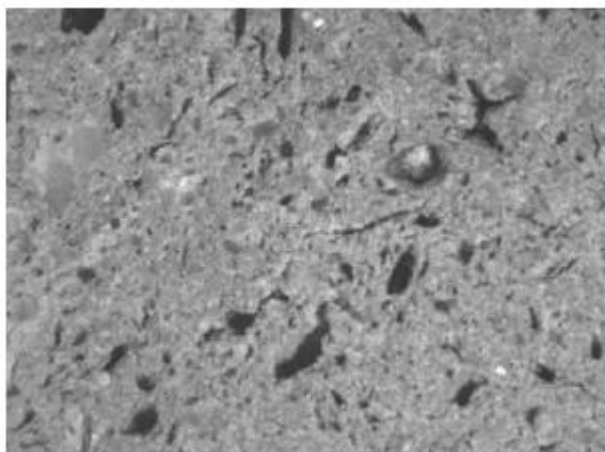
V této kapitole jsou shrnuty doposud publikované výsledky z vylehčování cihlářských střepeů za použití vyhořívajících organických látek, jako jsou dřevěné piliny, sláma, čistírenský kal, anebo papírenský kal.

Pro porovnání je na závěr srovnání s chemickou nevyhořívající látkou Vuppor nebo s tepelně zpracovaným plastem – polystyrenem.

#### 3.1. Dřevěné piliny [21], [29]

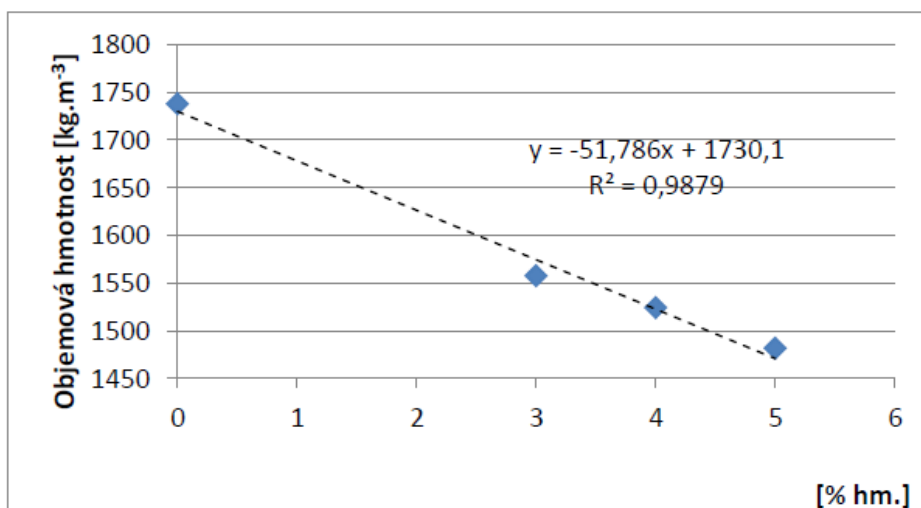
Jedná se o nejběžněji používané lehčivo v cihlářské výrobě. Dávkuje se v maximálním množství 30 % objemových výrobní směsi, což odpovídá dávkování kolem 5 % hmotnostních.

Piliny zalisované ve střepeu vyhořívají později než volně sypané a účinnost se obvykle uvádí přes 60 %. Jejich výhřevnost se podle literatury uvádí okolo 17 MJ/kg<sup>3</sup>, což je srovnatelné s hnědým uhlím. Podle novějšího výzkumu jsou do cihlářského střepeu vhodnější měkké piliny od kotoučových pil, zejména smrkové. Sypná hmotnost se pohybuje kolem 200 kg/m<sup>3</sup>. V posledních letech cena pilin vzrůstá, proto je nutné se poohlížet po alternativních lehčivech.



**Obr. č. 5.:** Makrostruktura vypáleného střepeu s obsahem pilin [23]

Piliny zlepšují zpracovatelnost, kladně ovlivňují dobu sušení, zlepšují tepelně izolační vlastnosti střepeu a snižují objemovou hmotnost cihlářského střepeu. Snižují pevnost až o 30%, což ale vzhledem k vysoké pevnosti cihlářských výrobků není problematické. Používají se na výrobu tepelně izolačních tvarovek typu THERM, pro jejichž výrobu jsou nezbytné [16].



**Obr. č. 6.:** Vliv přídavku pilin na objemovou hmotnost vypáleného střepeu [23]

Určujícím jevem při vyhořívání dřeva je difúze kyslíku dovnitř střepeu a produktů spalování ze střepeu katalytického působení cihlářské suroviny. Difúzní hoření ve střepeu nastává při teplotách 300 – 400 °C. Při spalování podle chemického složení zde probíhají exotermické reakce. Piliny mají začátek exo-projevu při 150 °C a konec při 400 °C. Pro piliny, jež jsou zalisované ve střepeu, experimenty ukázaly, že vyhořívání probíhá později než u volně sypaných pilin (250 až 700 °C).

Porovnání použití dřevěných pilin s jinými organickými lehčivý jsou porovnány v následujících rešerších.

### 3.2. Sláma [22]

Ve dvacátém století se objevil nový typ cihel, tzv. tepelně izolační bloky, které vyhovují dnešním požadavkům udaným v ČSN 73 0540-2 z hlediska tepelně izolačních vlastností, a proto není nutné dodatečné zateplení, které má mnoho odpůrců. U těchto výrobků byl zjištěn významný vliv tvaru a objemu dutin, které tvoří podstatnou část těchto cihel.

Pro zlepšení tepelně izolačních vlastností střepeu jsou do keramického těsta přidávána různá lehčiva, která při výpalu vyhoří, a zajistí tak zvýšení objemu a rovnoměrné rozložení pórů ve střepeu.

Ověřovány byly dva druhy keramických střepeu používaných pro výrobu tepelně izolačních cihelných bloků firmy Heluz, označovaných jako Family 50. Porovná-

ván byl cihelný střepek vylehčený pilinami – F50 a střepek vylehčený pilinami a slámou, označený jako F50-S.

Mezi základní parametry patří objemová hmotnost  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], hustota matrice  $\rho_{\text{mat}}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a pórovitost  $\psi_0$  [%], které byly určeny pomocí maximálního nasycení vzorků střepek vodou za sníženého tlaku a následného vážení vzorků (maximálně nasycených) na vzduchu, a poté byly ponořeny pod vodní hladinu.

Distribuce velikosti pórů byla stanovena pomocí rtuťové porozimetrie (Pascal 140 + 440, Thermo). Ve střepech se nevyskytovaly póry větší než 100  $\mu\text{m}$  v průměru.

Základní materiálové charakteristiky studovaných cihel jsou uvedeny v tabulce č. 1. Lze pozorovat, že u materiálu F50-S, kde byla použita sláma jako lehčivo, došlo k určitému zvýšení hustoty pevné matrice i objemové hmotnosti. Je patrný pokles otevřené pórovitosti o 5 %.

**Tabulka č. 1.: Základní fyzikální vlastnosti keramických střepek [22]**

Materiál	$\rho$	$\rho_{\text{mat}}$	$\psi$ [%]
	[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]		
F50	1 376	2 666	48,4
F50-S	1 469	2 749	46,6

Oba studované materiály dosáhly ve vysušeném stavu relativně blízkých hodnot součinitele tepelné vodivosti. Hodnoty měrné tepelné kapacity obou materiálu v suchém stavu byly také dosti podobné.

V tomto výzkumu byly prezentovány základní charakteristiky a tepelné vlastnosti dvou druhů keramických střepek, z nichž jsou vyráběny broušené cihelné bloky s označením Family 50. Jsou to tepelně izolační bloky, které dosahují výborných tepelných vlastností a zcela vyhovují evropským normám pro použití na jednovrstvé zdivo.

Nejčastěji používané piliny, které jsou z ekonomického hlediska dosti nákladné, jsou nahrazovány např. slámou, která je dostupnější a finančně méně náročná. Ovšem z dosažených výsledků lze konstatovat, že částečné nahrazení pilin slámou ovlivní negativně výsledné vlastnosti keramického střepe. U materiálů s využitím slámy jako lehčiva došlo sice k relativně malému snížení pórovitosti, ale zároveň i ke snížení schopnosti materiálů transportovat jak vzduš-

nou, tak kapalnou vlhkost. Zvýšily se také hodnoty součinitele tepelné vodivosti, čímž došlo ke zhoršení tepelně izolačních vlastností střepu.

Použití slámy jako lehčiva je tedy pozitivní pouze z hlediska ekonomického a ekologického, ale z hlediska tepelných a vlhkostních vlastností je toto řešení méně výhodné než dřevěné piliny.

### **3.3. Papírenský kal [23]**

Pro dosažení dostatečné pevnosti cihelné tvarovky typu THERM v tlaku při nízké objemové hmotnosti jsou téměř nezbytným lehčivem papírenské kaly, které podle publikovaných závěrů zvyšují pevnost střepu, ale na snížení objemové hmotnosti střepu mají menší vliv než piliny v případě shodného objemového dávkování do surovinové směsi.

Papírenské kaly obsahují až 80 % nespalitelných anorganických podílů (zatímco dřevěné piliny necelé 1 %), v podobě vápence a kaolinitu. Podle dalších publikovaných závěrů papírenské kaly snižují mrazuvzdornost.

V daném experimentu byly použity papírenské kaly, které pocházejí ze zpracování odpadového papíru technologií deinking ve firmě, která vyrábí hygienické výrobky ze sběrového papíru – toaletní papír, kuchyňské utěrky, průmyslové utěrky, hygienické kapesníky, tácky, apod.

Obsah vody se v průměru pohybuje kolem 50 %. V suchém vzorku po spálení při 650 °C zůstává asi 15 až 25 % popela (jehož chemické složení je převážně z 37 % CaO, 37 % SiO<sub>2</sub> a 21 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ostatní látky jako P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, Cl, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O a TiO<sub>2</sub> byly obsaženy ve stopovém množství do 1 %). Z mineralogického hlediska jsou papírenské kaly tvořeny především kaolinitem a kalcitem, po vyžhání na 930 °C vzniká jako hlavní krystalická fáze gehlenit.

Obě hodnotící směsi byly odebrány na konci úpravnické linky za protlačovacím mísidlem, které předchází vytvářecímu zařízení (šnekovému lisu). Z odebraných směsí bylo úpravou vlhkostí připraveno plastické těsto o deformačním poměru 0,7 podle Pfefferkorna, z něhož byly stloukáním do kovových forem vyrobeny vzorky. Na vzorcích byla stanovena délková změna sušením i pálením a metodou podle Bigota byla stanovena kritická vlhkost. Pro výpal byl použit režim podle ČSN 72 1565-4: nárůst teploty 150 °C/hod do 600 °C s 30 minutovou výdrží, po-

té nárůst teploty 120 °C/hod na vypalovací teplotu 950 °C se 120 minutovou výdrží na maximální vypalovací teplotě.

Na vysušených a vypálených vzorcích byla zkoušena pevnost v ohybu podle ČSN 72 1565-7 a pevnost v tlaku na vypálených vzorcích podle ČSN 72 1565-8. Jednotlivé parametry pórové struktury vypálených střepeň, jako je nasákavost, objemová hmotnost, zdánlivá pórovitost a zdánlivá hustota byly stanoveny dle ČSN 72 1565-6. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] se měřil přístrojem SHOTERM QTM – porovnávací metodou založenou na nestacionárním tepelném proudění liniového tepelného zdroje za předpokladu existence homogenních těles.

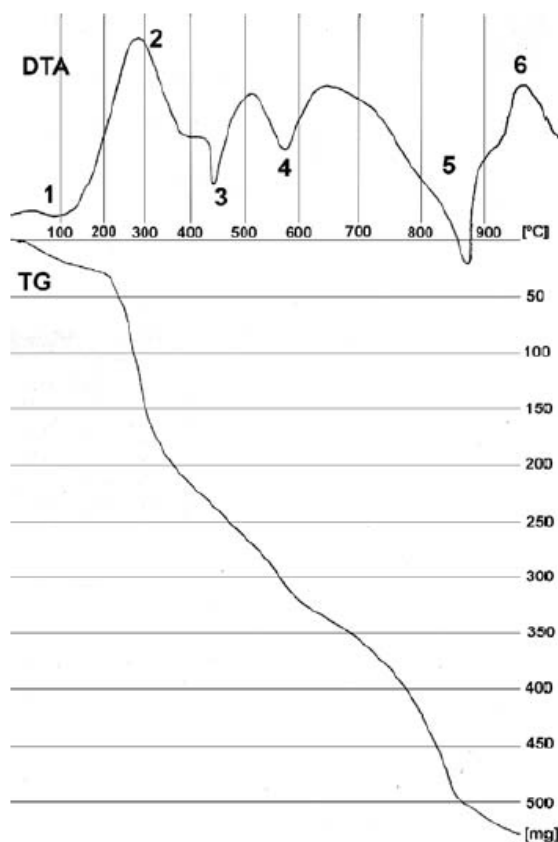
Vlastnosti výlisku obsahuje tabulka č. 2, z níž je patrné, že papírenský kal zvyšuje potřebu pracovní vlhkosti vody o 2,3 % pro dosažení těsta zvolené plastičnosti. S touto skutečností souvisí i vyšší smrštění vzorku ze surovinové směsi s obsahem papírenského kalu, jehož přítomnost zvyšuje i citlivost k sušení CSB podle Bigota. Tento stav v praxi umožňuje mnohem rychlejší sušení. Značnou výhodou papírenského kalu je jeho schopnost výrazně zvýšit pevnost v ohybu výsušku, což může být pro výrobu tenkostěnných cihlářských výrobků s automatickou manipulací výsušků výhodné.

**Tabulka č. 2.: Vlastnosti výlisků směsí [23]**

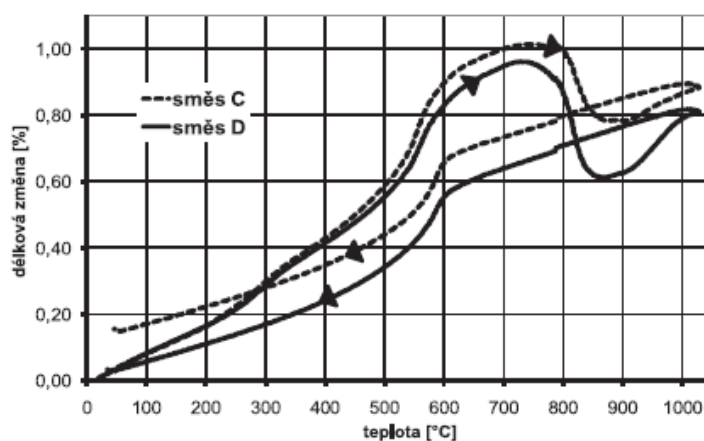
Směs	w <sub>p</sub> [%]	CSB [-]	DS [%]	$\sigma_{\text{ohyb}}$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]	OH [kg/m <sup>3</sup> ]
Dřevěné piliny	27,6	1,05	- 5,4	5,3	11,8	1 565
Dřevěné piliny a papírenský kal	29,9	1,26	- 6,7	8,2	18	1 594

Parametry pórové struktury obou typů střepeň po výpalu vykazují téměř shodné vlastnosti – rozdíl objemové hmotnosti je minimální a tomu odpovídá i minimální rozdíl pevnosti v ohybu, zatímco při použití papírenského kalu je větší pevnost v tlaku. Toto zvýšení pevnosti v tlaku lze přičíst vzniku nové mineralogické struktury fáze – anortitu, který ovšem díky větší objemové hmotnosti zvyšuje součinitel tepelné vodivosti vypáleného střepe. Vznik anortitu během výpalu střepe je doprovázen nárůstem objemu střepe, který je u obou směsí zřetelný na křivce DKTA od teploty 850 °C (obr. č. 7). Tato skutečnost je dána použitím vápenatých zemin u obou posuzovaných směsí. U směsi s obsahem papírenské-

ho kalu je uvedená objemová změna výraznější. Papírenský kal je významným zdrojem CaO, který zapříčiňuje vznik většího množství anortitu.



**Obr. č. 7.:** Analýza DTA a TG vzorku papírenského kalu [23],  
navážka 1 g, 1 – dehydratace, 2 – vyhořívání celulózy, 3 – dehydratace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  
4 – dehydroxilace kaolinitu, 5 – dekarbonatace  $\text{CaCO}_3$ , 6 – vznik Al-Si spinelu



**Obr. č. 8.:** Analýza DKTA [23],  
směs C – dřevěné piliny, směs D – dřevěné piliny a papírenský kal

Z anorganických materiálů je v papírenských kalech obvykle typický vysoký obsah kalcitu  $\text{CaCO}_3$ , popř. i portlanditu  $\text{Ca(OH)}_2$  a kaolinitu. Vyšší spotřeba tepla při výpalu lehčené směsi s obsahem papírenských kalů (směs D) je patrná ve sledovaných teplotních intervalech:

- 30 – 390 °C:
  - vyhořívání organických látek bývá ukončeno do 400 °C,
  - projevuje se vyšší výhřevností pilin, průměrně dosahuje  $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,
  - výhřevnost papírenského kalu je nižší –  $3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .
- 390 – 660 °C:
  - oblast významných endotermických reakcí,
  - projevuje se dehydratace  $\text{Ca(OH)}_2$  a dehydroxylace kaolinitu v papírenských kalech, což jsou výrazné endotermické reakce.
- 660 – 930 °C:
  - oblast rozkladu vápence,
  - papírenské kaly zvyšují obsah vápence v surovinové směsi, k jehož rozkladu je také třeba patřičné množství tepla –  $1\,777 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

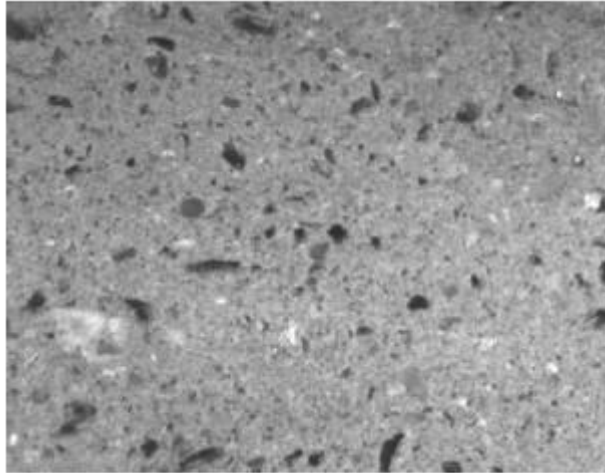
Použitím různých typů lehčiv se mění charakter pórovitosti střepu, kde v případě papírenských kalů jako lehčiva lze pozorovat vyšší podíl menších pórů, než vytvářejí dřevěné piliny.

Emise CO vznikají nedokonalým vyhoříváním organických látek v cihelném střepu při teplotách 300 – 400 °C. Určujícím jevem je difúze kyslíku dovnitř střepu. Nejvyšší emise oxidu uhelnatého během výpalu vykazuje směs C s dřevěnými pilinami jako lehčivem. Papírenský kal jako lehčivo v cihlářské surovinové směsi je menším zdrojem oxidu uhelnatého ve spalinách než dřevěné piliny během výpalu střepů o srovnatelné objemové hmotnosti. Tento fakt souvisí s nižším podílem spalitelných látek v papírenském kalu, i s vyšší permeabilitou střepu v důsledku rozkladu hydroxidu vápenatého v papírenském kalu.

Při výpalu střepu vzniká  $\text{SO}_2$  ve dvou teplotních pásmech. K první emisi  $\text{SO}_2$  dochází při teplotě cca 450 °C. Příčinou je oxidace pyritu ( $\text{FeS}_2$ ), který je běžnou součástí cihlářských zemin. Druhá emise  $\text{SO}_2$  začíná obvykle nad teplotou 750 °C a může pokračovat přes celý pálící cyklus. Příčinou je rozklad síranů vytvořených



na jílových minerálech. Tyto sírany jsou dočasně přítomné, dokud se vyšší teplotou nerozloží. Pokud se nerozloží, bude střep náchylný ke tvorbě výkvětů.



**Obr. č. 9.:** Makrostruktura vypáleného vzorku ze směsi dřevěných pilin a papírenského kalu [23]

Z uvedených výsledků je patrné, že papírenský kal přináší pro cihlářský střep mnoho pozitiv, které jsou ale doprovázeny i několika negativy, především ekonomickými.

Mezi pozitiva použití papírenského kalu jako lehčiva, v porovnání s dřevěnými pilinami jsou:

- zvýšení pevnosti výsušku i vypáleného střepu,
- nižší obsah oxidu uhelnatého i oxidu siřičitého ve spalinách během výpalu střepu.

K negativním aspektům patří:

- zvýšení potřeby rozdělovací vody, zvýšení citlivosti k sušení podle Bigota a smrštění sušením, prodloužení doby sušení výlisku,
- energetická náročnost výpalu,
- vyšší tepelné vodivosti vypáleného střepu.

### **3.4. Čistírenský kal [24]**

V tomto experimentu byl posuzován vliv různého množství kalu z čistírny odpadních vod jako lehčiva ve směsi pro výrobu tepelně izolačních tvarovek typu THERM v porovnání se standardním lehčivem – dřevěnými pilinami.

Z technologického hlediska zvyšuje čistírenský kal přídavek množství rozdělovací vody a pevnost výsušku i vypáleného střeptu. Čistírenský kal je výhodný z hlediska emise CO a SO<sub>2</sub> při výpalu.

Kal z čistírny odpadních vod (ČOV) je nevyhnutelným odpadem při úpravě vody a jejím čištění. Přibližně představuje 1 až 2 % objemu čištění vod, je v něm však obsaženo až 80 % původního znečištění. Tento druh odpadu je klasifikován jako nebezpečný odpad katalogového čísla 190811 – Kaly z biologického čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky.

Patent na využití kalu z odpadních vod v cihlářství pochází z roku 1889. Kal z čistíren odpadních vod se od roku 1979 úspěšně využívá při výrobě cihel v Jižní Americe. Přidává se až 30 % kalu k surovině, zneškodňuje se nejen kal, ale toxické a těžké kovy, stejně jako nebezpečné mikroorganismy.

Literatura uvádí mnoho referencí, které se shodují v základních závěrech. Kal primárně slouží jako lehčivo, snižuje objemovou hmotnost a pevnost. Při dávkování 30 – 40 % dochází k technologickým problémům a poklesu pevnosti až o 50 %. Dále zvyšuje plastičnost a reologické vlastnosti těsta, díky obsaženým vláknům umožňují rychlejší sušení výlisků. Nevýhodou může být zápach při sušení a výpalu, náchylnost k tvorbě výkvětů a černých jader.

Výhodou je vysoká výhřevnost kalů z ČOV, uvádí se obvykle v intervalu hodnot 10,5 až 18,8 MJ·kg<sup>-3</sup>, což je srovnatelné s hnědým uhlím nebo palivovým dřevem.

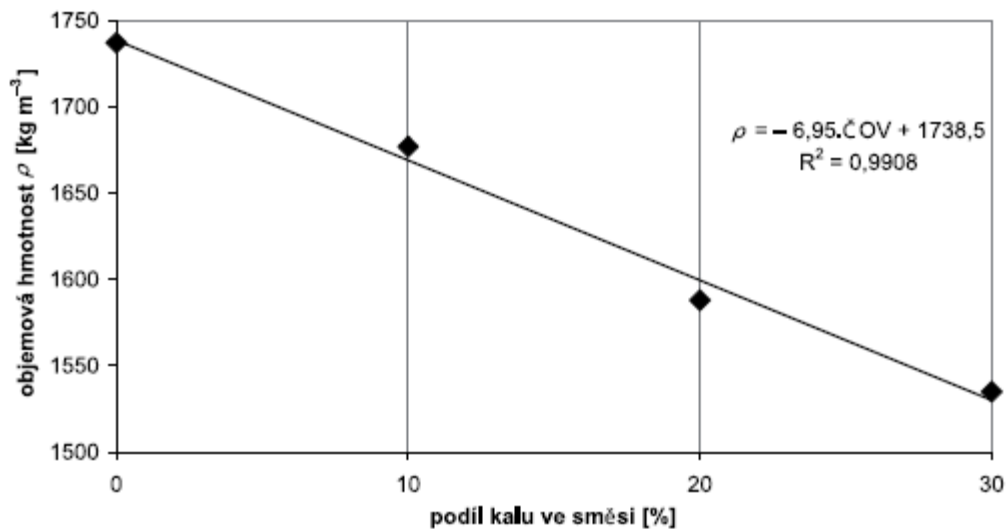
Cílem experimentu bylo srovnání pěti směsí, lišících se přídavkem lehčiva do základní cihlářské zeminy, která se používá pro výrobu tvarovek typu THERM, a to:

- zemina (100 %),
- zemina (90 %) + 10 % kal z ČOV,
- zemina (80 %) + 20 % kal z ČOV,
- zemina (70 %) + 30 % kal z ČOV,
- zemina (96 %) + 4 % dřevěné piliny.

