



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ CIHELNÉHO RECYKLÁTU V  
POJIVOVÝCH SYSTÉMECH S OBSAHEM P-SLÍNKU**

POSSIBILITIES OF USING RECYCLED BRICK IN BINDERS SYSTEMS WITH P-CLINKER CONTENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Václav Tušla**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.**

**BRNO 2019**

## Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1355/2018  
Ústav: Ústav chemie materiálů  
Student: **Bc. Václav Tušla**  
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

### Název diplomové práce:

Možnosti využití cihelného recyklátu v pojivových systémech s obsahem p–slínku

### Zadání diplomové práce:

1. Literární rešerše.
2. Analýza vstupních surovin, fyzikální vlastnosti.
3. Návrhy experimentů.
4. Experimentální část – provedení experimentů.
5. Zpracování dosažených dat, vyhodnocení experimentů.
6. Závěry a doporučení.
7. Sepsání závěrečné práce.

### Termín odevzdání diplomové práce: 10.5.2019

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

-----  
Bc. Václav Tušla  
student(ka)

-----  
Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá přípravou pojivových systémů na bázi portlandského slinku a cihelného recyklátu. Jako cihelný recyklát je považována původně odpadní surovina ze stavebnictví či z výroby cihlářských výrobků. V této práci byl použit jemně mletý cihelný recyklát a cihelný obrus, který vzniká při finálním opracování vypálených cihel. Zakomponováním cihelného obrusu do alternativního systému na bázi portlandského slinku by přineslo nemalé ekologické i ekonomické benefity. Diplomová práce se zabývá možnostmi využití cihelného obrusu jako pucolánové příměsi k portlandskému slinku, s cílem připravit a otestovat portlandský cement, který je definován v ČSN EN 197-1. Tato práce se rovněž zabývá možnostmi přípravy alternativních pojiv na bázi p-slinku, avšak takových, které nedefinuje ČSN EN 197-1. Konkrétně se jedná o ternární pojiva s přídavkem fluidního ložového popílku a pojiva na bázi hybridních cementů s obsahem síranu sodného.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the preparation binder systems based on Portland clinker and recycled brick. Recycled brick is considered a waste material from construction or production of brick products. This thesis uses finely grounded brick recycled and brick dust, which is produced during final processing of burnt bricks. By incorporating brick dust in alternative system based on Portland clinker could bring ecological and economic benefits. This diploma thesis deals with option using brick dust as pozzolan admixture to Portland clinker, with the aim to prepare and test Portland cement, which is defined in v ČSN EN 197-1. This thesis also deals with possibility preparation of alternative binders based on p-clinker, but those not defined by ČSN EN 197-1. Specifically these are ternary binders with fluid bed ash and binders based on hybrid cements containing sodium sulfate.

## **Klíčová slova**

Portlandský slínek, cihelný obrus, využití druhotných surovin

## **Key words**

Portland clinker, brick dust, utilization of secondary raw materials

TUŠLA, Václav. *Možnosti využití cihelného recyklátu v pojivových systémech s obsahem p-slínku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117509>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Tomáš Opravil.

### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana VUT.

.....

Podpis studenta

### Poděkování

*Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Tomáši Opravilovi Ph.D. za cenné rady při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radoslavu Novotnému Ph.D, Ing. Jakubovi Palovčíkovi a dalším pracovníkům fakulty za pomoc při měření praktické části. Velké poděkování patří i mým nejbližším za vlídná slova podpory.*