Z těchto směsí byly vyrobeny vzorky s deformačním poměrem 0,6 dle Pfefferkorna. Na takto připravených vzorcích byla stanovena citlivost k sušení podle Bigota CSB a délková změna sušením DS. Na výsušcích byla provedena zkouška pevnosti v ohybu. Množství emisí během výpalu připravených vzorků

sledoval elektronický analyzátor spalin (TESTO M-I 300). Byla použita pálicí křivka s nárůstem teploty 250 °C/hod a maximální teplotou 950°C s výdrží 60 minut na této teplotě.

Kal prokázal dostatečnou lehčící schopnost – pro dosažení objemové hmotnosti vypáleného střepeu kolem 1 550 kg·m<sup>-3</sup>, postačí kolem 25 % kalu v surovinové směsi. Zvýšení množství kalu ve směsi s cihlářskou zeminou snižuje objemovou hmotnost vypáleného střepeu.



**Obr. č. 10.:** Vliv podílu kalu na objemovou hmotnost vypáleného střepeu [24]

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé směsi s obsahem kalu a pilin.

**Tabulka č. 3.:** Vlastnosti vypáleného střepeu [24]

Vlastnosti	Objemová hmotnost $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Nasákavost varem NV [%]	Pevnost v tahu za ohybu $\sigma$ [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
100 % zeminy	1 737	18,4	12,1	0,570
90 % zeminy + 10% kalu	1 677	20,4	11,3	0,483
80 % zeminy + 20 % kalu	1 588	24,8	10,0	0,470
70 % zeminy + 30 % kalu	1 535	27,4	8,7	0,442
96 % zeminy + 4 % pilin	1 580	22,8	9,0	0,472

Využití kalů z čistíček odpadních vod jako lehčiva v cihlářské výrobě představuje perspektivní možnost likvidace tohoto nebezpečného odpadu, jehož toxické látky

jsou pevně vázány ve struktuře střepeu. Z technologického hlediska je možné jejich vliv na vlastnosti plastického těsta i vypáleného střepeu označit ve všech směrech analogicky s kaly papírenskými, které se v cihlářské výrobě běžně používají.

### **3.5. Vuppor [25]**

Alternativní možnosti vylehčení je chemická přísada Vuppor. Byla vyvinutá v první polovině 90. let minulého století v rámci spolupráce mezi Výzkumným ústavem pro petrochemii v Prievidzi a Katedrou materiálového inženýrství Stavební fakulty STU v Bratislavě.

Jejím použitím v cihlářské surovině bylo možné ovlivnit některé technologické pochody a vlastnosti:

- zkrácení procesu sušení vlivem poklesu hodnoty citlivosti k sušení dle Pfefferkorna,
- zkrácení procesu pálení a snížení teploty výpalu zlepšením difuze plynů v pórovitém systému střepeu,
- zvýšení dávky vyhořívajících lehčiv už při malé dávce přísady bez vzniku tzv. černých jader,
- výrazné snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  střepeu už při poměrně nízké dávce.

Vuppor 1 je emulze bílé barvy vyrobená na bázi kondenzátu aldehydů (vyrobená z produktů ropy). Její hustota je  $1140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a obsah sušiny má 38 %. Příklad je ředitelná vodou a je hygienicky nezávadná.

Negativem této přísady je její vyšší pořizovací cena, ale především fakt, že v procesu sušení při teplotě nad  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k uvolňování čpavku. Z tohoto důvodu je možná aplikace pouze v kanálových nebo tunelových sušárnách.

Chemická přísada Vuppor 2 byla vyvinuta s cílem dosáhnout obdobných vlastností jako přísada Vuppor 1. Současně by měla být cenově přijatelnější, ekologicky příznivější a měla by být použitelná ve všech typech sušáren.

Jedná se o emulzi pískové barvy vyrobenou na bázi nevyužité druhotné suroviny z výroby organických kyselin. Její hustota je  $1160 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a obsah sušiny 54,9 %. Přísada je též ředitelná vodou.

Experiment byl prováděn s chemickou přísadou Vuppor 1. Byly vyráběny vzorky o rozměru 100 x 50 x 20 mm s množstvím přísady 1, 3, 5 a 8 %. Přísada s množstvím 8 % však zhoršovala zpracovatelnost suroviny, těsto bylo křehké, proto byl vzorek z dalšího zkoušení vyřazen.

Podle zjištěných vlastností vyplývá, že i s malou dávkou přísady se významně zvyšuje obsah vlhkosti ve vzorku. Mezi dávkou 5 a 8 % již není tak výrazný nárůst vlhkosti, lze tedy říci, že hraniční dávkou Vupporu je 7 %. Se zvyšující se dávkou klesá také citlivost k sušení CSB podle Bigota, snižuje se součinitel tepelné vodivosti a objemová hmotnost, vzrůstá pórovitost, což má za následek snižování pevnosti.

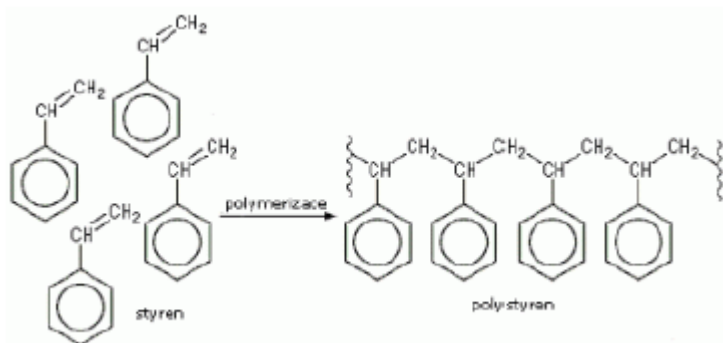
V dalším výzkumu došlo k dávkování 1 % Vupporu, což snižuje hodnoty objemové hmotnosti i součinitele tepelné vodivosti už při poměrně nízké vypalovací teplotě  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . S přítomností přísady se snižuje hodnota citlivosti k sušení, což umožňuje zkrácení doby sušení bez rizika vzniku trhlinek.

Zajímavým poznatkem tohoto výzkumu byla skutečnost, že s dávkou přísady se ztrácí rozdíl mezi surovinou bez a s vyhořívajícími lehčivými při sledování součinitele tepelné vodivosti. Ve vzorcích, kde byly aplikovány vyhořívající lehčiva, zvýšením pórovitosti výsušku zvýšením množství odpařené vody způsobilo v jeho vnitřku zvýšení vypalovací teploty lepším přístupem kyslíku. Toto zvýšení mělo za následek menší nárůst pórovitosti oproti vzorkům bez vyhořívajících lehčiv.

Vyhodnocením dosažených výsledků bylo jako ideální vybráno použití přísady Vuppor 2 v množství 0,5 % hm. ze sušiny, jakožto ekologičtější a ekonomičtější náhrady Vupporu 1. Účinnost Vupporu 2 však nebyla taková jako u typu 1, proto byla vyvinuta nová přísada Vuppor 1. Její vlastnosti byly vylepšeny a již nedochází k uvolňování čpavku při sušení.

### 3.6. Polystyren [26]

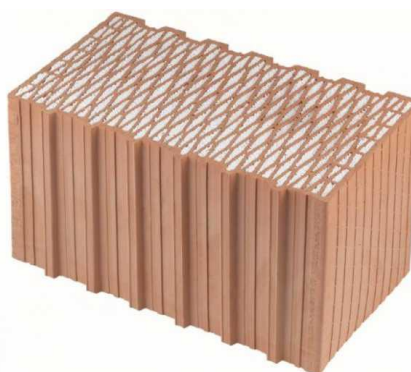
Polystyren je lehká pevná látka, která vzniká polymerizací styrenu. Patří mezi nejrozšířenější tepelně zpracovatelné plasty. V cihlářství lze využít expandovaný polystyren jako účinné lehčivo. Lze využít recyklovaný drcený polystyren nebo může cihelna disponovat vlastní napěňovací linkou.



**Obr. č. 11.:** Polymerizace styrenu [26]

Expandovaný polystyren podléhá teplotnímu rozkladu při teplotách 300 až 500 °C, aniž by po něm zůstal popel. Jedná se o přímo působící lehčivo. Při vyhoření uniká ve spalinách styren a benzen ve formě plynu, které jsou následně rozloženy na CO, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Průběh vyhoření je poměrně rychlý. Bod vznícení styrenu je větší než 450 °C, proto může být potřeba použít zařízení k dodatečnému spalování spalin, aby se zamezilo nežádoucímu úniku styrenu do ovzduší. Výhřevnost polystyrénu se pohybuje až okolo 40 MJ/kg v závislosti na objemové hmotnosti.

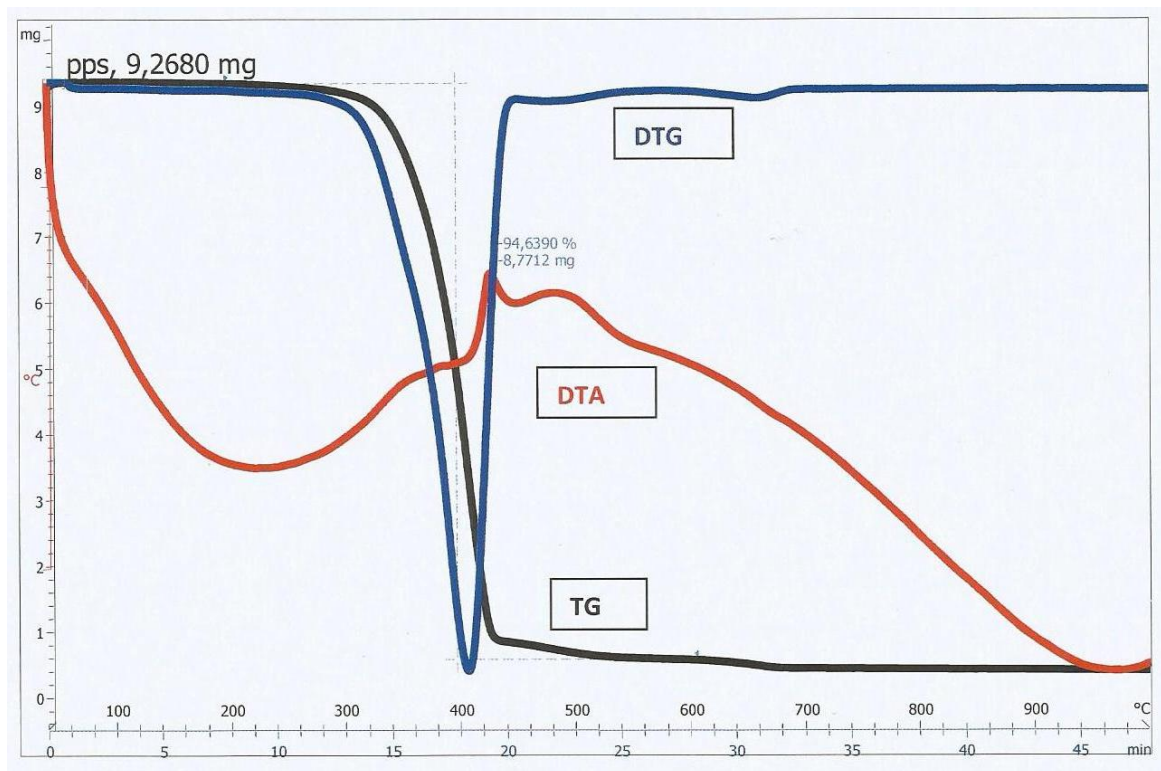
Polystyren v cihelném střepe má mnoho využití, lze jej využít buď jako lehčivo přímo do surovinové směsi, nebo jej využít na plnění děrovaných cihel.



**Obr. č. 12.:** Cihla plněna polystyrenem firmy Heluz Family 2v1 [19]

Do dutin cihel, které jsou běžně vyplněny pouze vzduchem, je vložen tepelný izolant, který brání přenosu tepla sáláním dvou navzájem protilehlých stěn dutiny ve výrobku. Tepelně izolační vlastnosti výrobku se tím zvýšily až o 40 %.

Expandovaný polystyren je v dutinách cihel pevně fixovaný pomocí speciální technologie výroby a i při vyřezávání otvorů pro elektroinstalace či úpravách velikostí bloku zůstává uvnitř cihel. Další výhodou je jejich paropropustnost, která zamezuje hromadění zkondenzované vodní páry, jak tomu může být u nesprávně provedených kontaktních zateplovacích systémů.



**Obr. č. 13.:** Analýza TG, DTA, DTG vzorku polystyrenu [26]

## 4. Tvarovky typu THERM

Cihelné zdivo má za sebou dlouhý vývoj v řádu tisíců let. Kvůli stoupajícím požadavkům na stavební materiály bylo třeba i keramické výrobky posouvat pomocí technologií dál. Dnes se již díky moderním technologiím a automatizacím výrobních procesů daří zajistit konstantní vlastnosti výrobků [19].

V současnosti hodnotu  $U = 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , která odpovídá doporučené hodnotě podle normy ČSN 73 0540-2:2007 pro vnější těžké stěny, bez problému splňuje jednovrstvé zdivo z cihelných bloků typu THERM o šířce 440 mm. Zdivo tloušťky 440 mm dosahuje součinitele prostupu tepla kolem hodnoty  $U = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  případně nižší. Tepelné vazby v místě rohů a napojení výplní otvorů jsou řešeny pomocí doplňkových cihel, takže je možné eliminovat vznik tepelných mostů v těchto detailech [19].

Z pohledu požadavků na zvýšení tepelného odporu zdiva se nevyvíjel pouze tvar cihel, ale i samotný keramický střep, spojovací malta, ale také omítky. Stejně jako v zahraničí se i v České republice začínají na trhu uplatňovat cihelné bloky o šířce 500 mm. Zdivo z těchto bloků dosahuje hodnot součinitele prostupu tepla nižší než  $U = 0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [15].

Tvarovky typu THERM jsou posledním stupněm vývoje cihlářských výrobků a systémů. Využívají speciálních tvarů otvorů, vylehčení struktury jemnými póry, zámkový systém zazubení atd. Těmito vlastnostmi splňuje současné požadavky na stavební dílo [15].

Tvarovky typu THERM jsou standardně dodávány s pevnostmi 8, 10 nebo s pevností 15 MPa, které nejsou z hlediska stavebních materiálů nikterak vysoké, ale spolu s tepelně izolačními vlastnostmi tvoří ideální kompromis jako materiál pro stavbu. Vylehčením dutinami je také snížena hmotnost tvarovky, což umožňuje rychlou a bezproblémovou manipulaci při výstavbě [15].



**Obr. č. 14.:** Tvarovka POROTHERM [19]



## 5. Emise unikající při výpalu - SO<sub>2</sub> a CO

Výpal v cihlářském průmyslu znečišťuje kouřovými plyny ovzduší. Škodlivé emise do ovzduší a následné imise poškozují životní prostředí, zvyšují korozi pecí a zařízení, a mimo jiné zhoršují pracovní prostředí [16].

Snižování emisí lze provádět čištěním kouřových plynů – většinou absorpcí na CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> nebo CaCO<sub>3</sub>, což ale vyžaduje investici do nákladných zařízení. Nebo lze emise snižovat modifikacemi pecních agregátů a teplotním režimem [16].

Emise CO vznikají nedokonalým vyhoříváním organických látek při teplotách 300 – 400 °C. Určujícím jevem je difuze kyslíku dovnitř střepe.

Při výpalu střepe vzniká SO<sub>2</sub> ve dvou teplotních pásmech. K první emisi SO<sub>2</sub> dochází přibližně při teplotě 450 °C a příčinou je oxidace pyritu obsaženého v surovinách. Průběh této oxidace je stupňovitý, s narůstající teplotou dochází nejprve k dočasnému zadržení SO<sub>2</sub> v síranech a poté dochází k opětovnému uvolňování oxidu siřičitého. Při této teplotě může vznikat SO<sub>2</sub> také oxidací uhlíkatých látek obsahující síru [20].

Druhá emise SO<sub>2</sub> začíná nad teplotou 750 °C a může pokračovat přes celý pálící cyklus. Jeho příčinou je rozklad síranů vytvořených na jílových minerálech. Tyto sírany jsou dočasně přítomné, dokud se s vyšší teplotou nerozloží. Pokud se kompletně nerozloží, je zde předpoklad, že střepe bude náchylný ke tvorbě výkvětů [20].

Emise SO<sub>2</sub> poškozují lesní porosty, lidské zdraví, korodují stavební díla a kovové konstrukce a mají vliv na výkvětovost cihel. Škodlivější účinek na lidské zdraví má H<sub>2</sub>S, který se může ojediněle vyskytnout při spalování topného oleje špatným seřizením hořáků. Původ sloučenin může být v palivu, ale i surovina obsahuje sírany a pyrit, které se při výpalu rozkládají na oxidy síry. Emise SO<sub>2</sub> jsou ovlivněny vedle obsahu v palivu a v surovině také teplotou výpalu, obsahem alkálií a alkalických zemin v surovině. Síra z jedné poloviny až dvou třetin zůstává ve výrobku, pouze cca 36 % se uvolňuje do ovzduší [20].

## **6. Metodika zkoušek**

### **6.1. Zkoušky vstupních surovin**

#### **6.1.1. Rentgenová difrakční analýza (RTG)**

Rentgenová difrakční analýza slouží ke stanovení mineralogického složení zkoumaného materiálu. Vychází z principu difrakce rentgenového záření, které dopadá na krystalickou látku. Každý krystal vykazuje soubor rovnoběžných mřížkových rovin proložených v různých směrech. Mezirovinnou vzdálenost označujeme jako  $d$ . Pokud známe hodnoty souboru mezerovitých vzdáleností pro různé materiály, můžeme pomocí této metody identifikovat minerál ve zkoumaném vzorku.

#### **6.1.2. Diferenční termická analýza (DTA) – ČSN 72 1083**

Tato metoda se používá k identifikaci jednotlivých složek zkoumané látky a společně s termogravimetrickou analýzou (TG) slouží i ke kvantitativnímu určení složek. Principem této analýzy je zjišťování rozdílu nárůstu teploty zkoumaného vzorku inertního materiálu, výsledkem je graf s výstupky (píky). Pokud je směr křivky v grafu vodorovný, nedochází ve vzorku k žádným změnám. Pík směřující dolů indikuje, že zkoumaný vzorek má menší teplotní přírůstek než inertní materiál a tudíž v něm došlo k endotermní reakci (např. k uvolnění chemicky vázané vody). Exotermní reakci může být vyhořívání organických látek a větší teplotní přírůstek indikuje pík směřující nahoru. Z křivky lze identifikovat látku a popřípadě stanovit reakční teplo a sledovat mechanismus a kinetiku reakcí. TG analýza zaznamenává úbytky hmotnosti v průběhu zahřívání vzorku a umožňuje tak při znalosti příslušných chemických rovnic určit kvantitativní zastoupení složek.

#### **6.1.3. Dilatometrická termická analýza (DKTA) – ČSN 72 1083**

Používá se pro stanovení objemových změn zkoušených látek v závislosti na teplotě. Při znalostech standardních křivek materiálů, u kterých se předpoklá-

dá jejich přítomnost ve vzorku, lze určit mineralogické složení zkoušené látky. Tato metoda se využívá také pro sledování lineárních změn výrobních směsí sloužících jako podklad pro určení pálicí křivky cihlářských výrobků.

## 6.2. Zkoušky plastického těsta

### 6.2.1. Plastičnost podle Pfefferkorna – ČSN 72 1074

Plastičnost vytvářecích těst byla stanovena na základě deformačního poměru na Pfefferkornově přístroji. Z keramického těsta byly vyrobeny zkušební válečky o průměru  $33 \pm 0,5$  mm a výšky  $40 \pm 0,1$  mm s určitým množstvím vlhkosti. Zkušební přístroj se pomocí stavěcích šroubů vyrovnal do vodorovné polohy. Vytvořené zkušební těleso bylo postaveno na podložku a bylo na něj volně spuštěno závaží o hmotnost 1200 g z výšky  $h_0 = 185$  mm. Poté byla změřena výška deformovaného tělesa a vypočten deformační poměr ze vztahu:

$$d = \frac{h_n}{h_0} [-]$$

$h_n$  výška válečku po deformaci [mm]

$h_0$  výška válečku před deformací [mm]

$d$  deformační poměr [-]

### 6.2.2. Stanovení vlhkosti pracovní směsi

Vlhkost materiálu představuje fyzikálně-mechanicky vázaná voda, kterou lze sušením odstranit. Zvážíme nejdříve vyrobený vzorek (vlhký), který necháme v laboratorní sušárně vysušit do konstantní hmotnost při teplotě 110 °C. Vlhkost poté vypočítáme ze vztahu:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

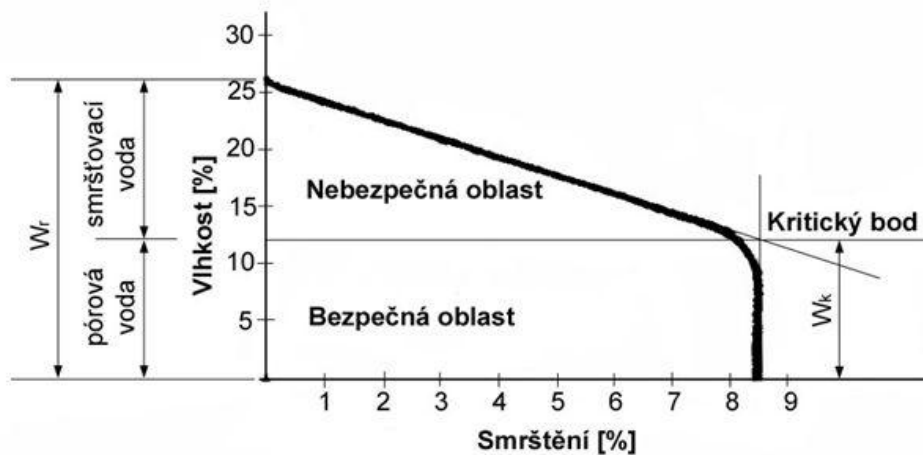
$m_w$  hmotnost vlhkého vzorku [g]

$m_s$  hmotnost vysušeného vzorku [g]

$w$  vlhkost [%]

### 6.2.3. Stanovení citlivosti k sušení – ČSN 72 1565 – 11

Metodou podle Bigota byla na zkušebních vzorcích stanovena kritická vlhkost  $w_k$  a koeficient citlivosti k sušení CSB. Při určování těchto vlastností sledujeme vzorek a v pravidelných časových intervalech měříme jeho hmotnost a smrštění. Na vzorcích byly hned po vytvoření vytlačeny obtisky pomocí posuvného měřidla a po dobu 48 hodin byl v pravidelném časovém intervalu měřen úbytek hmotnosti a smrštění vzorku. Hodnoty byly poté vneseny do grafu a proložením přímek Bigotovy křivky se určí kritický bod, který označuje oblast bezpečnou a nebezpečnou, teda množství vody smršťovací a vody pórové.



Obr. č. 15.: Bigotova křivka [30]

Koeficient citlivosti k sušení podle Bigota se poté vypočte vztahem:

$$CSB = \frac{w_r - w_l}{w_k} [-]$$

$w_r$  skutečná vlhkost těsta [%]

$w_k$  kritická vlhkost těsta [%]

CSB koeficient citlivost k sušené podle Bigota [-]

Zeminu lze poté podle velikosti koeficientu zatřídít do jedné ze čtyř skupin:

CSB < 1 zemina málo citlivá k sušení

CSB = 1 – 1,5 zemina středně citlivá k sušení

CSB = 1,5 – 2 zemina citlivá k sušení

CSB > 2 zemina silně citlivá k sušení

## 6.3. Zkoušky na vysušeném vzorku

### 6.3.1. Délková změna sušením – ČSN 72 1565 – 5

V procesu sušení dochází k odpaření obsažené vody z výlisku. Vlivem odpařování se k sobě částice přibližují a dochází ke smršťování. Čím více jemných částic a vody těsto obsahuje, tím větší délkové změna v podobě kontrakce ve výlisku nastane. Při stanovení velikosti smrštění se změří výlisek ihned po odformování a stejný rozměr se změří po vysušení vzorku, kdy se již nesmršťuje. Délková změna sušením se vypočítá ze vztahu:

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

$l_s$  délka vzorku po vysušení [mm]

$l_z$  délka vzorku před vysušením [mm]

DS délková změna sušením [%]

## 6.4. Zkoušky na vypáleném vzorku

### 6.4.1. Délková změna pálením – ČSN 72 1565 – 11

Pokud známe délku vysušeného tělesa, můžeme po jeho výpalu zjistit délkovou změnu pálením. V průběhu výpalu dochází k řadě reakcí, které ve většině případů způsobují další kontrakce výrobku. Stejný rozměr jako u výsušku (délku) změříme i u vypáleného výrobku a délkovou změnu pálením vypočteme ze vztahu:

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

$l_p$  délka vzorku po výpalu [mm]

$l_s$  délka vzorku před výpalem [mm]

DP délková změna pálením [%]

Celkovou délkovou změnu lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$DC = DP + DS [\%]$$

DP délková změna pálením [%]

DS délková změna sušením [%]

DC celkové délková změna [%]

#### 6.4.2. Ztráta hmotnost pálením

Zkušební vzorky zvážíme před a po výpalu. Ztrátu hmotnosti pálením vypočteme ze vztahu:

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

$m_s$  hmotnost vzorku po vysušení [g]

$m_p$  hmotnost vzorku po výpalu [g]

ZP ztráta hmotnosti pálením [%]

#### 6.4.3. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost vyjadřuje poměr hmotnosti včetně dutin a pórů na jednotku objemu. Stanovení probíhá na vytárovaném závěsu pomocí hydrostatického vážení. Hmotnost nasáklého vzorku zjistíme tak, že vzorek necháme po dobu 2 hodin vařit (stále ponořený) a poté jej uložíme na 24 hodin do vodního prostředí. K výpočtu je třeba znát hmotnosti výrobku, které dosadíme do vztahu:

$$OH = \frac{m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot \rho_v [kg \cdot m^{-3}]$$

$m_s$  hmotnost vysušeného výrobku [kg]

$m_n$  hmotnost nasáklého výrobku [kg]

$m_{nv}$  hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky [kg]

$\rho_v$  objemová hmotnost vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

OH objemová hmotnost [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

#### 6.4.4. Nasákavost

Nasákavost je jedním z nejdůležitějších parametrů, který charakterizuje mikrostrukturu keramického střepe, a to konkrétně jeho pórovitou strukturu. Patří k nejčastějším zkouškám v keramice. Vysoká nasákavost odpovídá pórovité struktuře, zatímco hutný a slinutý výrobek má nasákavost nízkou. Stanovuje se v % jako poměr hmotnosti vody pohlcené zkušebním vzorkem ke hmotnosti vysušeného vzorku za podmínek stanovených normou.

Výpočet nasákavosti:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

$m_s$  hmotnost vysušeného výrobku [kg]

$m_n$  hmotnost nasáklého výrobku [kg]

NV nasákavost [%]

#### 6.4.5. Zdánlivá pórovitost

Zdánlivá pórovitost udává poměr objemu otevřených pórů k celkovému objemu vzorku včetně pórů. Zkoušku provádíme společně se stanovením objemové hmotnosti a nasákavosti.

Výpočet zdánlivé pórovitosti:

$$PZ = \frac{(m_n - m_s)}{(m_n - m_{nv})} \cdot 100 = NV \cdot \frac{OH}{1000} [\%]$$

$m_s$  hmotnost vysušeného výrobku [g]

$m_n$  hmotnost nasáklého výrobku [g]

$m_{nv}$  hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky [g]

PZ zdánlivá pórovitost [%]

NV nasákavost [%]

OH objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

#### 6.4.6. Zdánlivá hustota

Zdánlivá hustota udává hmotnost vysušeného vzorku na jednotku objemu včetně uzavřených pórů. Vzorky se váží hydrostaticky.

Výpočet zdánlivé hustoty:

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot 1000 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

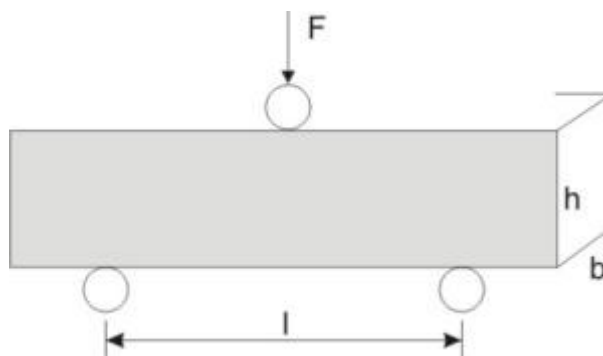
$m_s$  hmotnost vysušeného výrobku [g]

$m_{nv}$  hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky [g]

ZH zdánlivá hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

#### 6.4.7. Pevnost v tahu za ohybu

Zkušební vzorek je podepřen dvěma podporami ve vzdálenosti  $l$ , ve vzdálenost  $l/2$  od podpory je vzorek zatěžován silou  $F$ , dokud nedojde k porušení vzorku.



**Obr. č. 16.:** Pevnost v tahu za ohybu [26]

Pevnost v tahu za ohybu vypočteme podle následujícího vztahu:

$$R_t = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [MPa]}$$

$F$  síla v okamžiku porušení vzorku [N]

$l$  rozpětí podpor [mm]

$b$  šířka zkušebního vzorku [mm]

$h$  tloušťka zkušebního vzorku [mm]

$R_t$  pevnost v tahu za ohybu [MPa]



#### 6.4.8. Součinitel tepelné vodivosti

K měření byl použit měřicí přístroj ISOMET 2114, který slouží k měření tepelně technických veličin čítajících tepelnou vodivost materiálu  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], objemovou tepelnou kapacitu  $\rho_c$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ] a teplotní vodivost  $\alpha$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Měření lze provádět na široké škále stavebních materiálů. Pro materiály sypké, měkké a jinak nesoudržně hmoty (minerální vlna, PU pěna, zemina, aj.) použijeme jehlové sondy. Pro tvrdé stavební materiály (tvárnice, beton, polystyren, dřevo, aj.) se použije povrchový typ sondy. Minimální tloušťka vrstvy měřeného materiálu je 20 – 40 mm v závislosti na tepelné vodivosti materiálu.

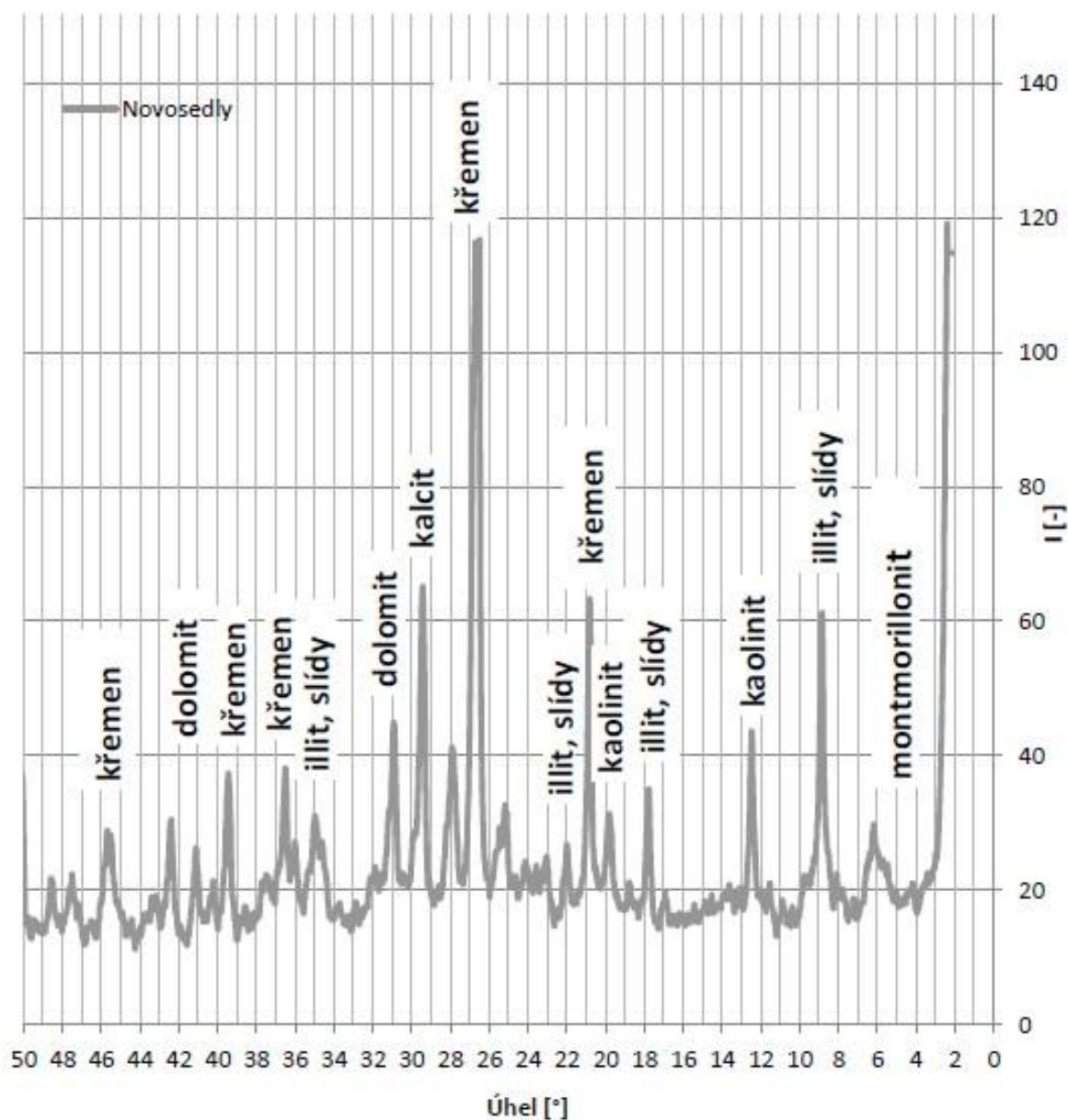


**Obr. č. 17.:** Isomet 2114 [28]

Princip měření je založen na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku ze sondy do materiálu. Tepelný tok vzniká rozptýleným elektrickým výkonem v odporu sondy. Její povrch je tepelně vodivě spojen s měřeným materiálem. Teplota odporu je snímána polovodičovým snímačem. Průběh teploty jako funkce času je v diskrétních bodech vzorkován a těmito vzorky jsou proloženy regresní polynomy matematickou metodou nejmenších čtverců. Koeficienty regresních polynomů potom slouží k výpočtu termofyzikálních parametrů analytických vztahů [27], [28].

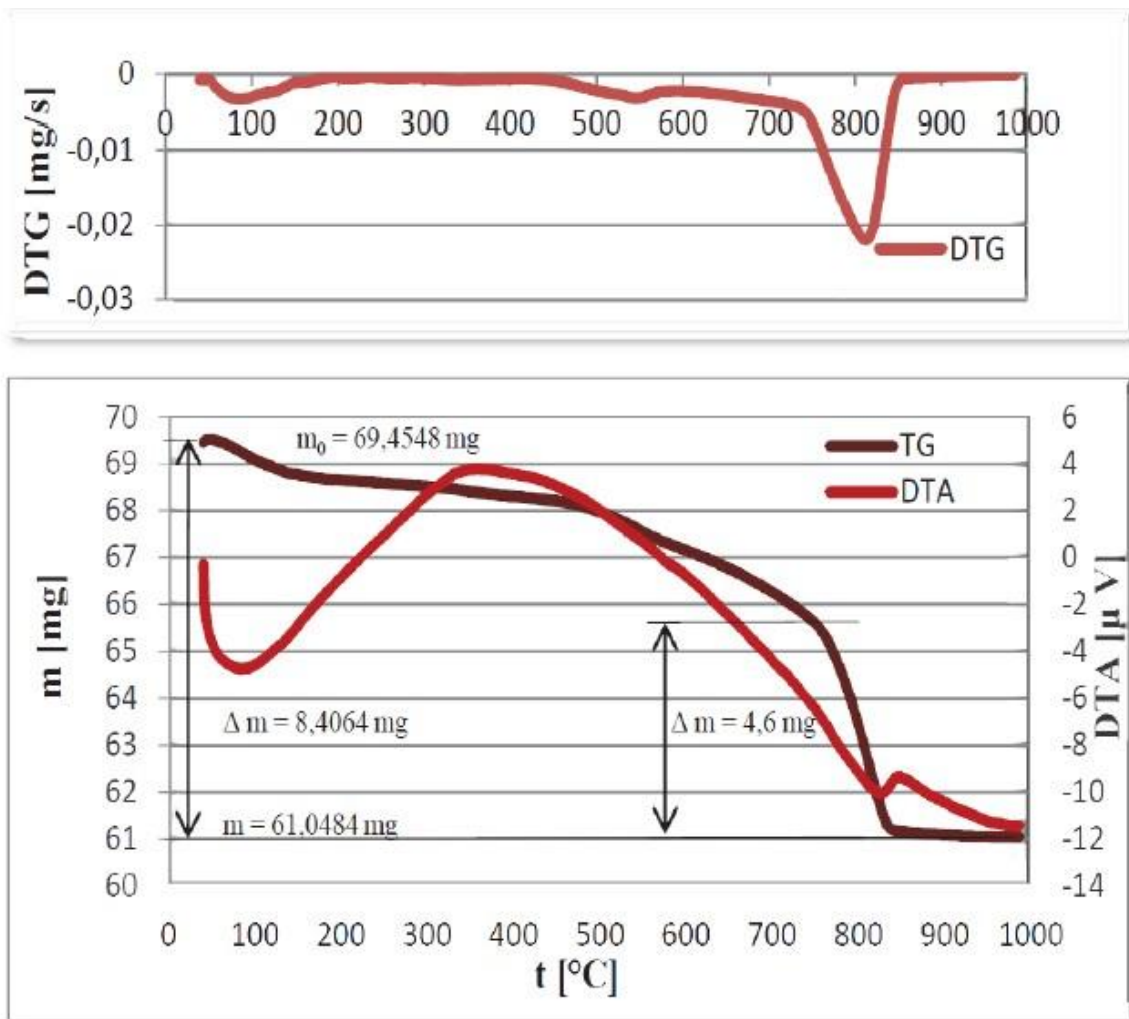
## 7. Experimentální část

Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita zemina od společnosti Wienerberger cihlářský průmysl a.s., vápenatá z cihelny Novosedly a nevápenatá z cihelny Týn nad Vltavou.



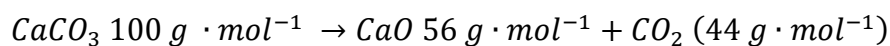
**Obr. č. 18.:** RTG – rentgenová difrakční analýza – zemina Novosedly [26]

Mineralogické složení: illit, křemen, kalcit, kaolinit, dolomit a montmorillonit [26].



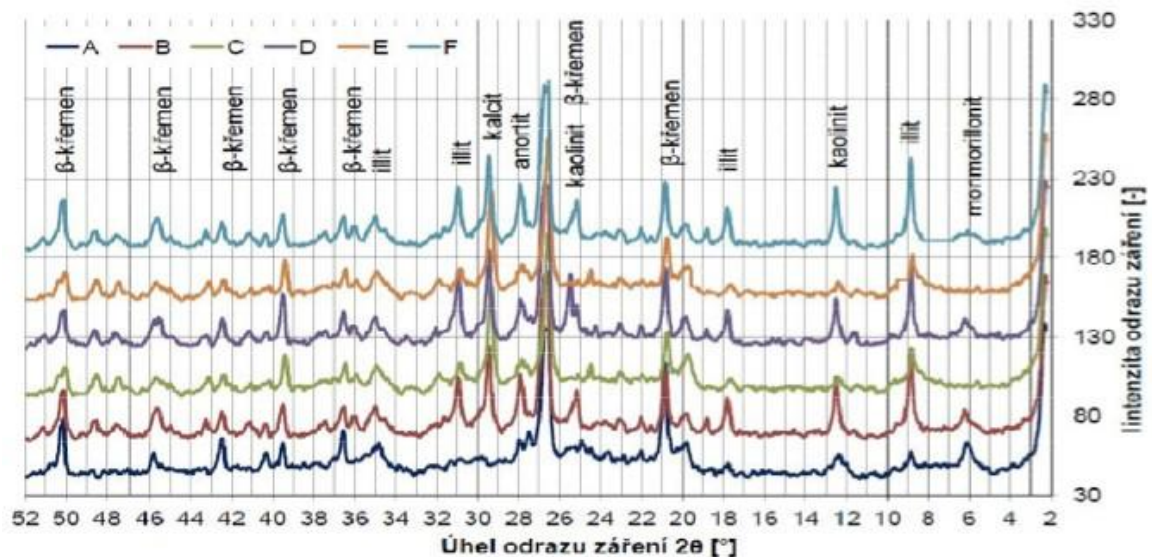
**Obr. č. 19.:** DTG, DTA a TG zeminy Novosedly [26]

Z výše uvedeného grafu lze vysledovat chování zeminy během výpalu. V první fázi dochází k dehydrataci až do teploty 180 °C. Při teplotě 480 až 600 °C dochází k dehydroxylaci jílových minerálů. Celková ztráta žíháním je 12,1 %. Při teplotě 750 až 850 °C dochází k dekarbonataci vápence. Úbytek hmotnosti odpovídá množství uvolněného CO<sub>2</sub> z vápence, z čehož lze vypočítat množství vápence v zemině.



$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{\Delta m}{44} \cdot 100 = \frac{4,6}{44} \cdot 100 = 10,5 \text{ g}$$

V zemině Novosedly je tedy přibližně 15,1 % vápence [26].



**Obr. č. 20.:** RTG difrakční analýza: A – Týn nad Vltavou (nevápenatá zemina),  
B – Novosedly (vápenatá zemina) [25]

U vzorku A, z nevápenaté zeminy do teploty až 200 °C dochází k odchodu fyzikálně vázané vody – dehydrataci. V rozmezí teplot 450 – 550 °C dochází k dehydroxylaci.

Nevápenatá zemina dle očekávání neobsahuje kalцит a anorit. Chemická analýza potvrdila minimální obsah CaO – 1,12 %, zatímco vápenatá zemina obsahuje CaO v rozsahu od 8 – 10 % [25].

### 7.1. Vytváření zkušebních vzorků

Vysušená zemina byla namleta na kolovém mlýně a následně proseta přes síto o velikosti oka 2 mm. Byla použita vápenatá zemina Novosedly a nevápenatá zemina z Týna nad Vltavou.

K zemině se přidala organická vyhořívající látka (druh a dávkování je uvedeno v tabulce č. 4.) a takto vzniklá suchá směs se 24 hodin homogenizovala.

Pro experimentální zkoušení byly vyráběny normalizované zkušební vzorky (ČSN 72 1565-4) o rozměrech 100 x 50 x 20 mm. Byly zhotoveny ručním vytvářením z plastického těsta při deformačním poměru 0,6 na Pfefferkornově přístroji.

Cihličky byly vytvářeny stloukáním těsta do formy pomocí gumové palice. Přebytek těsta byl seříznut ocelovou strunou a povrch zahlazen stěrkou. Dno formy bylo kvůli snadnějšímu vyjmutí vzorku vyloženo papírem, který byl ihned

po vytvoření cihelky odstraněn. Vzorky byly zváženy a umístěny na rošt, kde se nechaly volně vysychat po dobu 48 hodin, v této době probíhalo pravidelné vážení a měření. Do jednoho vzorku od každé směsi byl po vyrobení vložen termočlánek, který sloužil ke zjištění teploty uvnitř vzorku během výpalu. Před výpalem byly všechny vzorky dosušeny do konstantní hmotnosti v laboratorní sušárně při teplotě 110 °C a poté opět zváženy a změřeny. Na výsušcích byla určena citlivost k sušení podle Bigota, smrštění sušením a součinitel tepelné vodivosti.

Jako poslední krok byly vzorky vypáleny na teplotu 800 °C s růstem teploty 3 °C/min s izotermickou výdrží 30 minut. Další směsi za použití pilin, mouky a otrub byly vypáleny v další etapě s růstem teploty 2,5 °C/min s izotermickou výdrží 45 minut.

Při výpalu byla sledována teplota uvnitř cihelky pomocí analogového teploměru K 204 a zabudovaného termočláneku uprostřed vzorku. Na vypálených vzorcích byly následně provedeny následující zkoušky: smrštění pálením, celkové smrštění, objemová hmotnost, nasákavost, zdánlivá pórovitost, pevnost v tahu za ohybu a součinitel tepelné vodivosti.



**Obr. č. 21.:** Analogový teploměr K204 s termočláneky zabudovanými uvnitř cihliček

Analogový teploměr K204 slouží k měření teplot v rozsahu -200 až +1370 °C s velmi vysokou přesností měření. Přístroj je vybaven rozhraním, díky kterému můžeme s dodaným softwarem přenášet naměřená data do svého počítače a zpracovávat je.

**Tabulka č. 4.: Dávkování a sypná hmotnost lehčiv**

Lehčivo	Dávkování (hmotnostní)	Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]
Kukuřice	5 %	217
Sláma	1,7 %	88
Konopí	5 %	134
Rašelina	5 %	118
Papírenský kal	10 %	640
Antracit	2 %	1002
Mouka	5 %	594
Otruby	5 %	420
Piliny	5 %	166

## 7.2. Zemina Novosedly

V této kapitole budou shrnuty výsledky z měření za použití vápenaté zeminy Novosedly. Z této zeminy bylo vyrobeno 9 směsí, ke kterým bylo přidáno lehčivo – kukuřice, sláma, konopí, rašelina, papírenský kal, antracit, mouka, otruby a piliny. Každý vzorek byl následně vypálen společně s referenčním vzorkem (vzorkem pouze z hlíny), u kterých byla sledována teplota uvnitř vzorku při výpalu s nárůstem teploty 3 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut.



**Obr. č. 22.:** Vápenaté zemina (vlevo) a nevápenatá zemina (vpravo)

### 7.2.1. Kukuřice

Na tuto směs byla jako lehčivo použita kukuřičná podestýlka v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 1.