## Obsah

1	Úvod.....	6
2	Teoretická Část.....	8
2.1	Portlandský cement .....	8
2.1.1	Výroba portlandského cementu.....	8
2.1.2	Suroviny pro výrobu portlandského slinku .....	9
2.1.3	Technologie výroby portlandského slinku .....	10
2.1.4	Chemické procesy při výrobě portlandského slinku.....	10
2.1.5	Hydratace portlandského cementu .....	12
2.1.6	Stádia hydratace portlandského cementu .....	12
2.1.7	Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slinku.....	13
2.1.7.1	Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slinku a popílku z fluidního spalování .....	13
2.1.7.2	Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slinku s obsahem Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	14
2.2	Keramika .....	15
2.2.1	Keramika – cihlářská výroba.....	15
2.2.2	Historie cihlářství .....	15
2.2.3	Suroviny pro cihlářskou výrobu .....	16
2.2.3.1	Plastické suroviny.....	16
2.2.3.2	Neplastické suroviny .....	18
2.2.4	Výroba cihlářských výrobků .....	19
2.2.4.1	Příprava cihlářské směsi.....	20
2.2.4.2	Tváření cihlářských výrobků.....	21
2.2.4.3	Sušení cihlářských výrobků.....	21
2.2.4.4	Výpal cihlářských výrobků.....	21
2.2.4.5	Broušení cihlářských výrobků.....	24
2.3	Využití cihelného recyklátu, současný stav a návrhy do budoucna .....	25
2.3.1	Produkce odpadů ve stavebnictví .....	25
2.3.2	Antuka .....	25
2.3.3	Cihelný recyklát jako kamenivo.....	25
2.3.4	Cihelný recyklát jako náhradu cementu .....	26
2.3.5	Chemické složení cihelného obrusu .....	26
2.3.5.1	Pucolánová aktivita .....	27
2.3.5.2	Pucolánová aktivita cihelného obrusu .....	27
2.3.5.3	„Filler effect“.....	28

3	experimentální část.....	29
3.1	Měření velikosti částic.....	29
3.2	Rentgenová difrakční analýza .....	29
3.3	Stanovení pucolánové aktivity .....	30
3.4	Stanovení volného vápna.....	31
3.5	Příprava cementů a zkušebních těles .....	32
3.6	Měření počátku a konce tuhnutí .....	32
3.7	Izotermická kalorimetrie .....	33
3.8	Hydraulický lis pro měření pevností v tlaku .....	33
3.9	Měření objemové hmotnosti.....	34
3.10	Měření objemových změn .....	34
4	Charakterizace použitých materiálů .....	35
4.1.1	Portlandský slínek .....	35
4.1.2	Cihelný obrus .....	35
4.1.3	Fluidní ložový slínek.....	36
5	Výsledky a diskuze.....	38
5.1	Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slínku s obsahem cihelného obrusu....	38
5.1.1	Sledování počátku a konce tuhnutí alternativního pojivového systému na bázi portlandského slínku s obsahem cihelného recyklátu.....	39
5.1.2	Sledování tepelných procesů při hydrataci testovaných pojivových systémů metodou izotermické kalorimetrie.....	42
5.1.3	Mechanické vlastnosti testovaných pojivových systémů stanovené na pastách alternativních pojiv.....	46
5.1.4	Mechanické vlastnosti testovaných pojivových systémů stanovené na maltách alternativních pojiv.....	49
5.2	Optimalizace alternativního pojivového systému na bázi portlandského slínku s obsahem cihelného obrusu .....	54
5.2.1	Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slínku a obsahem cihelného obrusu s přidávkem fluidního ložového popílku.....	54
5.2.2	Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slínku a obsahem cihelného obrusu s přidávkem Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	58
6	Závěr.....	63
7	Seznam použitých zkratk.....	64
8	Literatura .....	65
9	Přílohy .....	70

# 1 ÚVOD

Počet obyvatel na planetě roste, okolo roku 2100 by se měl pohybovat přibližně kolem 11 miliard. Už teď je patrný trend zpomalování tohoto růstu a přibližně od roku 2100 by se počet obyvatel neměl zvyšovat [1]. Nicméně jedná se o velký nárůst počtu lidí, s čímž porostou i nároky na prostory k bydlení či práci a s tím souvisí i nárůst stavebních a demoličních odpadů. Přičemž už nyní jsou objemy stavebních a demoličních odpadu počítány v desítkách milionů tun na zemi (Čína, 2013 – 100 mil. tun, Velká Británie, 2016 – 50 mil. tun, Malajsie, 2014 – 10 mil. tun) [2]. Stavebnictví v České republice se podílí přibližně 40 % na celkové produkci odpadů, zastoupení 40 % je zhruba stejné po sledované období 2006–2017. Produkce stavebních a demoličních odpadů (beton, cihly, tašky a keramika), byla v roce 2017 okolo 2 mil tun. V roce 2014 byl schválen plán odpadového hospodářství České republiky na období 2015–2024, hlavními strategiemi jsou předcházení vzniku odpadů a zvýšení recyklace i materiálového využití odpadů [3], [4], [5].

Zároveň se zvyšuje spotřeba cementu, při výrobě cementu se uvolňuje velké množství CO<sub>2</sub>. Uvádí se, že při výrobě jedné tuny slinku se uvolní jedna tuna oxidu uhličitého. V roce 2009 představovala výroba cementu 5 % veškerých emisí CO<sub>2</sub>. V poslední dekádě se zvýšila spotřeba cementu a nyní představuje 5,8 % celosvětových emisí CO<sub>2</sub>. Dalším mínusem může být devastace krajiny při těžbě surovin. Z těchto důvodů se začala hledat alternativa cementu, či náhrada jeho části. K tomuto účelu je vhodné použít odpadní produkty z jiných odvětví, pro které se zároveň najde využití [2], [6].

Nebylo by možné částečně vyřešit problém s odpady ze stavebnictví a zároveň snížit produkci portlandského slinku? Využití druhotných surovin jako hlavní složky v cementech na bázi portlandského slinku se již v některých případech používá v praxi (struska, popílky). Tato práce bude následovat jejich příklad. Konkrétněji se bude zabývat zakomponováním cihelného obrusu do alternativních pojivových systémů na bázi portlandského slinku.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části bude pojednáno o portlandském slínku a cihelném recyklátu, tedy materiálech, se kterými bylo pracováno v praktické části. Další část se zaměří na současné využívání cihelného recyklátu v praxi, dále na možnosti jeho využívání, které jsou v publikovány v akademické sféře.

### 2.1 Portlandský cement

Cement je hydraulické pojivo, po smíchání s vodou a zatuhnutí na vzduchu, je schopné dále tuhnut a tvrdnout i pod vodu. S vodou tvoří kaši, kterou lze zpracovávat, následně tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí, po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost. Cement vzniká drcením, mletím a homogenizací vhodných surovin, hlavními účinnými látkami jsou  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Takto připravená směs se vypaluje nad mez slinutí. Vzniklá „meziproduct“ – slínek, dalšími procesy jsou ochlazení, odležení a rozemílání s přísadami a příměsemi [7][32].

Podle převažující aktivní složky lze dělit cementy na křemičitanové cementy, hlinitanové cementy a další (železitanové, barnaté). Portlandský cement patří do skupiny křemičitanových cementů a objem jeho produkce je nejvyšší. Tento cement obsahuje portlandský slínek a regulátor tuhnutí, kterým je zpravidla sádrovec. Dále může obsahovat granulovanou vysokopeční strusku, přírodní či přírodní kalcinovaný pucolán, křemičitý a vápenatý popílek, kalcinovanou břidlici, vápenec nebo křemičitý úlet. Podle podílů těchto komponent se rozlišují druhy cementů CEM I-CEM V [7], [8].

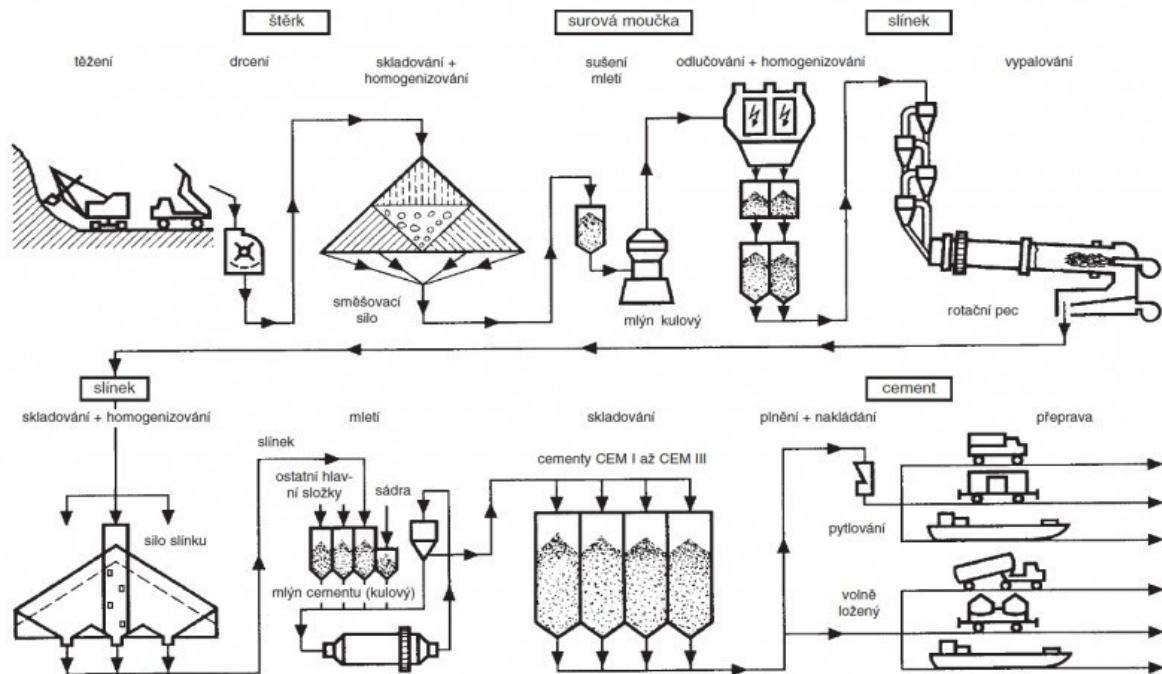
Pucolánový cement je označen CEM IV, tento cement může obsahovat křemičitý úlet, přírodní i přírodní kalcinovaný pucolán a popílek křemičitý i vápenatý. Je rozdělen na CEM IV/A, kde obsah výše zmíněných surovin může být 11–35 % a na CEM IV/B, kde je zastoupení dalších surovin 36–55 % [8].