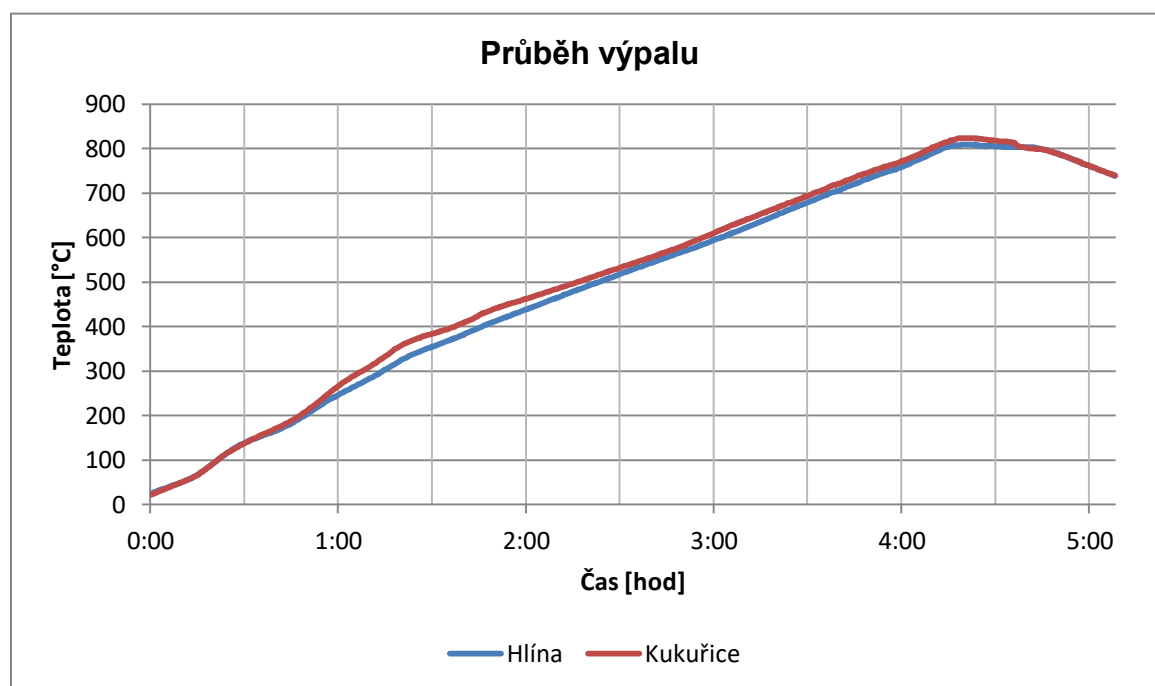
**Tabulka č. 5.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro kukuřičnou podestýlku

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
31,0	0,94	-0,12	-0,17	-0,29	14,59	50,19	2645
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
38,1	1605	1334	0,7318	0,5323	3,3		



**Obr. č. 23.:** Kukuřičná podestýlka [36]

**Graf č. 1.:** Průběh výpalu kukuřičné podestýlky a hlíny



## 7.2.2. Sláma

Na tuto směs byla jako lehčivo použita sláma v dávkování 1,7 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 2.

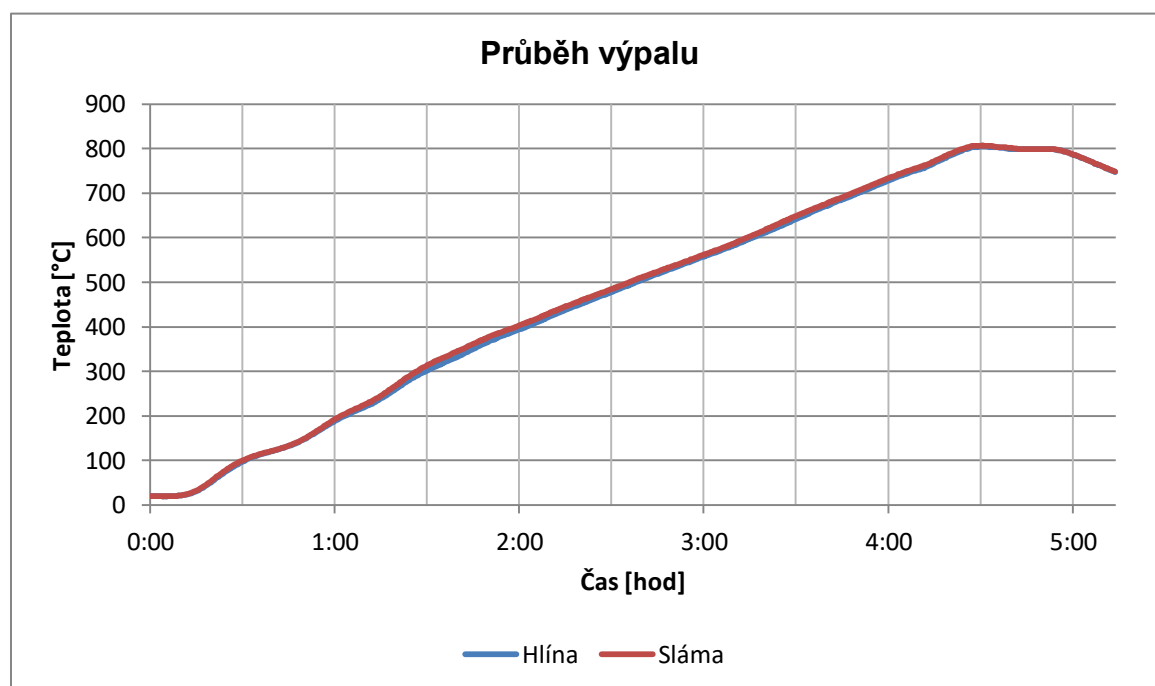
**Tabulka č. 6.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro slámu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
27,9	0,59	-0,97	-0,50	-1,46	11,33	42,45	2686
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
27,5	1756	1428	-	0,6727	4,9		



**Obr. č. 24.:** Sláma

**Graf č. 2.:** Průběh výpalu slámy a hlíny





### 7.2.3. Konopné pazdeří

Na tuto směs bylo jako lehčivo použito konopné pazdeří v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 7. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 3.

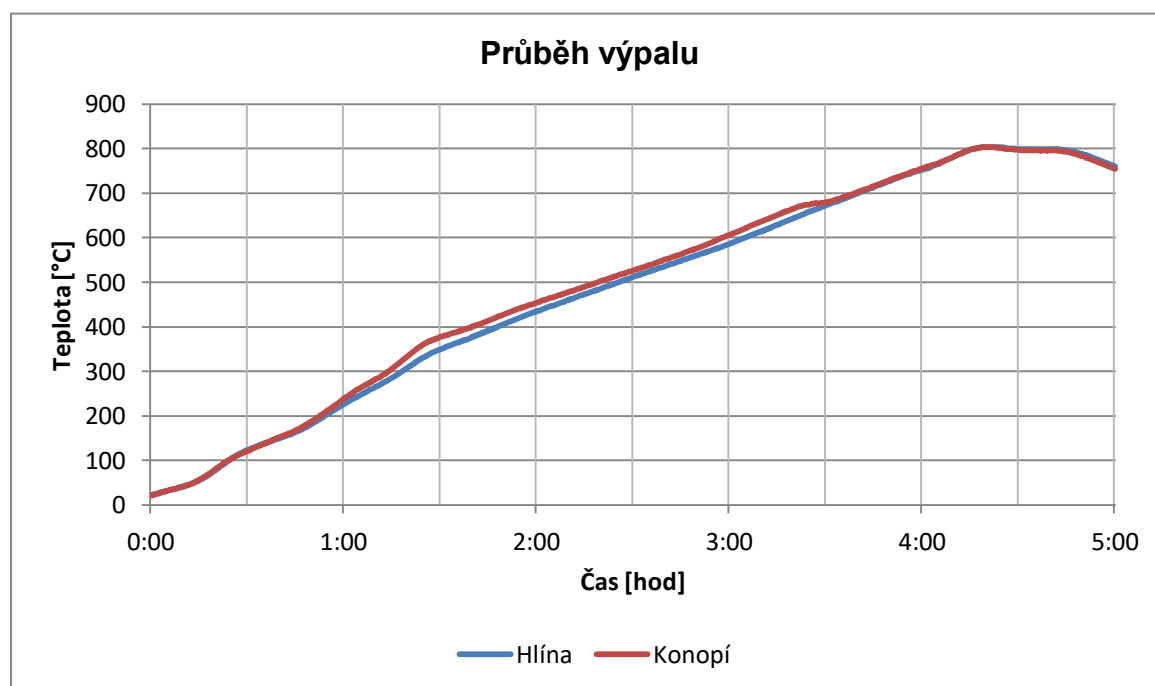
**Tabulka č. 7.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro konopné pazdeří

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
30,6	0,98	-0,47	-0,69	-1,15	14,78	51,72	2650
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
40,4	1486	1194	-	0,4494	2,3		



**Obr. č. 25.:** Konopné pazdeří [37]

**Graf č. 3.:** Průběh výpalu konopného pazdeří a hlíny



## 7.2.4. Rašelina

Na tuto směs byla jako lehčivo použita rašelina v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 8. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 4.

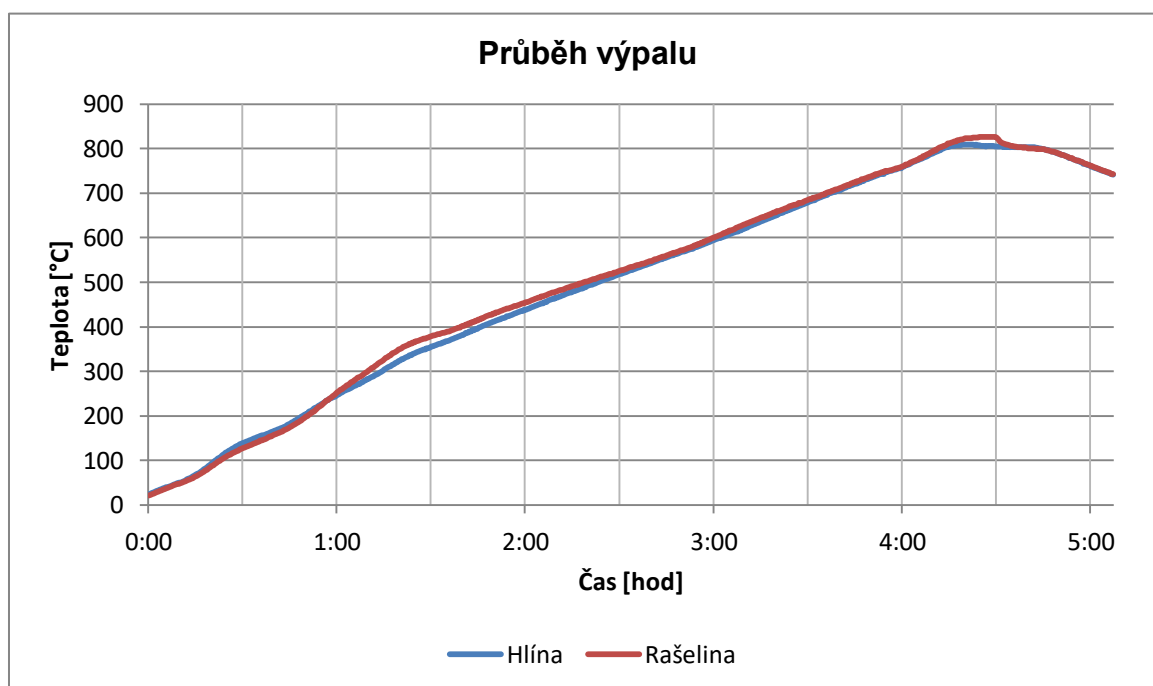
**Tabulka č. 8.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro rašelinu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
36,6	0,83	-0,71	0,16	-0,55	13,66	47,81	2541
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
36,1	1631	1371	0,8159	0,7148	3,3		



**Obr. č. 26.:** Rašelina [38]

**Graf č. 4.:** Průběh výpalu rašeliny a hlíny



### 7.2.5. Papírenský kal

Na tuto směs byl jako lehčivo použit papírenský kal v dávkování 10 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 9. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 5.

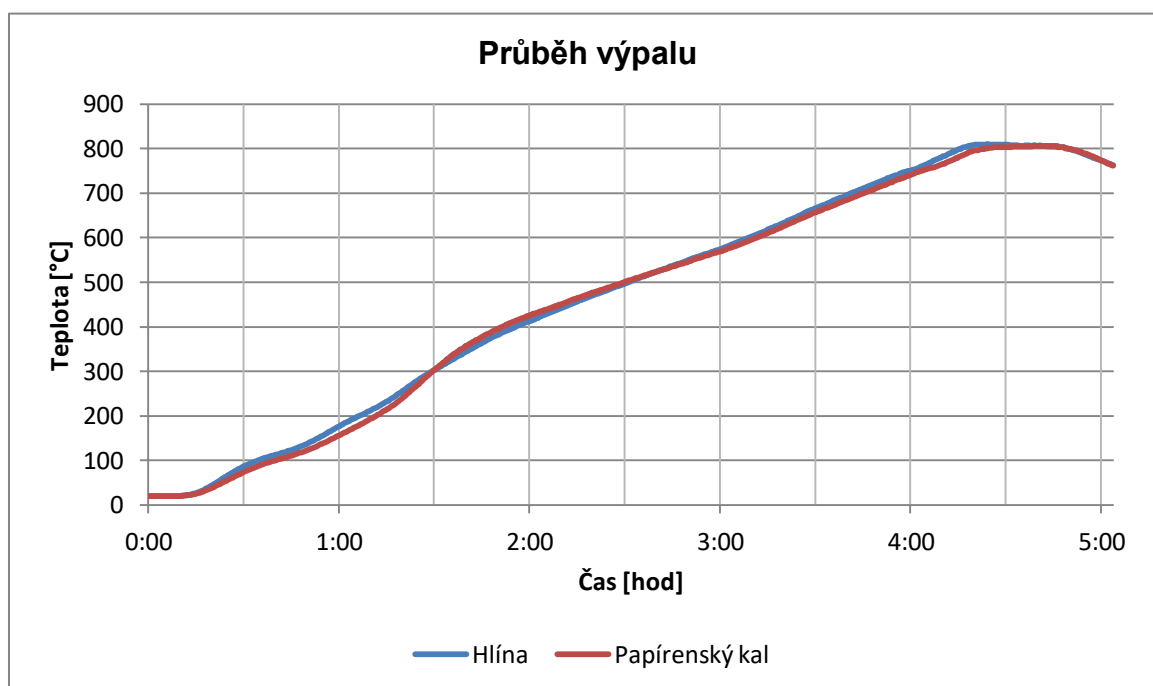
**Tabulka č. 9.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro papírenský kal

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
31,0	2,38	-1,09	-0,24	-1,33	10,74	42,52	2598
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
28,5	1732	1505	0,8706	0,8386	4,7		



**Obr. č. 27.:** Papírenský kal

**Graf č. 5.:** Průběh výpalu papírenského kalu a hlíny



### 7.2.6. Antracit

Na tuto směs byl jako lehčivo použit antracit v dávkování 2 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 10. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 6.

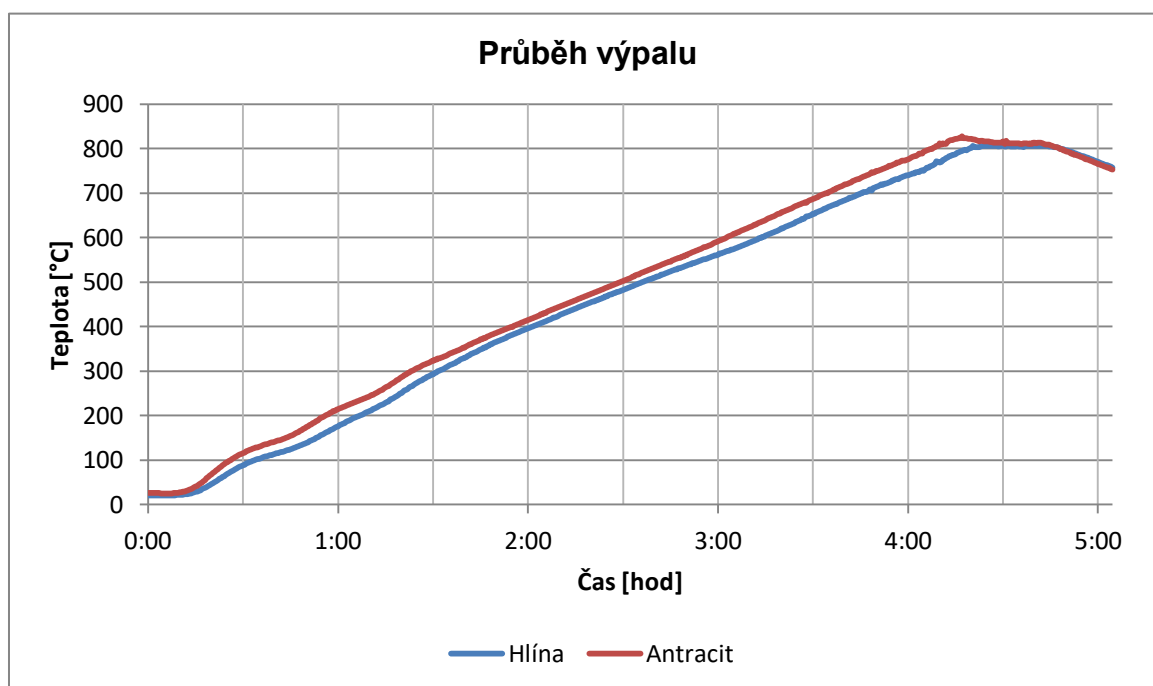
**Tabulka č. 10.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro antracit

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
28,6	0,76	-1,27	0,03	-1,24	10,89	43,61	3143
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
24,6	1759	1537	1,2908	0,6764	5,9		



**Obr. č. 28.:** Antracit

**Graf č. 6.:** Průběh výpalu antracitu a hlíny



## 7.2.7. Mouka

Na tuto směs byla jako lehčivo použita mouka v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 11. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 7.

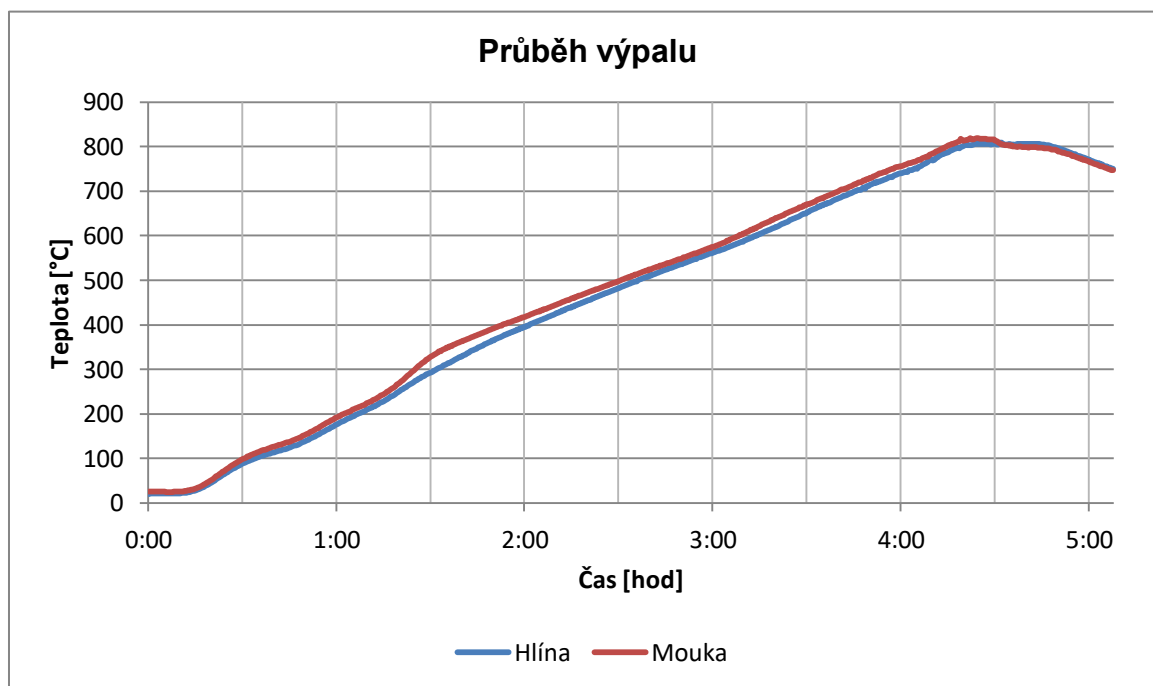
**Tabulka č. 11.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro mouku

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
32,4	0,51	-0,30	-0,55	-0,85	14,35	47,23	2642
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
33,9	1688	1417	1,0284	0,4112	4,6		



**Obr. č. 29.:** Mouka

**Graf č. 7.:** Průběh výpalu mouky a hlíny



## 7.2.8. Otruby

Na tuto směs byly jako lehčivo použity otruby v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 12. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 8.

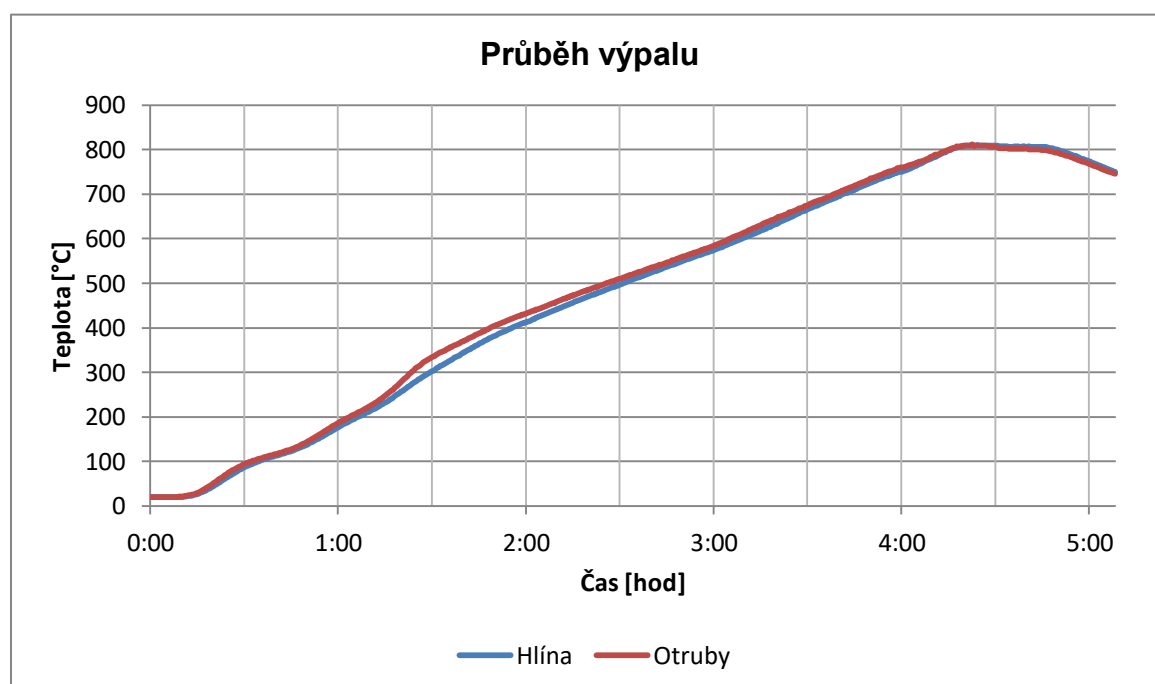
**Tabulka č. 12.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro otruby

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
36,8	1,08	-0,52	-0,66	-1,18	13,25	50,22	2660
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
37,9	1727	1417	0,6592	0,6995	3,8		



**Obr. č. 30.:** Otruby

**Graf č. 8.:** Průběh výpalu otrub a hlíny



### 7.2.9. Piliny

Na tuto směs byly jako lehčivo použity piliny v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 13. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 9.

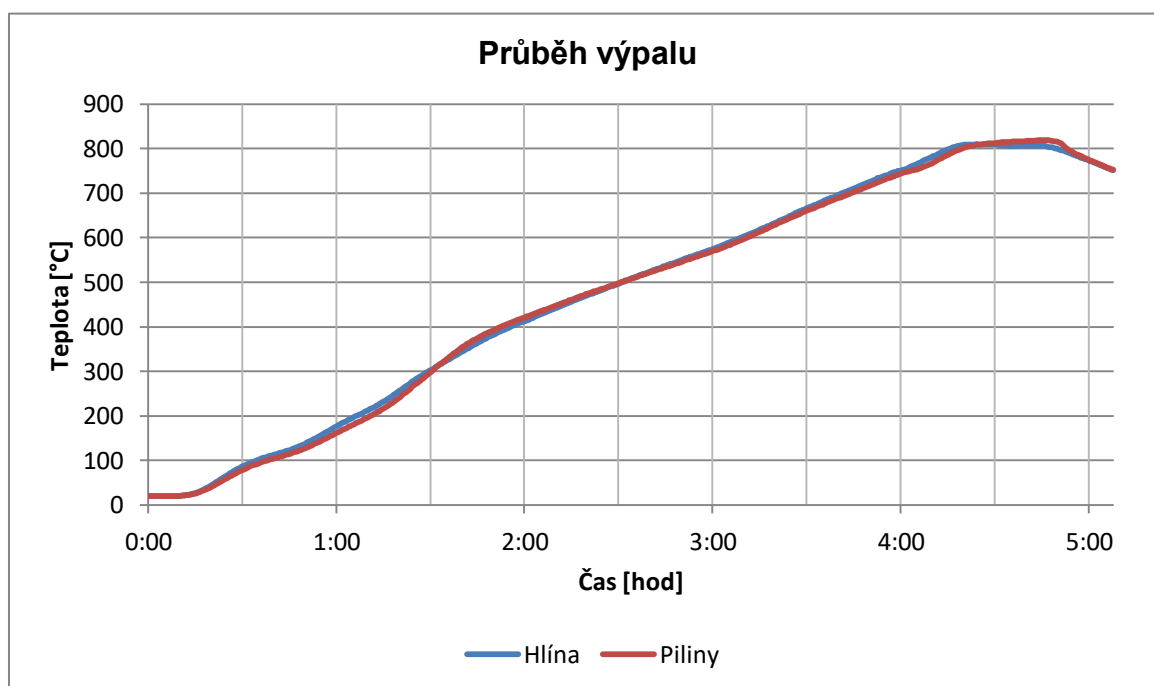
**Tabulka č. 13.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro piliny**

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
27,9	0,92	-1,67	0,69	-0,98	12,40	44,96	2593
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
31,5	1569	1412	0,7299	0,3790	5,4		



**Obr. č. 31.: Piliny**

**Graf č. 9.: Průběh výpalu pilin a hlíny**



### 7.3. Zemina Týn nad Vltavou

V této kapitole budou shrnuty výsledky z měření za použití nevápenaté zeminy z Týna nad Vltavou. Z této směsi byly vyrobeny 4 směsi, ke kterým bylo přidáno lehčivo. Nárůst teploty byl stejný jako za použití vápenaté zeminy z Novosedel, a to 3 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut. Jako lehčivo byl použit antracit, mouka, otruby a piliny.

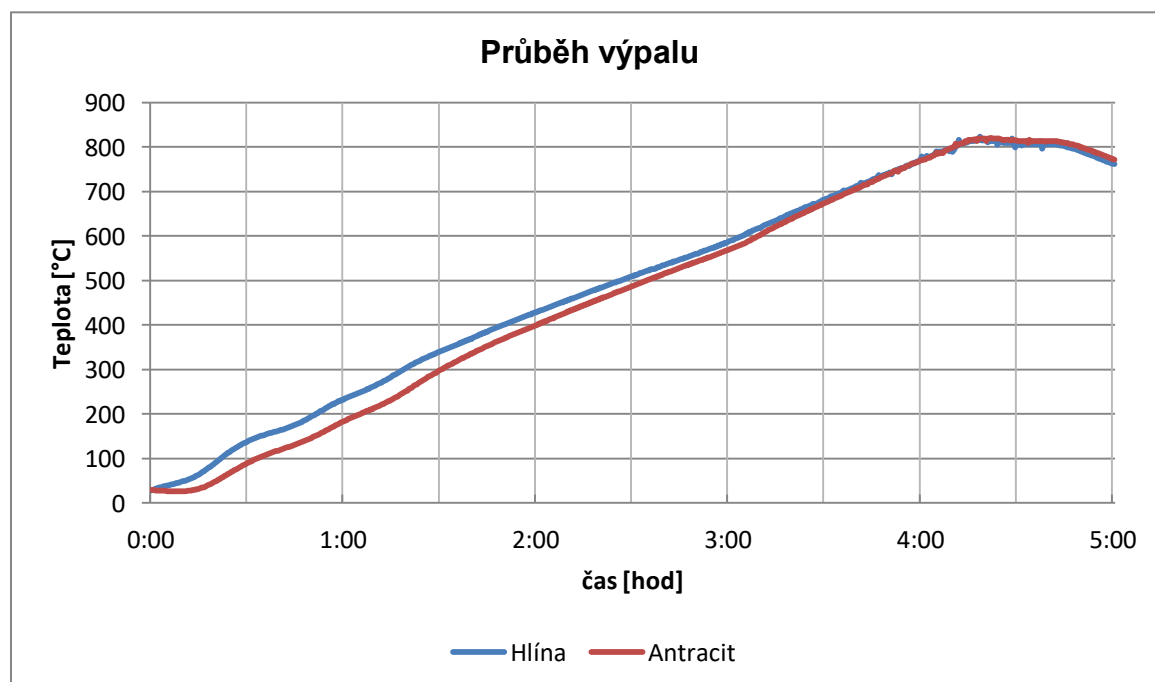
#### 7.3.1. Antracit

Na tuto směs byl jako lehčivo použit antracit v dávkování 2 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 14. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 10.

**Tabulka č. 14.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro antracit a nevápenatou zeminu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
22,4	0,76	-1,23	0,28	-0,95	4,73	31,23	2604
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
17,4	1897	1843	1,2598	0,6220	3,9		

**Graf č. 10.:** Průběh výpalu antracitu a nevápenaté hlíny





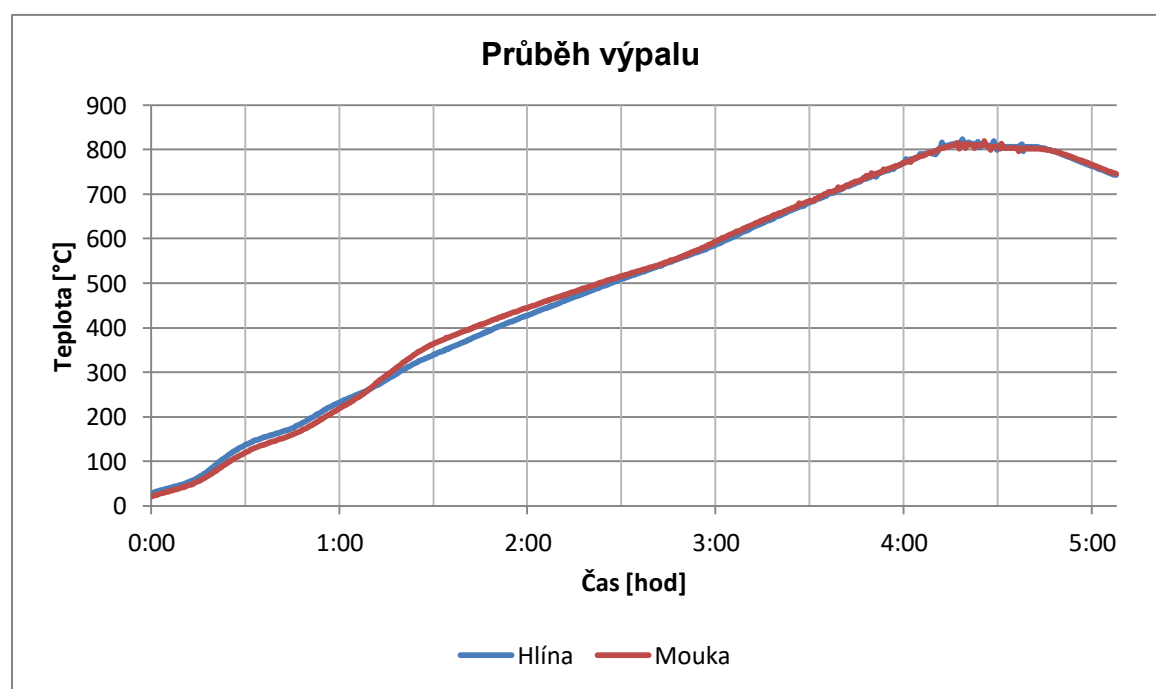
### 7.3.2. Mouka

Na tuto směs byla jako lehčivo použita mouka v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 15. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 11.

**Tabulka č. 15.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro mouku a nevápenatou zeminu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
32,0	0,92	-0,70	0,05	-0,65	3,75	37,79	2634
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
15,2	1865	1762	0,9985	0,4420	1,3		

**Graf č. 11.:** Průběh výpalu mouky a nevápenaté hlíny



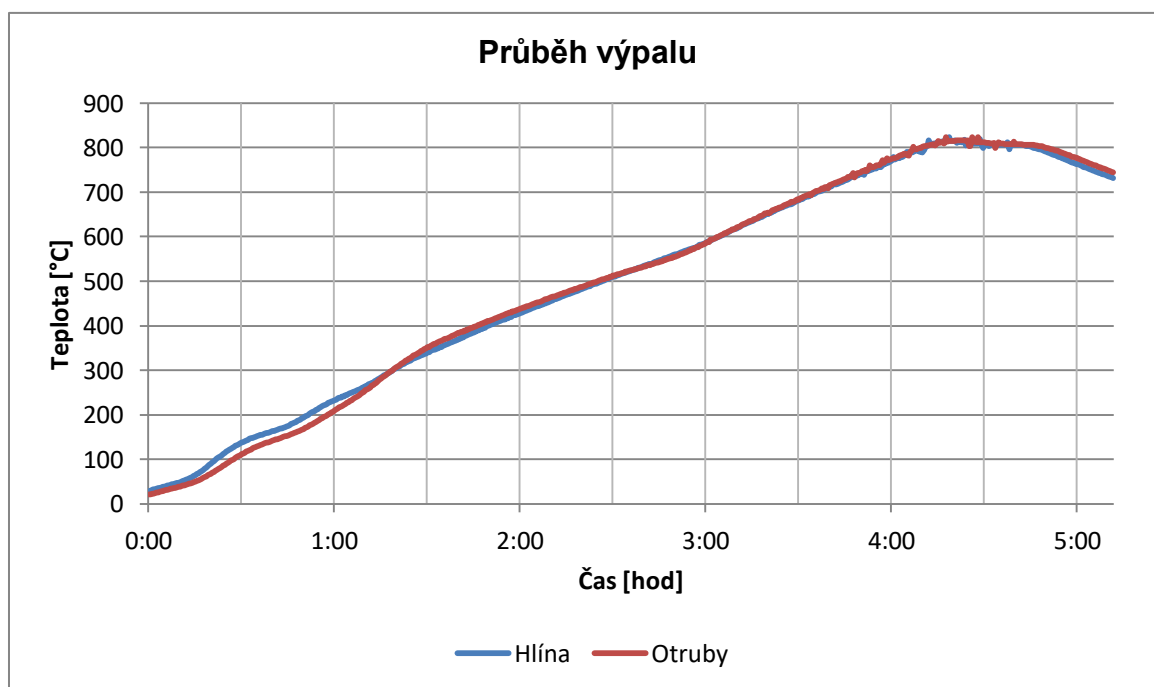
### 7.3.3. Otruby

Na tuto směs byly jako lehčivo použity otruby v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 16. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 12.

**Tabulka č. 16.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro otruby a nevápenatou zeminu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
33,0	0,50	-1,77	0,09	-1,68	6,30	40,20	2678
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
25,1	1629	1555	0,6852	0,5508	1,6		

**Graf č. 12.:** Průběh výpalu otrub a nevápenaté hlíny



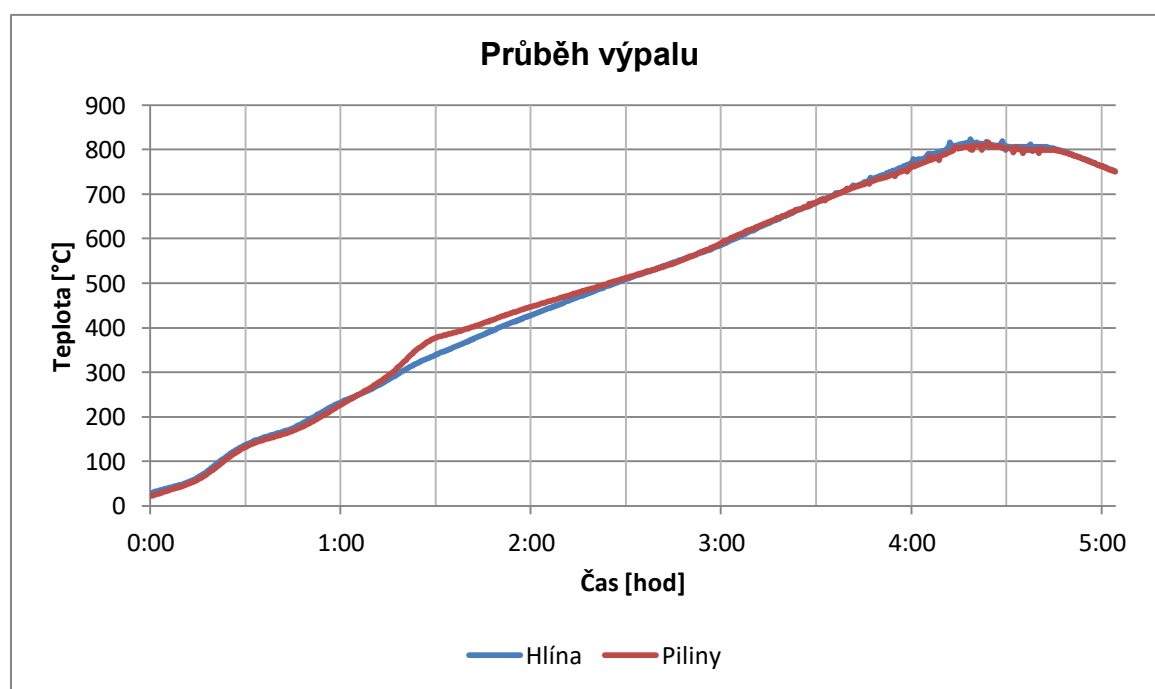
### 7.3.4. Piliny

Na tuto směs byly jako lehčivo použity piliny v dávkování 5 % hmotnostních. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 17. a průběh výpalu je zaznamenán v grafu č. 13.

**Tabulka č. 17.:** Vypočítané a naměřené hodnoty pro piliny a nevápenatou zeminu

w [%]	CSB [-]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	ZP [%]	PZ [%]	ZH [kg·m <sup>-3</sup> ]
27,4	0,69	-0,79	0,08	-0,71	6,68	38,81	2610
NV [%]	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]		λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		R <sub>t</sub> [MPa]		
-	výsušek	vypálený střep	výsušek	vypálený střep	-		
24,3	1725	1573	1,0839	0,8205	2,1		

**Graf č. 13.:** Průběh výpalu pilin a nevápenaté hlíny



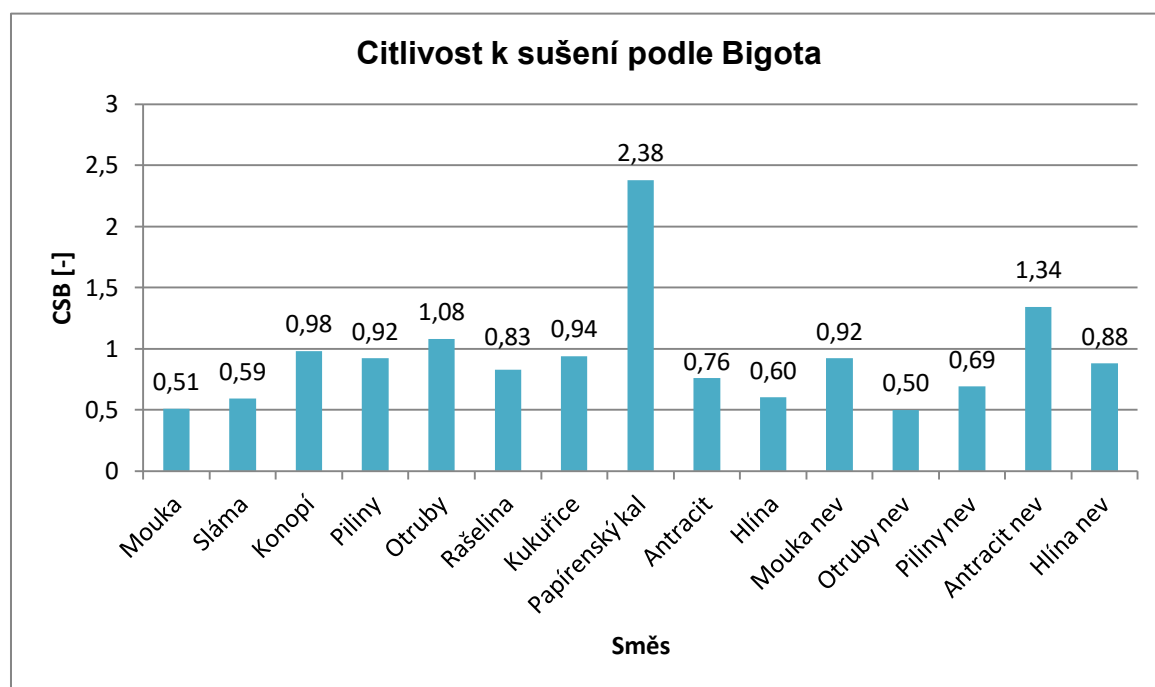
## 7.4. Porovnání výsledků

V této kapitole budou graficky porovnány předchozí výsledky s nárůstem teploty 3 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut.

**Tabulka č. 18.:** Porovnání citlivosti k sušení podle Bigota

	CSB
	[-]
Mouka	0,51
Sláma	0,59
Konopí	0,98
Piliny	0,92
Otruby	1,08
Rašelina	0,83
Kukuřice	0,94
Papírenský kal	2,38
Antracit	0,76
Hlína	0,60
Mouka – nev.	0,92
Otruby – nev.	0,50
Piliny – nev.	0,69
Antracit – nev.	1,34
Hlína – nev.	0,88

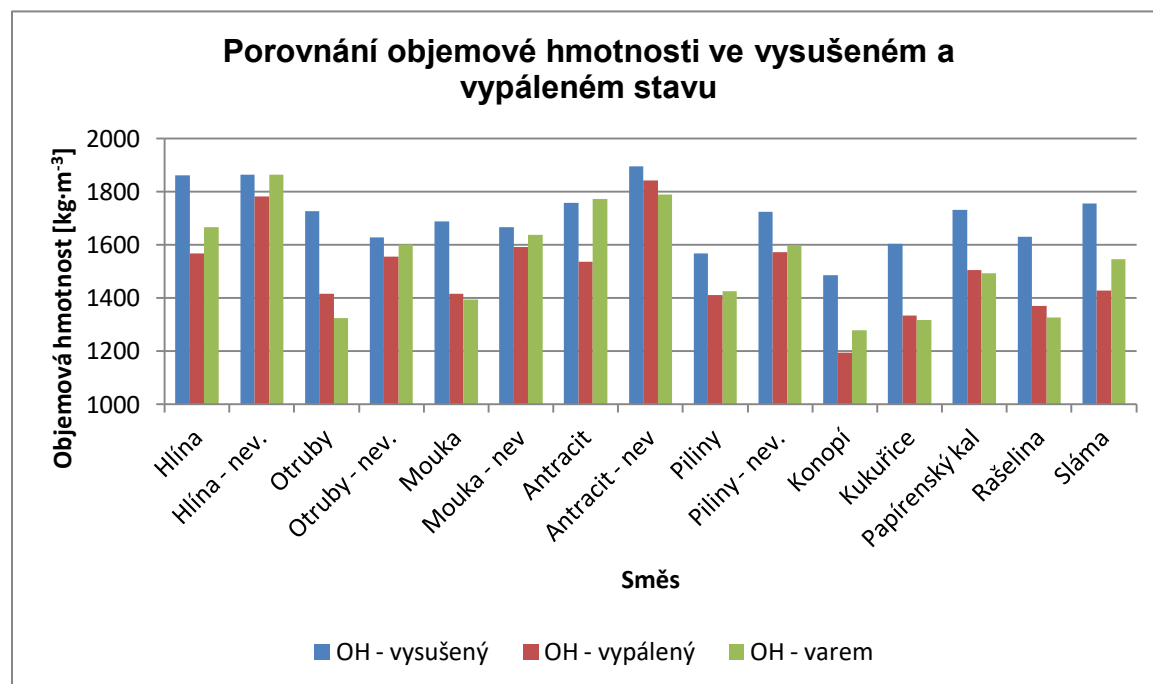
**Graf č. 14.:** Porovnání citlivosti k sušení podle Bigota



**Tabulka č. 19.: Porovnání objemové hmotnosti**

	Objemová hmotnost		
	Vysušený vzorek	Vypálený vzorek	OH stanovená varem
	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]
Hlína	1861	1569	1667
Hlína – nev.	1865	1782	1864
Otruby	1727	1417	1324
Otruby – nev.	1629	1555	1601
Mouka	1688	1417	1394
Mouka – nev.	1666	1592	1639
Antracit	1759	1537	1772
Antracit – nev.	1897	1843	1790
Piliny	1569	1412	1427
Piliny – nev.	1725	1573	1597
Konopí	1486	1194	1279
Kukuřice	1605	1334	1317
Papírenský kal	1732	1505	1493
Rašelina	1631	1371	1326
Sláma	1756	1428	1546

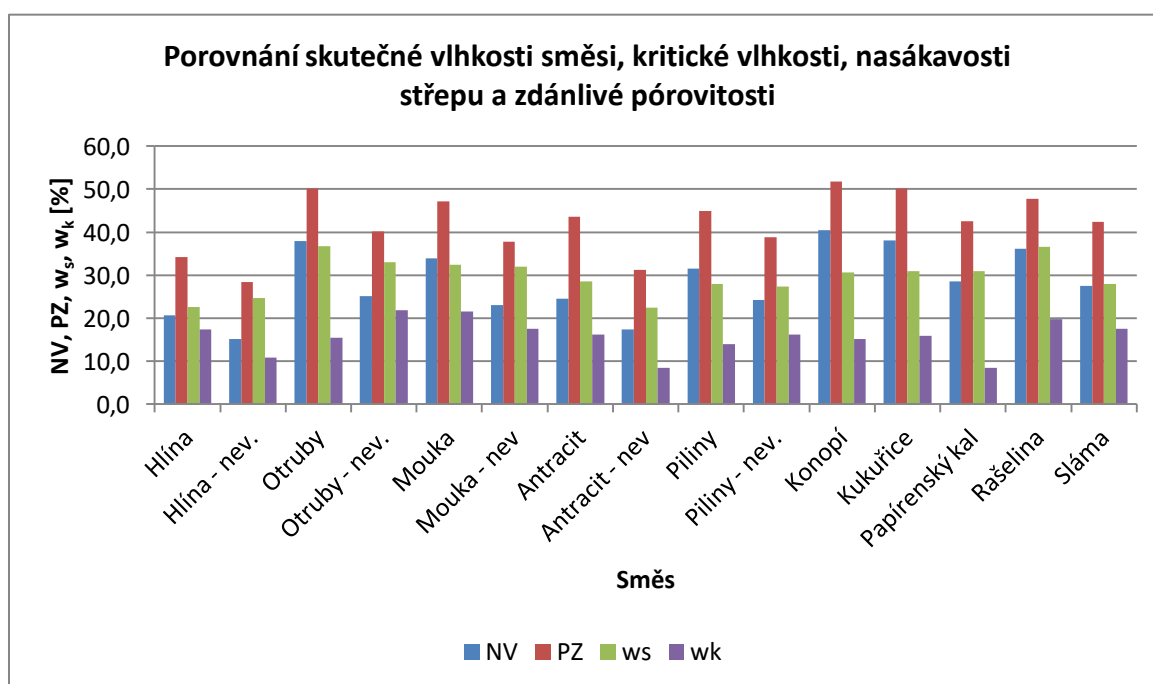
**Graf č. 15.: Porovnání objemové hmotnosti**



**Tabulka č. 20.:** Porovnání skutečné vlhkosti směsi, kritické vlhkosti, nasákavosti vypáleného střepe a zdánlivé pórovitosti

	NV	PZ	$w_s$	$w_k$
	[%]	[%]	[%]	[%]
Hlína	20,6	34,27	22,6	17,4
Hlína – nev.	15,2	28,41	24,7	10,9
Otruby	37,9	50,22	36,8	15,5
Otruby – nev.	25,1	40,20	33,0	21,9
Mouka	33,9	47,23	32,4	21,6
Mouka – nev.	23,1	37,79	32,0	17,5
Antracit	24,6	43,61	28,6	16,2
Antracit – nev.	17,4	31,23	22,4	8,4
Piliny	31,5	44,96	27,9	13,9
Piliny – nev.	24,3	38,81	27,4	16,2
Konopí	40,4	51,72	30,6	15,2
Kukuřice	38,1	50,19	31,0	15,9
Papírenský kal	28,5	42,52	31,0	8,5
Rašelina	36,1	47,81	36,6	19,7
Sláma	27,5	42,45	27,9	17,6