Další dělení cementů je podle pevnostních tříd 32,5; 42,5 a 52,5. Například cement třídy 32,5 musí po 28 dnech dosáhnout normalizovanou pevnost 32,5–52,5 MPa. Rozeznávají se tři třídy podle počátečních pevností: třída s normální pevností je označena N, třída s vysokými počátečními pevnostmi je značena písmenem R. Třída L se používá pouze pro cementy skupiny CEM III (vysokopeční cement) a značí nízké počáteční pevnosti [8].

#### 2.1.1 Výroba portlandského cementu

Hydraulické tuhnutí bylo známo už ve starověku. Ve starém Římě se používala směs hašeného vápna a sopečných popelů. Na konci 18. století se rozvíjel zájem o hydraulická pojiva, počáteční výzkum je spojen s Johnem Smeatonem a reverendem Jamesem Parkerem z Northfleetu. Na počátku 19. století použil L. J. Vicat připravenou ze směsi vápence a jílu. V roce 1824 byl udělen patent na výrobu portlandského cementu Josephu Aspdinovi. Název „portlandský“ vznikl na základě vizuální podobnosti cementu, který Joseph Aspdin patentoval

s přírodním vápence, který se těžil na ostrově Portland. V Čechách byla první cementárna založena v roce 1865 v Bohosudově (Mariaschein) [9], [12]. Základní schéma výroby cementu je uvedeno, viz obr. 1.



obr. 1: schéma výroby cementu [11]

### 2.1.2 Suroviny pro výrobu portlandského slínku

Základní složkou pro výrobu slínku jsou vápenaté suroviny (vápence, jílovité vápence, slínovce), optimální obsah  $\text{CaCO}_3$  se v těchto surovinách pohybuje v rozmezí 75-80 %. Pokud je vápenc moc čistý, přidávají se jílové suroviny (jíly, slíny, jílovce) obsahující fáze tvořené  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Naopak do více znečištěných vápenců se přidávají čistší vápence. Jestliže je třeba, používají se korigující přísady, které upravují zastoupení jednotlivých hydraulických oxidů: křemenný písek (pro  $\text{SiO}_2$ ), bauxit (pro  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ocelářské kaly (pro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Nezbytnou součástí je regulátor tuhnutí, k tomu se používá sádrovec. Další suroviny jsou pomocné, jejich příkladem jsou intenzifikátory pro výpal, pro mletí či ztekucovadla [7], [12].

Poměr základních složek  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  má primární vliv na vlastnosti produktu. Cílem je, aby veškerý  $\text{CaO}$  zreagoval při tepelném zpracování na produkty schopné hydraulického tuhnutí. V minulosti byly vytvořeny empirické modely, které charakterizovaly poměr mezi základními hydraulickými oxidy: hydraulický, silikátový a hlinitanový. Poměr mezi přítomným obsahem  $\text{CaO}$  a teoreticky potřebnými dalšími hydraulickými oxidy se jako označuje stupeň sycení vápnem [12].