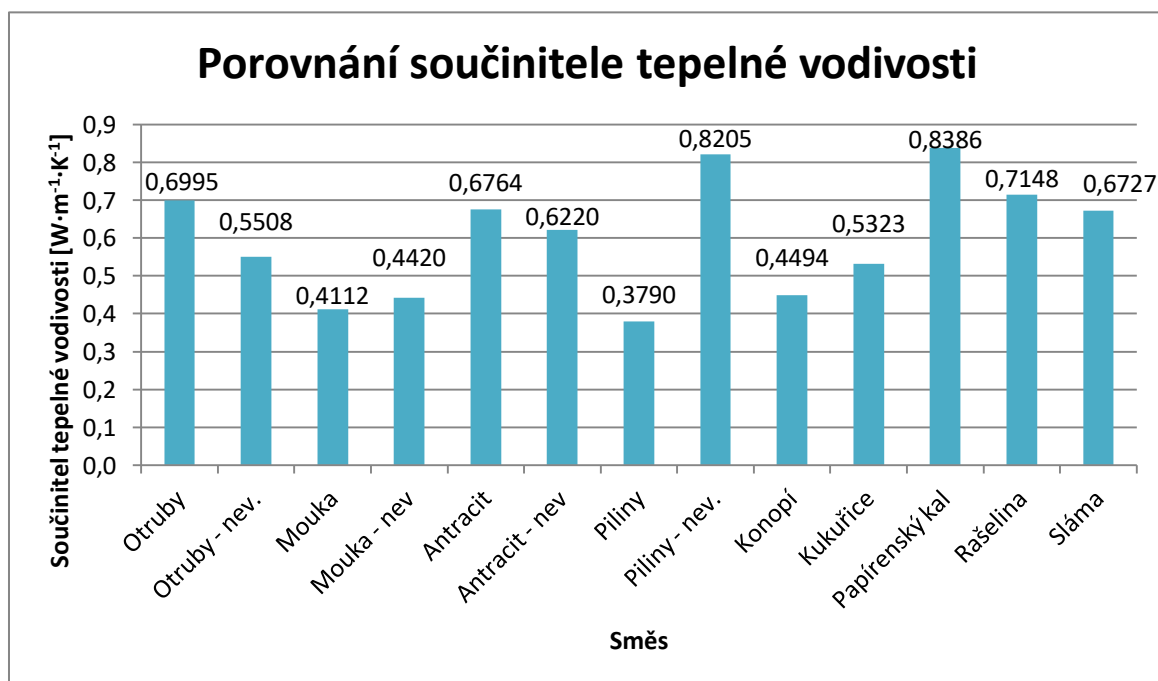
**Graf č. 16.:** Porovnání skutečné vlhkosti směsi, kritické vlhkosti, nasákavosti vypáleného střepe a zdánlivé pórovitosti



**Tabulka č. 21.:** Porovnání součinitele tepelné vodivosti po výpalu

	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Otruby	0,6995
Otruby – nev.	0,5508
Mouka	0,4112
Mouka – nev.	0,4420
Antracit	0,6764
Antracit – nev.	0,6220
Piliny	0,3790
Piliny – nev.	0,8205
Konopí	0,4494
Kukuřice	0,5323
Papírenský kal	0,8386
Rašelina	0,7148
Sláma	0,6727

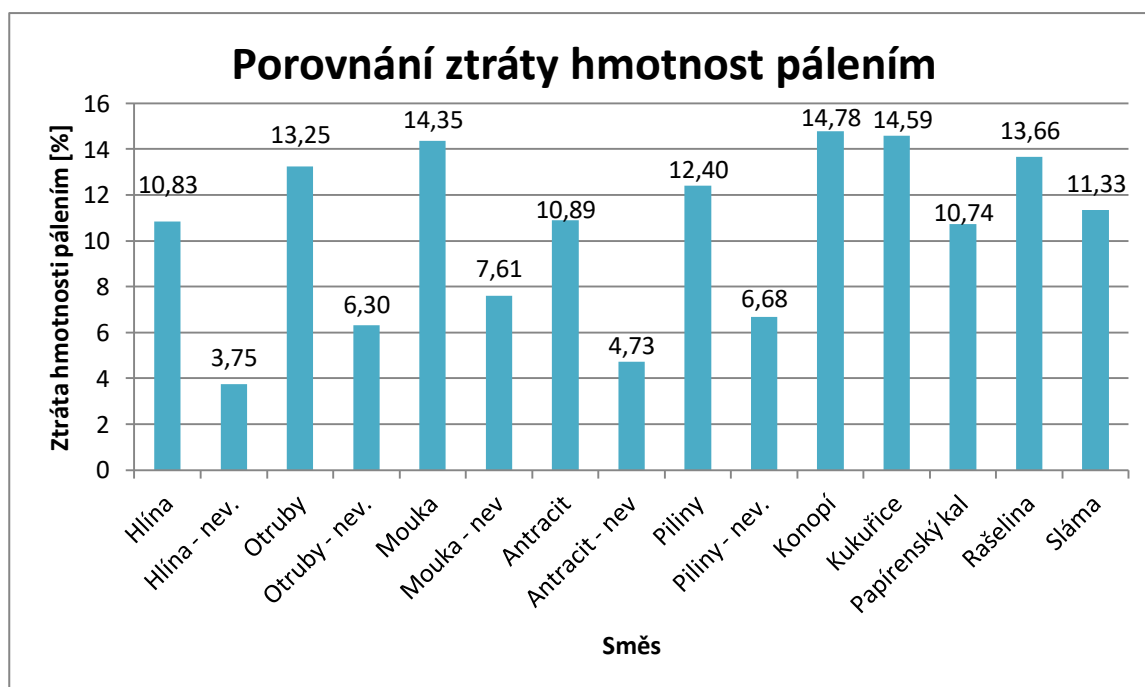
**Graf č. 17.:** Porovnání součinitele tepelné vodivosti po výpalu



**Tabulka č. 22.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením**

	ZP
	[%]
Hlína	10,83
Hlína – nev.	3,75
Otruby	13,25
Otruby – nev.	6,30
Mouka	14,35
Mouka – nev.	7,61
Antracit	10,89
Antracit – nev.	4,73
Piliny	12,40
Piliny – nev.	6,68
Konopí	14,78
Kukuřice	14,59
Papírenský kal	10,74
Rašelina	13,66
Sláma	11,33

**Graf č. 18.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením**

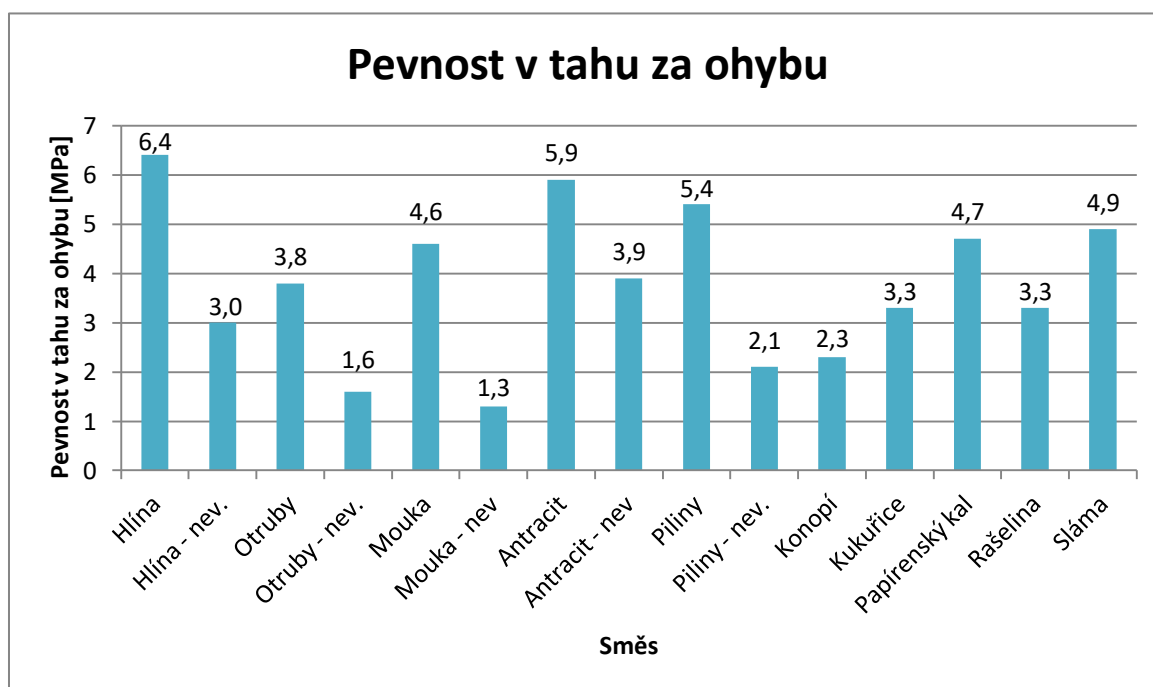




**Tabulka č. 23.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu**

	$R_t$ [MPa]
Hlína	6,4
Hlína – nev.	3,0
Otruby	3,8
Otruby – nev.	1,6
Mouka	4,6
Mouka – nev.	1,3
Antracit	5,9
Antracit – nev.	3,9
Piliny	5,4
Piliny – nev.	2,1
Konopí	2,3
Kukuřice	3,3
Papírenský kal	4,7
Rašelina	3,3
Sláma	4,9

**Graf č. 19.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu**

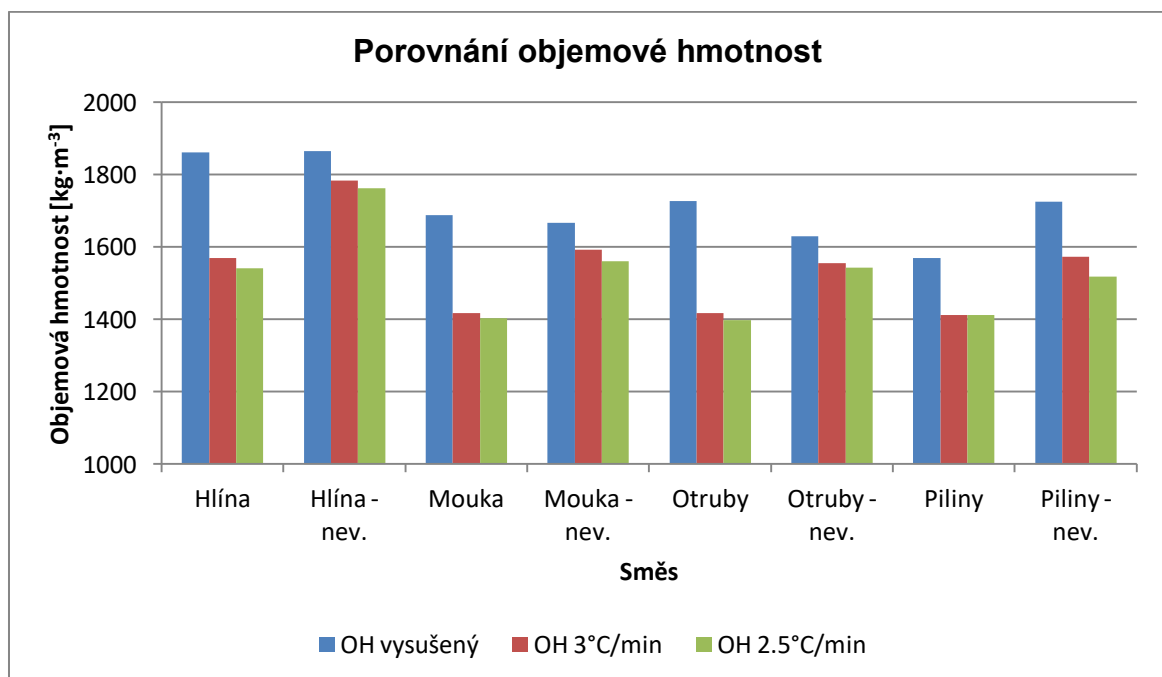


Zde jsou porovnány jak výsledky s nárůstem teploty 3 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut, tak výsledky ze druhé etapy s nárůstem teploty 2,5 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 45 minut na vybraných směsích, jak s použitím vápenaté zeminy z Novosedel, tak z nevápenaté zeminy z Týna nad Vltavou. Porovnávají jsou směsi za použití lehčiva z pilin, mouky a otrub.

**Tabulka č. 24.:** Porovnání objemové hmotnosti vysušených vzorků a vzorků vypálených s nárůstem teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min

	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		
	Vysušený vzorek	3 °C/min	2,5 °C/min
Hlína	1861	1569	1540
Hlína - nev.	1865	1782	1762
Mouka	1688	1417	1402
Mouka - nev.	1666	1592	1561
Otruby	1727	1417	1398
Otruby - nev.	1629	1555	1542
Piliny	1569	1412	1411
Piliny - nev.	1725	1573	1518

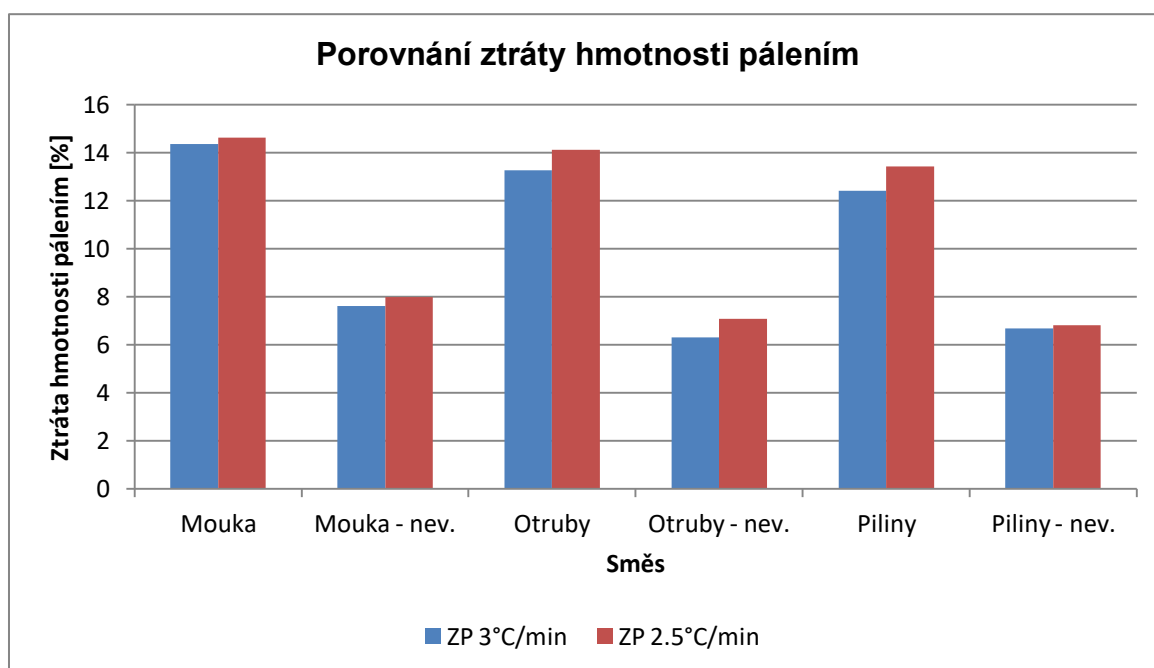
**Graf č. 20.:** Porovnání objemové hmotnosti vysušených vzorků a vzorků vypálených s nárůstem teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min



**Tabulka č. 25.:** Porovnání ztráty hmotnosti pálením při nárůstu teploty výpalu 3 °C/min a 2,5 °C/min

	Ztráta hmotnosti pálením [%]	
	3 °C/min	2,5 °C/min
Mouka	14,35	14,62
Mouka – nev.	7,61	7,97
Otruby	13,25	14,11
Otruby – nev.	6,30	7,07
Piliny	12,40	13,43
Piliny – nev.	6,68	6,81

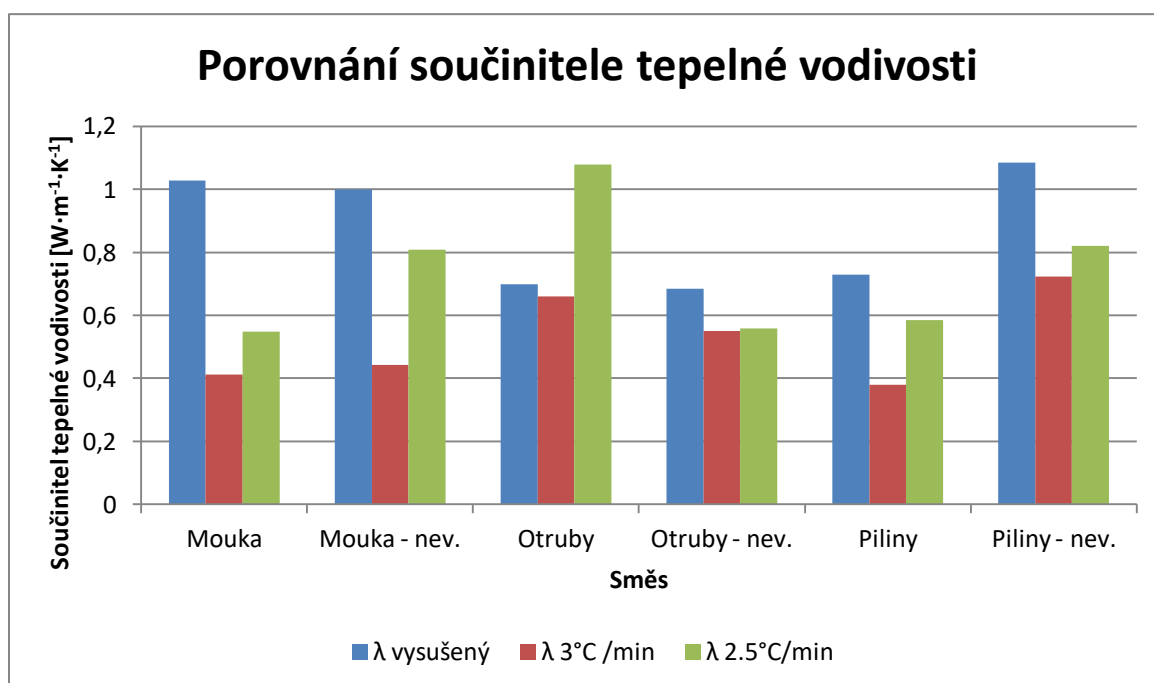
**Graf č. 21.:** Porovnání ztráty hmotnosti pálením při nárůstu teploty výpalu 3 °C/min a 2,5 °C/min



**Tabulka č. 26.:** Porovnání součinitele tepelné vodivosti na vysušeném vzorku a poté na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min

	Součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]		
	Vysušený	3 °C/min	2,5 °C/min
Mouka	1,0284	0,4112	0,5482
Mouka - nev.	0,9985	0,4420	0,8094
Otruby	0,6995	0,6592	1,0790
Otruby - nev.	0,6852	0,5508	0,5589
Piliny	0,7299	0,3790	0,5842
Piliny - nev.	1,0839	0,7221	0,8205

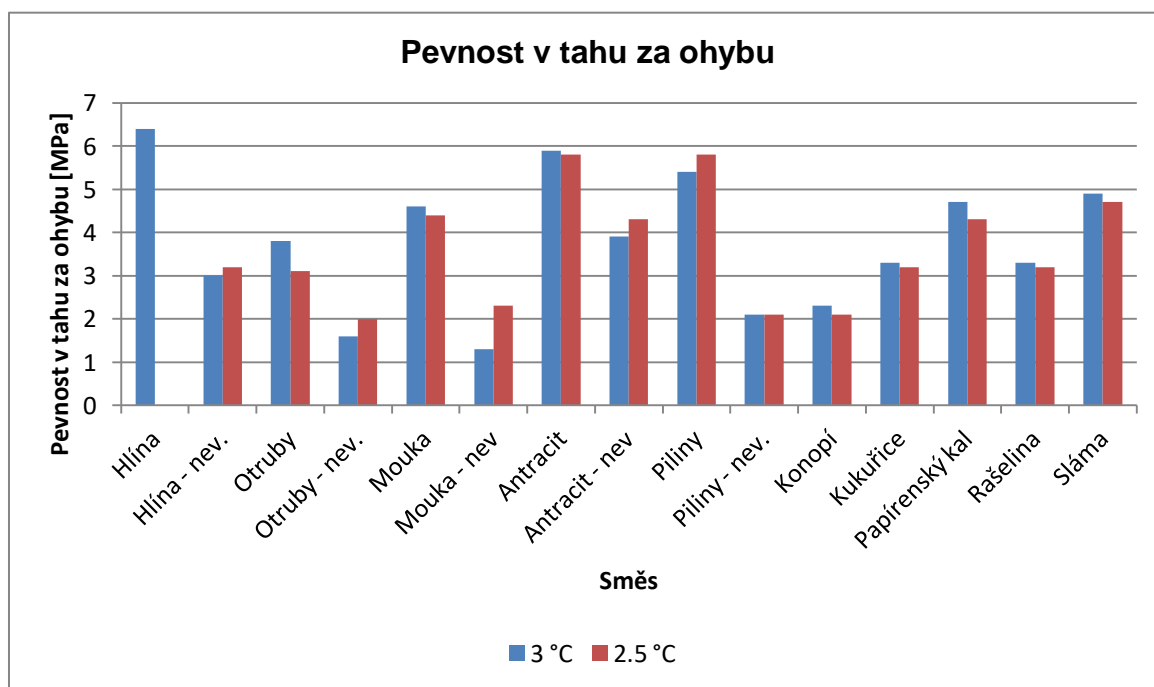
**Graf č. 22.:** Porovnání součinitele tepelné vodivosti na vysušeném vzorku a poté na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min



**Tabulka č. 27.:** Porovnání pevnosti v tahu za ohybu na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min

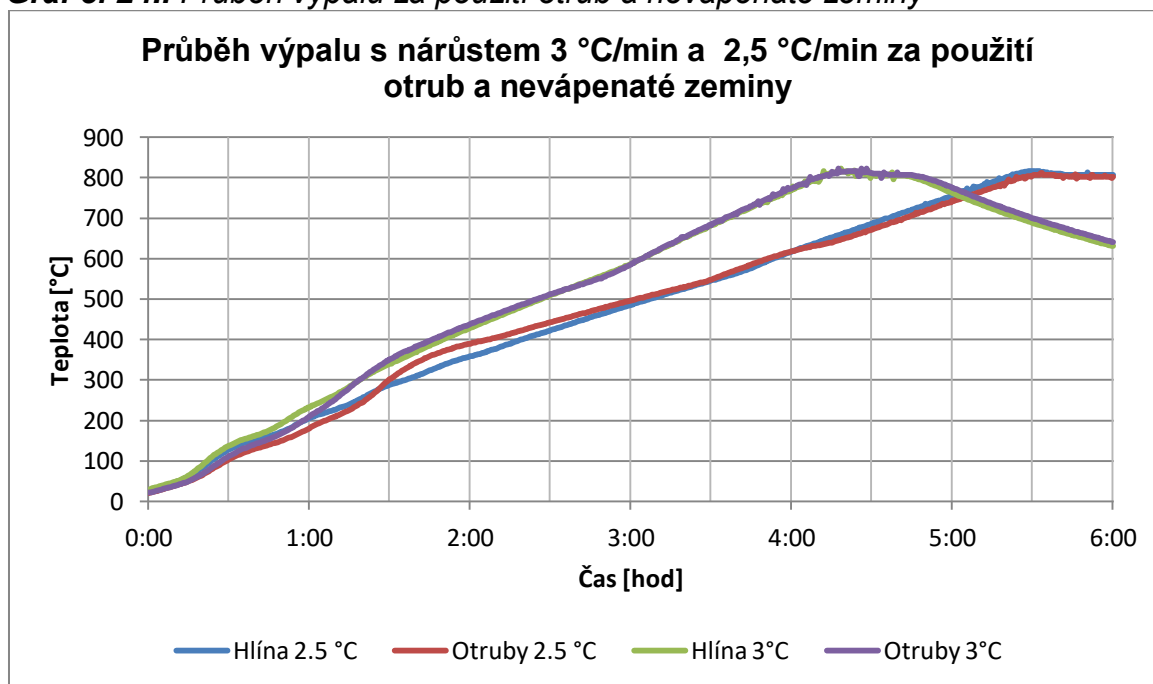
	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	
	3 °C/min	2.5 °C/min
Hlína	6,4	-
Hlína – nev.	3,0	3,2
Otruby	3,8	3,1
Otruby – nev.	1,6	2,0
Mouka	4,6	4,4
Mouka – nev.	1,3	2,3
Antracit	5,9	5,8
Antracit – nev.	3,9	4,3
Piliny	5,4	5,8
Piliny – nev.	2,1	2,1
Konopí	2,3	2,1
Kukuřice	3,3	3,2
Papírenský kal	4,7	4,3
Rašelina	3,3	3,2
Sláma	4,9	4,7

**Graf č. 23.:** Porovnání pevnosti v tahu za ohybu na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min

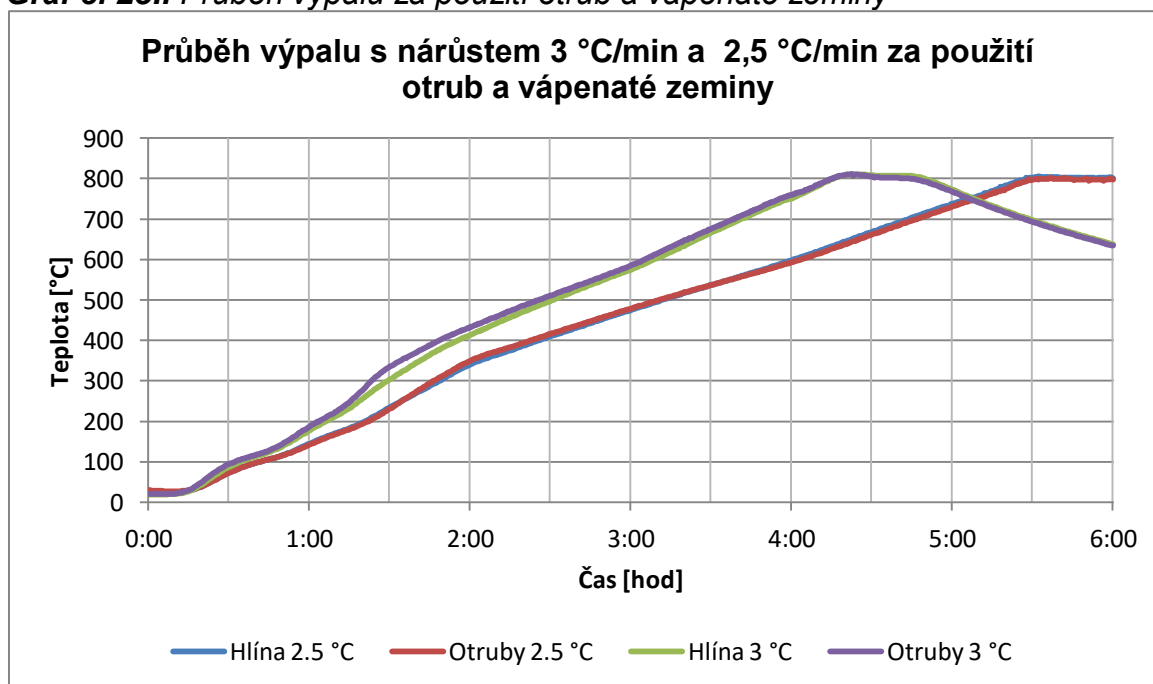


Na tomto místě jsou porovnány jak výsledky s nárůstem teploty 2,5 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 45 minut, tak s nárůstem 3 °C/min na maximální teplotu 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut za použití jak vápenaté, tak nevápenaté zeminy. Na každém grafu lze vidět, že cihelný stěp s lehčivem má při stejném průběhu výpalu vyšší teplotu uvnitř stěpu, což je způsobeno obsahem lehčiva, které pak začíná vyhořívat.

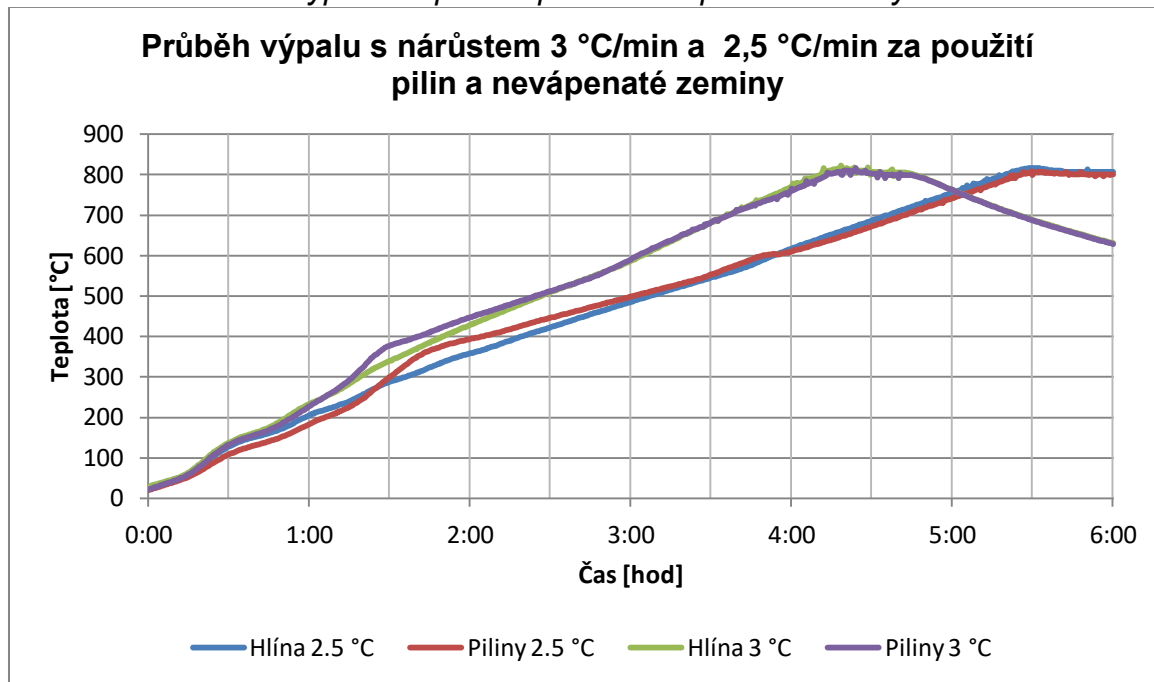
**Graf č. 24.:** Průběh výpalu za použití otrub a nevápenaté zeminy



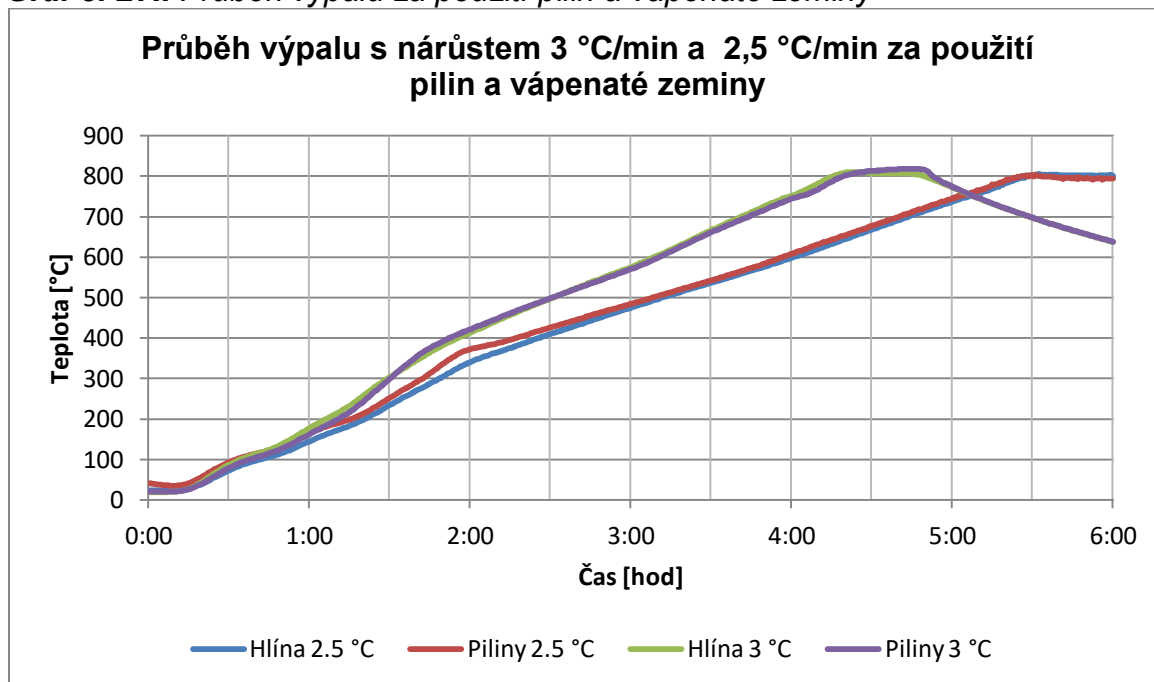
**Graf č. 25.:** Průběh výpalu za použití otrub a vápenaté zeminy



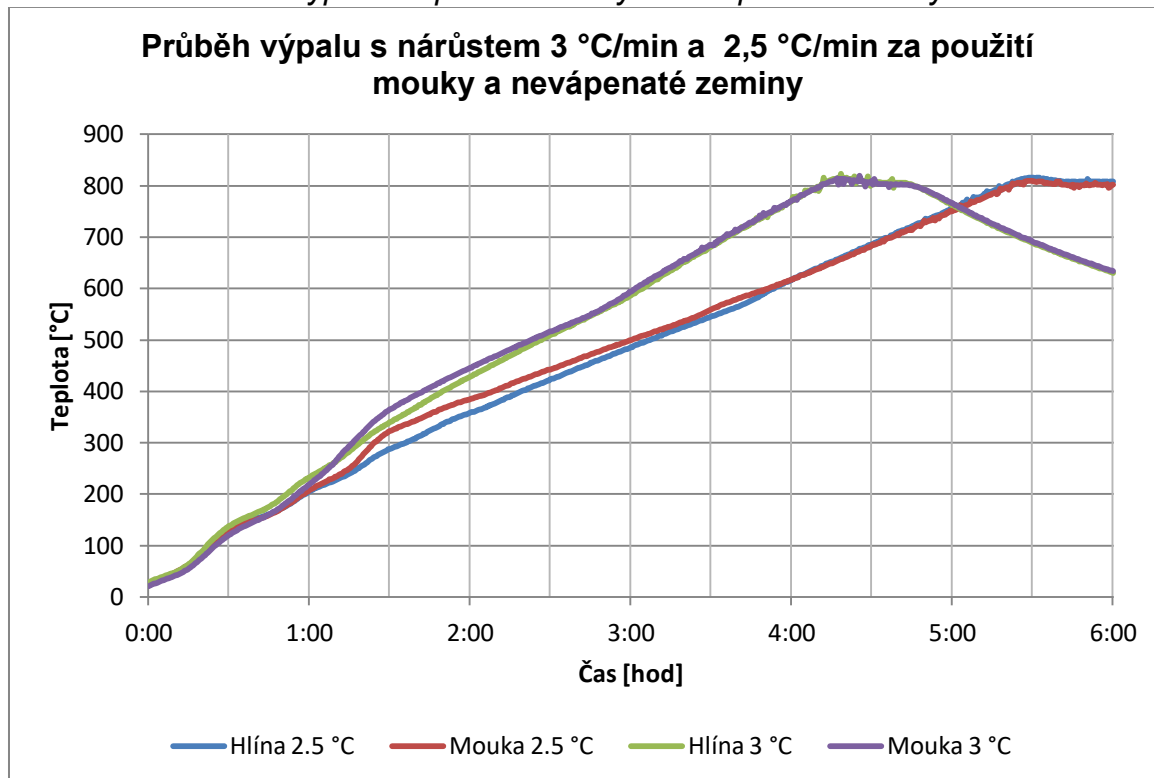
**Graf č. 26.:** Průběh výpalu za použití pilin a nevápenaté zeminy



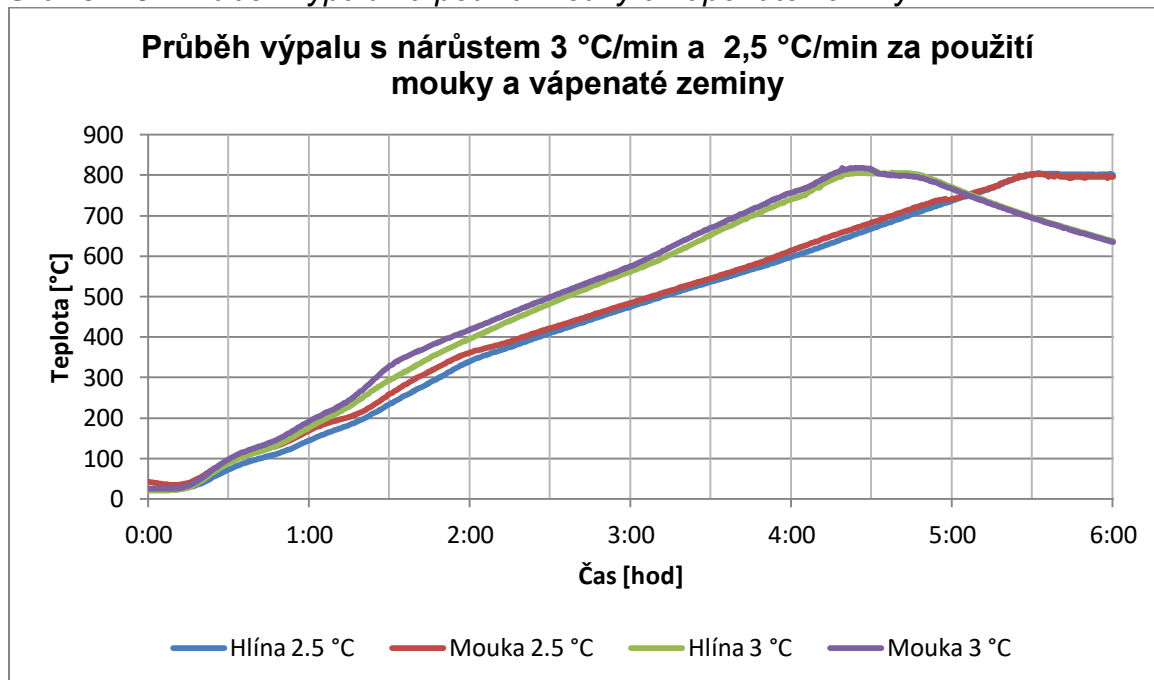
**Graf č. 27.:** Průběh výpalu za použití pilin a vápenaté zeminy



**Graf č. 28.:** Průběh výpalu za použití mouky a nevápenaté zeminy



**Graf č. 29.:** Průběh výpalu za použití mouky a vápenaté zeminy





Zde jsou vyobrazeny jednotlivé cihlářské střepey s různým typem lehčiva po jejich výpalu s růstem teploty 3°C/min na 800 °C s izotermickou výdrží 30 minut a po následném rozlomení při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.



**Obr. č. 32.:** Rašelina (vlevo), kukuřice (vpravo) – oboje vápenatá hlína



**Obr. č. 33.:** Konopí (vlevo), sláma (vpravo) – oboje vápenatá hlína



**Obr. č. 34.:** Piliny s nevápenatou hlínou (vlevo), piliny s vápenatou hlínou (vpravo)



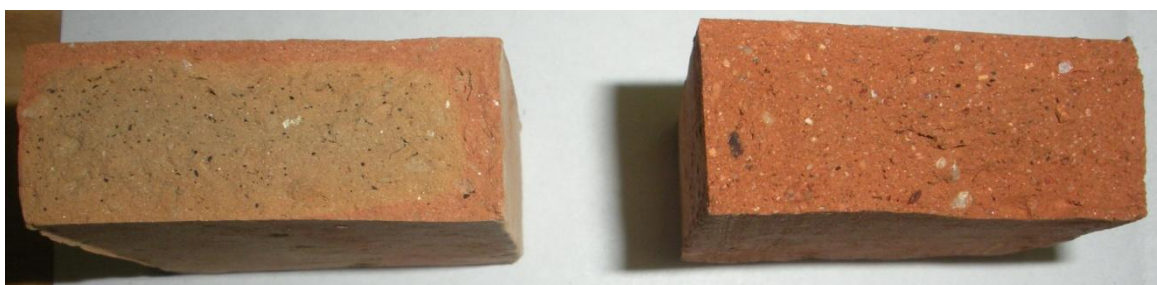
**Obr. č. 35.:** Papírenský kal



**Obr. č. 36.:** Otruby s nevápenatou hlinou (vlevo), otruby s vápenatou hlinou (vpravo)



**Obr. č. 37.:** Mouka s nevápenatou hlinou (vlevo), mouka s vápenatou hlinou (vpravo)



**Obr. č. 38.:** Antracit s vápenatou hlinou (vlevo), antracit s nevápenatou hlinou (vpravo)

## 7.5. Diskuze výsledků

Na zemině z lokality Novosedly a z Týna nad Vltavou byly zkoušeny různé druhy organických lehčiv. Na vápenaté zemině z Novosedel byla zkoušena různá lehčiva, konkrétně piliny, sláma, papírenský kal, antracit, konopné pazdeří, kukuřičná podestýlka, mouka a otruby. Na nevápenaté zemině z Týna nad Vltavou byly zkoušeny piliny, antracit, mouka a otruby. V první etapě byly zkoušeny vzorky s nárůstem teploty  $3\text{ °C/min}$  na maximální teplotu  $800\text{ °C}$  s izotermickou výdrží 30 minut. Ve druhé etapě byly zkoušeny vzorky, které v první etapě dopadly nejlíp, s nárůstem teploty  $2,5\text{ °C/min}$  na maximální teplotu  $800\text{ °C}$  s izotermickou výdrží 45 minut.

Při použití vápenaté hlíny a kukuřičné podestýlky byla tato směs označena jako málo citlivá k sušení podle Bigota. Při přidání vody a dodržení deformačního poměru 0,6 byla zjištěna vlhkost 31,0 %. Objemová hmotnost cihlářského střepu po výpalu byla  $1334\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti dosahoval hodnot  $0,5323\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  u vypáleného střepu. Pevnost v tahu za ohybu dosáhla hodnoty 3,3 MPa. K vyhoření kukuřičné podestýlky začalo docházet při cca  $220\text{ °C}$  a až do dosažení maximální teploty výpalu byla teplota střepu vyšší, než u vzorku pouze z vápenaté hlíny. Celková ztráta hmotnosti pálením byla 14,59 %.

Při použití slámy jako organického lehčiva byla i tato směs málo citlivá k sušení. Při přidavku vody bylo dosaženo vlhkosti směsi 27,9 %. Objemová hmotnost vypáleného střepu byla  $1428\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti byl větší než u vzorku za použití slámy a to konkrétně  $0,6727\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  u vypáleného střepu, zatímco pevnost v tahu za ohybu byla vyšší – 4,9 MPa. K vyhoření slámy ve vzorku docházelo pomalu a postupně, podle grafu nelze přesně určit teplotu vyhoření, neboť linie vzorku s lehčivem a linie vzorku bez lehčiva je téměř totožná. Ztráta hmotnosti pálením byla 11,33 %.

Za použití konopného pazdeří byla vlhkost směsi 30,6 %. Tato směs byla také málo citlivá k sušení, hodnota CSB byla 0,98. Při použití tohoto lehčiva bylo dosaženo nejnižší objemové hmotnosti vypáleného střepu –  $1194\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti patřil také k nejmenším  $0,4494\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  u vypáleného střepu. Také hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla nejmenší, a to pouhé 2,3 MPa. K vyhořívání konopného pazdeří začalo docházet po překročení cca

200 °C a až při teplotě 670 °C se začala vyrovnávat teplota uvnitř střepeu s teplotou uvnitř vzorku složeného pouze z hlíny. Ztráta hmotnosti pálením byla nejvyšší, dosahovala hodnoty 14,78 %.

Při použití rašeliny jako vyhořívajícího lehčiva ve směsi s vápenatou hlínou byla vysoká vlhkost směsi – 36,6 %. Stejně jako předešlé směsi i tato měla nízkou citlivost k sušení podle Bigota. Objemová hmotnost vypáleného střepeu dosahovala hodnot 1371 kg·m<sup>-3</sup>. Součinitel tepelné vodivosti byl vysoký, a to jak u vysušeného, tak vypáleného střepeu. U vypáleného střepeu dosahoval hodnoty 0,7148 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Pevnost v tahu za ohybu byla stejná jako při použití kukuřičné podestýlky – 3,3 MPa. Podle grafu lze vyčíst, že k vyhořívání začalo docházet při zhruba 250 °C a skončilo při 500 °C, poté byly linie obou vzorku skoro totožné. Ztráta hmotnosti pálením byla 13,66 %.

Jako další lehčivo byl použit papírenský kal. Díky vlhkosti papírenského kalu byla směs velmi citlivá k sušení, dosahovala hodnoty CSB až 2,38. Vlhkost pracovní směsi byla 31,0 %. Objemová hmotnost vypáleného střepeu dosáhla hodnoty 1505 kg·m<sup>-3</sup>. Součinitel tepelné vodivosti byl podobný jak u vysušeného střepeu, tak u vypáleného, přesahoval hodnotu 0,8386 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Pevnost v tahu za ohybu byla vyšší vzhledem k ostatním lehčivům, dosahovala hodnoty – 4,7 MPa. K vyhořívání papírenského kalu dochází do teploty 400 °C. Jeho ztráta hmotnosti pálením byla 10,74 %.

Při použití antracitu a vápenaté hlíny bylo dosaženo vlhkosti směsi 28,6 %. Tato směs, stejně jako většina ostatních byla málo citlivá k sušení. Objemová hmotnosti tohoto střepeu byla jedna z nejvyšších – 1537 kg·m<sup>-3</sup>. Součinitel tepelné vodivosti se po výpalu změnil zhruba o polovinu na hodnotu 0,6764 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Díky své vyšší objemové hmotnosti měl i nejvyšší pevnost v tahu za ohybu, a to konkrétně 5,9 MPa. Už od začátku procesu výpalu tohoto střepeu byla uvnitř teplota vyšší než u referenčního vzorku z hlíny, proto nelze jednoznačně určit, kdy přesně došlo k vyhořívání této látky. Ztráta hmotnosti pálením byla necelých 11,0 %.

Jako další lehčivo byla použita hladká mouka, směs s tímto lehčivem dosahovala vlhkosti 32,4 % a byla málo citlivá k sušení. Objemová hmotnost tohoto střepeu po výpalu byla 1417 kg·m<sup>-3</sup>. Součinitel tepelné vodivosti po výpalu byl jeden z nej-

nižších, dosahoval hodnoty  $0,4112 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pevnost v tahu za ohybu byla oproti jiným lehčivům celkem vysoká – 4,6 MPa. K vyhořívání začalo docházet nad teplotu  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , a stejně jako u kukuřičné podestýlky byla poté teplota ve střepu o pár stupňů vyšší než u vzorku pouze z hlíny. Ztráta hmotnosti pálením byla 14,35 %.

V dalším experimentu byly jako lehčivo použity otruby. Tato směs byla málo citlivá k sušení a dosahovala vlhkosti 36,8 %. Objemová hmotnost vypáleného střepu byla stejná jako za použití hladké mouky –  $1417 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti byl ale o něco vyšší –  $0,6995 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pevnost v tahu za ohybu byla nižší – 3,8 MPa. Oproti směsi za použití mouky byla ztráta hmotnosti pálením také nižší, a to 13,25 %. Podle grafu začalo docházet k vyhořívání při překročení  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  a zhruba při  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  bylo vyhořívání dokončeno a linie referenčního vzorku a vzorku s otrubami byla totožná až do dosažení maximální hodnoty výpalu.