### 2.1.3 Technologie výroby portlandského slinku

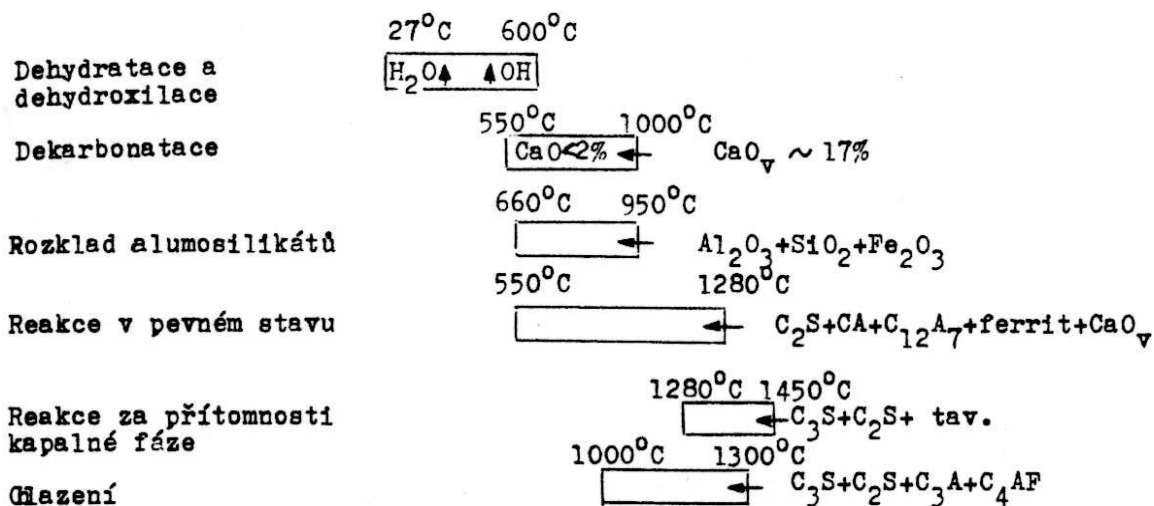
V současné době převažuje suchý způsob výroby portlandského slinku. Mokrý způsob má výhody v lepší homogenizaci, ale problémem je vysoká energetická náročnost při sušení produktu. V České republice se v současnosti výhradně používá suchý způsob, dále je popsán suchý způsob výroby.

První fází je těžba surovin zpravidla z povrchových lomů, při těžbě se provádí průběžné analýzy složení těžených hornin, aby byla připravena optimální směs. Dalším krokem je drcení, které může být i vícestupňové. Používají se čelist'ové a kuželové drtiče v prvních stupních, v dalších lze použít například i kladivový drtič. Následně putuje surovina do předhomogenizačních sil. Homogenita se dosahuje systémem ukládání a odebírání suroviny. Mletí je jedna z nejdůležitějších operací, neboť velikost částic má velký vliv na průběh slinování. Mletí probíhá především v kulových mlýnech, ve kterých se používají mlecí kulová tělesa. Zároveň zde dochází k dosušení suroviny. Namletá moučka se skladuje v homogenizačních silech [12].

Dále se moučka tepelně zpracovává. Aby se zvýšila efektivita výpalu a zlepšilo se hospodaření s teplem, zařadily se před pec přehřívací zařízení. Jednou z možností jsou výměníky tepla, jedná se o soustavu cyklonů, kde se souproudně ohřívá surovinová moučka pomocí spalin. Dále se pro zvýšení účinnosti výpalu zařadily kalcinátory, kam přichází přehřátá moučka a pomocí hořáků zde, mimo přehřátí, dochází i k rozkladu  $\text{CaCO}_3$ . Pece se používají především rotační, jedná se o dlouhé ocelové válce vyložené žárovzdornou vyzdívkou. Postupně se surovina sune směrem k hořáku a dochází zde k výpalu na  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ . Slinek se řízeně ochlazuje v chladičích, nejčastěji roštových. Následuje odležení v silech. Slinek se poté mele se sádrovcem, případně s dalšími surovinami, podle typu cementu, kterého má být dosaženo. Měrný povrch velmi ovlivňuje reaktivitu cementu, proto je udáván minimální povrch  $225\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ , jenž musí být dosažen [12].

### 2.1.4 Chemické procesy při výrobě portlandského slinku

Z hlediska chemických procesů probíhají následující děje, viz obr. 2. První fáze je odpaření fyzicky a chemicky vázané vody. Dalším krokem je dekarbonatace vápence, která začíná přibližně při  $550\text{ }^\circ\text{C}$ . Následně probíhají reakce v pevném stavu a začíná tvorba dikalciumsilikátu ( $\text{C}_2\text{S}$ ), trikalciumaluminátu ( $\text{C}_3\text{A}$ ) a tetrakalciumaluminoferitu ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Přibližně od  $1280\text{ }^\circ\text{C}$  se roztaví  $\text{C}_3\text{A}$  i  $\text{C}_4\text{AF}$  a generuje se kapalná fáze. Část  $\text{CaO}$  a  $\text{C}_2\text{S}$  je rozpuštěna v této kapalně fázi, z těchto komponent vzniká trikalciumsilikát ( $\text{C}_3\text{S}$ ) [13]. Hlavní složky slinku jsou znázorněny v tab. 1.



obr. 2: zaznačení chemických dějů při výpalu slinku [14]

tab. 1: fázové složení portlandského slinku [7]

Fáze	Složení	Obsah [hm. %]
Alit	C <sub>3</sub> S (pevný roztok)	35–65
Belit	β-C <sub>2</sub> S (pevný roztok)	10–40
Světlá spojovací hmota	C <sub>4</sub> AF (pevný roztok) + sklo s oxidy Fe	4–20
Tmavá spojovací hmota	C <sub>3</sub> A (pevný roztok) + bezbarvé sklo	3–15
Volný CaO		<2
Volný MgO		<6

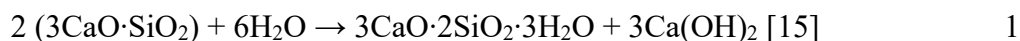
Hlavním minerálem Alitu je C<sub>3</sub>S, dále obsahuje jistý podíl C<sub>3</sub>A, MgO a dalších složek. Čistý C<sub>3</sub>S se rozkládá pod teplotou 1250 °C, ale rychlým ochlazením ho lze uchovat, jako metastabilní formu. C<sub>3</sub>A pomáhá stabilizaci vysokoteplotní formy C<sub>3</sub>S [7].

Minerál β-C<sub>2</sub>S tvoří majoritní podíl v belitu, dále obsahuje další složky, z nichž je nejvýznamnější Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Existují čtyři modifikace minerálu C<sub>2</sub>S: α, α', β a γ. Fáze α, α' a γ jsou stabilní, β je metastabilní. Komerčně vyráběné slinky obsahují převážně β-C<sub>2</sub>S, jenž má dostatečné hydraulické vlastnosti. Aby byla stabilizovaná forma β a nedocházelo k přeměně na γ, která nemá hydraulické vlastnosti, je nutné dostatečně rychlé ochlazení taveniny slinku [7], [15].

Aluminoferitová fáze se označuje jako C<sub>4</sub>AF a nazývá brownmillerit, jedná se o pevný roztok složek C<sub>2</sub>A a C<sub>2</sub>F. V této fázi mohou být v malém množství zaměněny některé prvky: SiO<sub>2</sub>, MgO či Na<sub>2</sub>O. Aluminoferit vytváří sklovitou fázi mezi krystaly alitu a belitu. V odraženém světle světelného mikroskopu se tato fáze jeví jako světlá, proto je pojmenována světlá spojovací hmota. Tmavá část mezerní hmoty je tvořena C<sub>3</sub>A. Dále je přítomné CaO a MgO, jejichž množství jsou limitována, neboť tvoří krystalické produkty za značných objemových změn [7], [15].

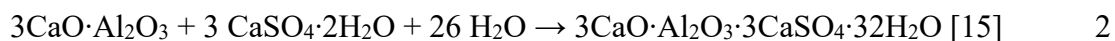
### 2.1.5 Hydratace portlandského cementu

Reakce slinkových minerálů se sestává z hydrolyzy a následné hydratace. Nejrychleji reaguje s vodou fáze C<sub>3</sub>A, poté C<sub>3</sub>S, následuje C<sub>4</sub>AF, nejpomaleji reaguje s vodou β-C<sub>2</sub>S. Hydratace C<sub>3</sub>S lze popsat následující rovnicí 1, obdobně reaguje i β-C<sub>2</sub>S [7], [15].