Jako poslední lehčivo byly použity piliny ze smrkového dřeva. Stejně jako většina předchozích směsí, i tato byla málo citlivá k sušení podle Bigota. Při přidavku vody bylo dosaženo vlhkosti směsi 27,9 %. Objemová hmotnost vypáleného vzorku byla o něco nižší než za použití mouky a otrub –  $1412 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti byl nejnižší –  $0,3790 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pevnost v tahu za ohybu byla jedna z nejvyšších – 5,4 MPa. Piliny začínají vyhořívat při  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  a jejich konec nastává při  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Poté byla teplotní linie u obou vzorků totožná. Ztráta hmotnosti pálením byla 12,40 %.

V další části byla nahrazena vápenatá zemina zeminou nevápenatou z Týna nad Vltavou. Jako první lehčivo byl použit antracit. Tato směs byla málo citlivá k sušení a vlhkost pracovní směsi dosahovala hodnot 22,4 %. Za použití nevápenaté hlíny byla vysoká objemová hmotnost i u vypáleného vzorku –  $1843 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti byl podobný jako při použití antracitu a vápenaté hlíny. Při výpalu skoro po celou dobu byla teplota uvnitř střepu s lehčivem nižší než ve vzorku pouze z nevápenaté hlíny. Pevnost v tahu za ohybu a ztráta hmotnosti pálením byla nižší než za použití vápenaté hlíny.

Při použití nevápenaté hlíny a hladké mouky jako lehčiva byla vlhkost pracovní směsi 32,0 %. I tato směs byla málo citlivá k sušení podle Bigota. Stejně jako

v předešlém případě, i tento vzorek po výpalu vykazoval vysokou objemovou hmotnost –  $1762 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti i v tomto případě byl podobný jako za použití vápenaté hlíny, ovšem pevnost v tahu za ohybu byla velice nízká, dosahovala pouhých 1,3 MPa. Ztráta hmotnosti pálením vzhledem k vysoké objemové hmotnosti byla nízká – 3,75 %. V tomto případě začalo vyhořívání při překročení  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  a bylo ukončeno do  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Jako další lehčivo do nevápenaté hlíny byly použity otruby. Tato směs byla též málo citlivá k sušení a vlhkost pracovní směs byla 33,0 %. Objemová hmotnost byla o něco nižší než v předchozích případech, ale ve srovnání s vápenatou zemínou byla pořád vysoká –  $1555 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Součinitel tepelné vodivosti byl v tomto případě nižší  $0,5508 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pevnost v tahu za ohybu byla podobně nízká jako za použití mouky – 1,6 MPa. Ztráta hmotnosti pálením byla o něco vyšší než v předchozích případech, dosahovala hodnoty 6,30 %. K vyhořívání začalo docházet při  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  a při  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  se začala linie vzorku s lehčivem srovnávat s linií vzorku referenčního.

Jako poslední lehčivo do nevápenaté zeminy byly použity smrkové piliny. Tato směs, stejně jako předchozí byla málo citlivá k sušení a vlhkost pracovní směsi byla 27,4 %. Díky ztrátě hmotnosti pálením 6,68 % byla objemová hmotnost vypáleného vzorku  $1573 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pevnost v tahu za ohybu je stejně jako v předešlých případech za použití nevápenaté hlíny nízká – 2,1 MPa. Tento vzorek vykazoval hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $0,8205 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což je jeden z nejvyšších. K vyhořívání pilin v tomto vzorku začíná docházet při překročení  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  a je ukončeno max. v teplotě  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ve druhé etapě při růstu teploty  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  na maximální teplotu  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  s izotermickou výdrží 45 minut dochází k jistým změnám na vypálených vzorcích. Tento interval byl zkoumán jak na vzorcích za použití vápenaté zeminy, tak zeminy nevápenaté. Použita byla lehčiva, která v předešlé etapě dopadla nejlíp, jedná se o mouku, otruby a piliny. Objemová hmotnost při delším výpalu ještě nepatrně klesla, průměrně o  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Se snížením objemové hmotnosti dochází ke zvýšení ztráty hmotnosti pálením. Tento zvolený interval měl negativní vliv na součinitel tepelné vodivosti, který se oproti intervalu  $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  zvýšil u všech měřených vzorků. Rozdíl ve vlastnostech při tomto intervalu byl nejvíce patrný na pevnosti v tahu za ohybu. Na vzorcích za použití vápenaté

zeminy z lokality Novosedly došlo k mírnému poklesu pevnosti v tahu za ohybu u všech vzorků, kromě vzorku za použití pilin, kde došlo k mírnému zvýšení. Naopak u vzorků za použití nevápenaté zeminy z Týna nad Vltavou došlo ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu.

Tento zvolený interval růstu teploty není vhodný z důvodu negativních dopadů na výsledné vlastnosti vypáleného střeptu, jako je zvýšení součinitele tepelné vodivosti a pokles pevnosti v tahu za ohybu. Mnohem lépe se jeví použití intervalu s růstem teploty 3 °C/min, který byl použit v první etapě.

Pro přesnější zjištění intervalu vyhořívání organických látek by bylo nutné udělat diferenční termickou analýzu (DTA), která by zobrazila přesný průběh vyhoření daných lehčiv a lehčiv v dané zemině. Na výsledném grafu by šly zjistit exotermní reakce probíhající ve vzorku.

## Závěr

Z hlediska objemové hmotnosti lze konstatovat, že vzorky za použití nevápenaté zeminy měli větší objemovou hmotnost (i o více než  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) při stejném dávkování vyhořívající organické látky než při použití vápenaté zeminy. Rovněž i z hlediska pevnosti v tahu za ohybu, která je o polovinu nižší, lze vyvodit, že nevápenatá zemina není pro výrobu tvarovek typu THERM vhodná. Za jednu z výhod těchto výrobků lze považovat jejich nízkou nasákavost oproti výrobkům za použití vápenaté zeminy z Novosedel.

Nejnižší objemové hmotnosti (pod  $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) bylo dosaženo za použití kono-pného pazdeří, rašeliny a kukuřičné podestýlky. Jejich pevnosti nebyly sice vysoké, ale po úpravě lehčiva na menší velikost (pod 1 mm), by se tato vlastnost dala zvýšit.

Nejlépe dopadly vzorky za použití otrub, hladké mouky a smrkových pilin. Objemová hmotnost těchto tří vzorků byla v rozmezí hodnot  $1410 - 1420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Oproti pilinám způsobí mouka a otruby větší ztrátu hmotnosti pálením, otruby téměř o 1 %, mouka téměř o 2 %. Z hlediska součinitele tepelné vodivosti se nejbližší k hodnotě za použití pilin ( $0,3790 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) blíží výrobky za použití mouky –  $0,4112 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Vzorky za použití hladké mouky se svoji pevností v tahu za ohybu – 4,6 MPa také nejbližší blíží k pevnosti v tahu za ohybu při použití pilin – 5,4 MPa.

Mouka i otruby mají zhruba stejnou křivku při výpalu, která se výrazně neliší od křivky výpalu za použití pilin. Z tohoto poznatku lze konstatovat, že vyhořívání uvnitř střepu by mohlo být dost podobné. K vyhořívání těchto látek začíná docházet při teplotě nad  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  a konec u pilin nastává při  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , u mouky a otrub je tento konec určen kolem  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , což znamená, že mouka i otruby vyhořívají o něco déle.

K přesnějšímu definování intervalu vyhořívání látek by bylo vhodné provést diferenční termickou analýzu (DTA), která by zobrazila přesný průběh vyhoření dané látky a její hmotnostní úbytek.

Vzhledem k těmto skutečnostem lze říci, že mouka by mohla být vhodnou náhradou pilin, kterých díky více možnostem využití (lisované brikety, pelety, výroba desek, aj.) bývá nedostatek, zatímco mouka se hodí pouze v potravinářství.



## Seznam použité literatury

- [1] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/cihlarske-zeminy.pdf>
- [2] PYTLÍK, P., SOKOLÁŘ, R.: *Stavební keramika, technologie, vlastnosti a využití*. CERM, s.r.o., Brno, 2002, 285 s. ISBM: 80-7204-234-3.
- [3] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/cihlarske-hliny.pdf>
- [4] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/charakteristika-cihlarskeho-strepu.pdf>
- [5] PYTLÍK, P. *Cihlářství*. 1. vyd. Brno: CERM, 1995. 264 s. ISBN 80-214-0612-7.
- [6] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/historie-cihlarske-vyroby.pdf>
- [7] *KERAMIKA* [online]. 2016 [cit. 07. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/keramika.html>
- [8] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/suseni.pdf>
- [9] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/deje-pri-vypalu.pdf>
- [10] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/chladici-pasmo.pdf>
- [11] SOKOLÁŘ R. *Keramika – Modul BJ04 M01*. Brno: VUT FAST, 2006. 176 s.
- [12] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/napsali/lehceny-strep.pdf>
- [13] *Wienerberger* [online]. 2016 [cit. 9. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://wienerberger.cz/fakta/cihla-a-jej%C3%AD-historie>
- [14] Peterka, M.: Diplomová práce – Další možnosti lehčení cihlářského střepu za použití odpadních látek, Brno 2003

- [15] CSCM [online]. 2016 [cit. 7. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.cscm.cz/lexikon/kap1.pdf>
- [16] SOKOLÁŘ, R., Možnosti využití vybraných odpadních látek při tvorbě keramického střepu. Habilitační práce. VUT Brno, Brno, 2008
- [17] *World Energy Council (2007). "Survey of Energy Resources 2007" (pdf). Retrieved 2016-13-10.*
- [18] Ducman, V. a kol.: Sawdust and paper-making sludge as pore-forming agents for light-weight clay bricks., *Ind. Ceramics* 21, 2001, č. 2, s. 81 - 86
- [19] TZB-INFO [online]. 2016 [cit. 16. 10. 2016]. Dostupné z WWW:  
<http://www.tzb-info.cz/8439-tepelne-technicke-parametry-cihel-minulost-soucasnost-a-budoucnost>
- [20] PYTLÍK, Petr. *Cihlářství*. Brno: CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0612-7
- [21] Šveda, M.: Vplyv drewných pilin na vlastnosti tehliarskeho črepu. *Stavební obzor*, 10, 2001, č. 1, s. 17-20. /ISSN 1210-4207
- [22] Vlhkostní a tepelné vlastnosti lehčeného keramického střepu [online]. 2017 [cit. 3. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so022012.pdf>
- [23] Papírenský kal jako lehčivo cihlářského střepu [online]. 2017 [cit. 3. 1. 2017]. Dostupné z WWW: <http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so102010.pdf>
- [24] Využití čistírenského kalu při lehčení cihelného střepu [online]. 2017 [cit. 3. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so092009.pdf>
- [25] SUK, V. *Využití nevyhořívajících lehčiv pro lehčení cihlářského střepu*. Diplomová práce. VUT FAST Brno, 2016.
- [26] FRIC, M. *Možnosti zvýšení užitečných vlastností lehčeného cihlářského střepu*. Diplomová práce. VUT FAST Brno, 2013
- [27] ISOMET 2114 – Thermal properties analyzer, User's Guide. Bratislava.
- [28] Měření tepelné vodivosti stavebních materiálů [online]. 2017 [cit. 3. 1. 2017]. Dostupné z WWW:<http://tri-m.fce.vutbr.cz/>

- [29] GROS, P. Drevo – zdroj energie. *Odpady*. 2002, vol. 12, no. 4, p. 5-6. ISSN 1210-4922
- [30] Bigotova křivka [online]. 2017 [cit. 3. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
[http://images.slideplayer.cz/11/2934165/slides/slide\\_13.jpg](http://images.slideplayer.cz/11/2934165/slides/slide_13.jpg)
- [31] Sláma [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
[http://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/hnojiva/slama.htm](http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/hnojiva/slama.htm)
- [32] Antracit [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Antracit>
- [33] Mouka [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Mouka>
- [34] VASILEJOVÁ, Zdeňka. *Dějiny Japonska*. Praha : Nakladatelství Svoboda, 1986. 604 s. S. 265.
- [35] Konopné pazdeří [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<http://web.archive.org/web/20110613172556/http://www.konopa.cz/soubory/o0000000472.pdf>
- [36] Kukuřičná podestýlka [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<http://www.granum.cz/podestylky/1026-kukuricna-podestylka-jemna-10-l>
- [37] Konopné pazdeří [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<https://www.akva-exo.cz/detail/pro-hlodavce/podestylky/ostatni/9058/>
- [38] Rašelina [online]. 2017 [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z WWW:  
<http://www.mzahrada.cz/product/specialni-baltska-bila-raselina-pro-masozrave-rostliny-1l-66>

## **NORMY**

ČSN 72 1564 Cihlářské zeminy

ČSN 72 1083 Termické rozklady keramických surovin

ČSN 72 1074 Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem

ČSN 72 1565 – 5 Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení délkových změn sušením a pálením

ČSN 72 1565 – 11 Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení maximální porovnávací rychlosti nezávadného sušení. Stanovení kritické vlhkosti

## Seznam použitých zkratek a symbolů

d	deformační poměr	[-]
CSB	koeficient citlivost k sušené podle Bigota	[-]
$m_p$	hmotnost vzorku po výpalu	[g]
$m_s$	hmotnost vysušeného výrobku	[g]
$m_n$	hmotnost nasáklého výrobku	[g]
$m_{nv}$	hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky	[g]
$\rho_v$	objemová hmotnost vody	[kg·m <sup>-3</sup> ]
OH	objemová hmotnost	[kg·m <sup>-3</sup> ]
ZH	zdánlivá hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$h_n$	výška válečku po deformaci	[mm]
$h_0$	výška válečku před deformací	[mm]
$l_s$	délka vzorku po vysušení	[mm]
$l_z$	délka vzorku před vysušením	[mm]
$l_p$	délka vzorku po výpalu	[mm]
l	rozpětí podpor	[mm]
b	šířka zkušební vzorku	[mm]
h	tloušťka zkušební vzorku	[mm]
$R_t$	pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
F	síla v okamžiku porušení vzorku	[N]
w	vlhkost	[%]
$w_r$	skutečná vlhkost těsta	[%]
$w_k$	kritická vlhkost těsta	[%]
DS	délková změna sušením	[%]
DP	délková změna pálením	[%]
DC	celkové délková změna	[%]

ZP	ztráta hmotnosti pálením	[%]
NV	nasákavost	[%]
PZ	zdánlivá pórovitost	[%]
$\lambda$	tepelná vodivost materiálu	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

### Chemické sloučeniny

$\text{Al}_2\text{O}_3$	oxid hlinitý
$\text{CaO}$	oxid vápenatý
$\text{CaCO}_3$	uhličitan vápenatý
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	hydroxid vápenatý
$\text{CO}$	oxid uhelnatý
$\text{CO}_2$	oxid uhličitý
$\text{Cl}$	chlor
$\text{FeO}$	oxid železnatý
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	oxid železitý
$\text{H}_2\text{O}$	voda
$\text{K}_2\text{O}$	oxid draselný
$\text{Na}_2\text{O}$	oxid sodný
$\text{P}_2\text{O}_5$	oxid fosforečný
$\text{SO}_2$	oxid siřičitý
$\text{SO}_3$	oxid sírový
$\text{SiO}_2$	oxid křemičitý
$\text{TiO}_2$	oxid titančitý

## Seznam tabulek, obrázků a grafů

### Tabulky

<i>Tabulka č. 1.: Základní fyzikální vlastnosti keramických střepů [22].....</i>	28
<i>Tabulka č. 2.: Vlastnosti výlisků směsí [23] .....</i>	30
<i>Tabulka č. 3.: Vlastnosti vypáleného střepu [24] .....</i>	35
<i>Tabulka č. 4.: Dávkování a sypná hmotnost lehčiv .....</i>	54
<i>Tabulka č. 5.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro kukuřičnou podestýlku .....</i>	55
<i>Tabulka č. 6.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro slámu .....</i>	56
<i>Tabulka č. 7.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro konopné pazdeří .....</i>	57
<i>Tabulka č. 8.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro rašelinu .....</i>	58
<i>Tabulka č. 9.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro papírenský kal .....</i>	59
<i>Tabulka č. 10.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro antracit.....</i>	60
<i>Tabulka č. 11.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro mouku.....</i>	61
<i>Tabulka č. 12.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro otruby .....</i>	62
<i>Tabulka č. 13.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro piliny .....</i>	63
<i>Tabulka č. 14.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro antracit a nevápenatou zeminu.....</i>	64
<i>Tabulka č. 15.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro mouku a nevápenatou zeminu.....</i>	65
<i>Tabulka č. 16.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro otruby a nevápenatou zeminu.....</i>	66
<i>Tabulka č. 17.: Vypočítané a naměřené hodnoty pro piliny a nevápenatou zeminu .....</i>	67
<i>Tabulka č. 18.: Porovnání citlivosti k sušení podle Bigota .....</i>	68
<i>Tabulka č. 19.: Porovnání objemové hmotnosti .....</i>	69
<i>Tabulka č. 20.: Porovnání skutečné vlhkosti směsi, kritické vlhkosti, nasákavosti vypáleného střepu a zdánlivé pórovitosti .....</i>	70

<i>Tabulka č. 21.: Porovnání součinitele tepelné vodivosti po výpalu .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka č. 22.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka č. 23.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka č. 24.: Porovnání objemové hmotnosti vysušených vzorků a vzorků vypálených s nárůstem teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min .....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka č. 25.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením při nárůstu teploty výpalu 3 °C/min a 2,5 °C/min .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka č. 26.: Porovnání součinitele tepelné vodivosti na vysušeném vzorku a poté na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka č. 27.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min.....</i>	<i>77</i>



## Obrázky

Obr. č. 1.: Příklad vypalovací křivky cihlářských výrobků v tunelové peci [10]....	15
Obr. č. 2.: Nejstarší česká lehčená cihla [12].....	16
Obr. č. 3.: Analýza TG, DTA, DTG vzorku dřevěných pilin [26] .....	20
Obr. č. 4.: Analýza TG, DTA, DTG vzorku papírenského kalu [26].....	25
Obr. č. 5.: Makrostruktura vypáleného střepu s obsahem pilin [23].....	26
Obr. č. 6.: Vliv přídavku pilin na objemovou hmotnost vypáleného střepu [23]...	27
Obr. č. 7.: Analýza DTA a TG vzorku papírenského kalu [23], .....	31
Obr. č. 8.: Analýza DKTA [23],.....	31
Obr. č. 9.: Makrostruktura vypáleného vzorku ze směsi dřevěných pilin a papírenského kalu [23] .....	33
Obr. č. 10.: Vliv podílu kalu na objemovou hmotnost vypáleného střepu [24].....	35
Obr. č. 11.: Polymerizace styrenu [26].....	38
Obr. č. 12.: Cihla plněna polystyrenem firmy Heluz Family 2v1 [19].....	38
Obr. č. 13.: Analýza TG, DTA, DTG vzorku polystyrenu [26].....	39
Obr. č. 14.: Tvarovka POROTHERM [19].....	40
Obr. č. 15.: Bigotova křivka [30].....	44
Obr. č. 16.: Pevnost v tahu za ohybu [26].....	48
Obr. č. 17.: Isomet 2114 [28].....	49
Obr. č. 18.: RTG – rentgenová difrakční analýza – zemina Novosedly [26].....	50
Obr. č. 19.: DTG, DTA a TG zeminy Novosedly [26] .....	51
Obr. č. 20.: RTG difrakční analýza: A – Týn nad Vltavou (nevápenatá zemina), B – Novosedly (vápenatá zemina) [25].....	52
Obr. č. 21.: Analogový teploměr K204 s termočlánky zabudovanými uvnitř cihliček .....	53
Obr. č. 22.: Vápenatá zemina (vlevo) a nevápenatá zemina (vpravo) .....	54
Obr. č. 23.: Kukuřičná podestýlka [36].....	55

Obr. č. 24.: Sláma.....	56
Obr. č. 25.: Konopné pazdeří [37].....	57
Obr. č. 26.: Rašelina [38].....	58
Obr. č. 27.: Papírenský kal .....	59
Obr. č. 28.: Antracit.....	60
Obr. č. 29.: Mouka .....	61
Obr. č. 30.: Otruby .....	62
Obr. č. 31.: Piliny .....	63
Obr. č. 32.: Rašelina (vlevo), kukuřice (vpravo) – oboje vápenatá hlína.....	81
Obr. č. 33.: Konopí (vlevo), sláma (vpravo) – oboje vápenatá hlína .....	81
Obr. č. 34.: Piliny s nevápenatou hlínou (vlevo), piliny s vápenatou hlínou (vpravo) .....	81
Obr. č. 35.: Papírenský kal .....	81
Obr. č. 36.: Otruby s nevápenatou hlínou (vlevo), otruby s vápenatou hlínou (vpravo) .....	82
Obr. č. 37.: Mouka s nevápenatou hlínou (vlevo), mouka s vápenatou hlínou (vpravo) .....	82
Obr. č. 38.: Antracit s vápenatou hlínou (vlevo), antracit s nevápenatou hlínou (vpravo) .....	82

## Grafy

<i>Graf č. 1.: Průběh výpalu kukuřičné podestýlky a hlíny</i> .....	55
<i>Graf č. 2.: Průběh výpalu slámy a hlíny</i> .....	56
<i>Graf č. 3.: Průběh výpalu konopného pazdeří a hlíny</i> .....	57
<i>Graf č. 4.: Průběh výpalu rašeliny a hlíny</i> .....	58
<i>Graf č. 5.: Průběh výpalu papírenského kalu a hlíny</i> .....	59
<i>Graf č. 6.: Průběh výpalu antracitu a hlíny</i> .....	60
<i>Graf č. 7.: Průběh výpalu mouky a hlíny</i> .....	61
<i>Graf č. 8.: Průběh výpalu otrub a hlíny</i> .....	62
<i>Graf č. 9.: Průběh výpalu pilin a hlíny</i> .....	63
<i>Graf č. 10.: Průběh výpalu antracitu a nevápenaté hlíny</i> .....	64
<i>Graf č. 11.: Průběh výpalu mouky a nevápenaté hlíny</i> .....	65
<i>Graf č. 12.: Průběh výpalu otrub a nevápenaté hlíny</i> .....	66
<i>Graf č. 13.: Průběh výpalu pilin a nevápenaté hlíny</i> .....	67
<i>Graf č. 14.: Porovnání citlivosti k sušení podle Bigota</i> .....	68
<i>Graf č. 15.: Porovnání objemové hmotnosti</i> .....	69
<i>Graf č. 16.: Porovnání skutečné vlhkosti směsi, kritické vlhkosti, nasákavosti vypáleného střepu a zdánlivé pórovitosti</i> .....	70
<i>Graf č. 17.: Porovnání součinitele tepelné vodivosti po výpalu</i> .....	71
<i>Graf č. 18.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením</i> .....	72
<i>Graf č. 19.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu</i> .....	73
<i>Graf č. 20.: Porovnání objemové hmotnosti vysušených vzorků a vzorků vypálených s nárůstem teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min</i> .....	74
<i>Graf č. 21.: Porovnání ztráty hmotnosti pálením při nárůstu teploty výpalu 3 °C/min a 2,5 °C/min</i> .....	75
<i>Graf č. 22.: Porovnání součinitele tepelné vodivosti na vysušeném vzorku a poté na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min</i> .....	76

<i>Graf č. 23.: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu na vypáleném vzorku při nárůstu teploty 3 °C/min a 2,5 °C/min.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf č. 24.: Průběh výpalu za použití otrub a nevápenaté zeminy .....</i>	<i>78</i>
<i>Graf č. 25.: Průběh výpalu za použití otrub a vápenaté zeminy .....</i>	<i>78</i>
<i>Graf č. 26.: Průběh výpalu za použití pilin a nevápenaté zeminy .....</i>	<i>79</i>
<i>Graf č. 27.: Průběh výpalu za použití pilin a vápenaté zeminy .....</i>	<i>79</i>
<i>Graf č. 28.: Průběh výpalu za použití mouky a nevápenaté zeminy .....</i>	<i>80</i>
<i>Graf č. 29.: Průběh výpalu za použití mouky a vápenaté zeminy .....</i>	<i>80</i>