Při tuhnutí a tvrdnutí vznikají hydrosilikáty obecného vzorce  $m \text{CaO} \cdot n \text{SiO}_2 \cdot p \text{H}_2\text{O}$ . Produkty mají koloidní rozměry a vytvářejí gely. Hydrosilikátový gel (C–S–H gel) postupně roste na zrnu slinového minerálu, má tvar jehlic, v literatuře je popsán jako dlouhovláknitý. Vzniklé produkty vyplňují prostor mezi zrny a spojují je. Druhým typem je vnitřní C–S–H gel, který roste do zrn, je označován jako drobnovláknitý. Vznikající fáze mají rentgenamorfní povahu, takže není možné je blíže identifikovat. V literatuře je popsána řada sloučenin, jimiž je snaha C–S–H gel popsat např. tobermorit (C<sub>5</sub>S<sub>6</sub>H<sub>5</sub>), afwillit (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>), hillebrandit (C<sub>2</sub>SH) nebo xonolit (C<sub>6</sub>S<sub>6</sub>H) [7], [15].

Alumináty mají snahu vytvářet hydroalumináty, které mají výrazně krystalický charakter a vznikají z roztoku. Primárními produkty jsou metastabilní fáze, např.: C<sub>4</sub>AH<sub>12–19</sub> nebo C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>. Konečným produktem dlouhodobé hydratace C<sub>3</sub>A je hydrogranát (C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>). V přítomnosti sádrovce (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O neboli 3C $\hat{\text{S}}$ H<sub>2</sub>) vzniká z C<sub>3</sub>A a vody ettringit (C<sub>6</sub>A $\hat{\text{S}}$ <sub>3</sub>H<sub>32</sub>), dále je označován jako trisulfát (Aft), viz rovnice 2 [7], [15].



Při hydrataci C<sub>4</sub>AF se formuje poměrně stálý meziproduct C<sub>4</sub>FH<sub>12</sub>, konečnými produkty jsou C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> a C<sub>3</sub>FH<sub>6</sub> [15]. Volný CaO hydratuje a vytváří destičkovitý portlandit [Ca(OH)<sub>2</sub> neboli CH]. Volný MgO reaguje s vodou pomaleji než CaO a vzniká brucit (Mg(OH)<sub>2</sub>) [15].

### 2.1.6 Stádia hydratace portlandského cementu

Hydratace portlandského cementu lze rozdělit do pěti period. V první předindukční periodě se rychle uvolňuje hydratační teplo. Rozpouštění je rychlé, trvá 10–15 min. Dochází k rozpouštění aluminátů a alkalických síranů, uvolňují se ionty do roztoku. Začíná vznikat ettringit [15],[16].

V indukční periodě se hydratační teplo uvolňuje pomalu a vzrůstá viskozita systému. Ionty Ca<sup>2+</sup> dosahují úrovně přesycení a narůstá hodnota pH. Pokračuje tvorba ettringitu a začínají se tvořit nuklea C–S–H gelu. Tvorba C–S–H gelu je pravděpodobně upřednostněna před tvorbou portlanditu, díky rychlejší tvorbě krystalizačních zárodků. Tyto procesy snižují rozpustnost fází portlandského slinku, tedy v záměsové vodě ubývají anionty hydrogenkřemičitanu. Na konci indukční periody začíná precipitovat portlandit. Období indukční periody je ukončeno přibližně za 1 až 2 hod [15], [16], [17].

Třetí perioda se vyznačuje rychlým vývinem hydratačního tepla. Na konci indukční periody precipitoval destičkovitý portlandit, následně se snížil pH a obsah Ca<sup>2+</sup> iontů. Což opět

nastartuje rozpouštění fázi portlandského cementu. Nastává největší vývoj tepla. Rozpouští se alit a vzniká dlouhovláknitý jehlicovitý C–S–H gel. Vyplňují se póry a hydratované fáze silikátové vytvářejí vazby s aluminátovými. Důsledkem je změna plastické konzistence na pevnou [15], [16], [17].

V další periodě dochází ke snížení uvolňování hydratačního tepla. Začíná hydratovat belit, hydratační reakce jsou řízeny difúzí. Většina cementů neobsahuje dostatečné množství  $\text{CaSO}_4$  na reakci s veškerými aluminátovými fázemi. Nastává vyčerpání síranových iontů z roztoku. Rozpouští se znovu  $\text{C}_3\text{A}$ , desorbují se síranové ionty z povrchu C–S–H gelu a nastává krátká intenzivní tvorba ettringitu. Časem se ettringit stává nestabilní a rozpadá se za vzniku monosulfátu ( $\text{C}_3\text{A}\hat{\text{S}}\text{H}_{12}$ , neboli AFm) [15], [16].

Poslední perioda je dozrávání, kdy se pomalu dotváří mikrostruktura. Veškeré děje jsou podmíněny difúzí, protože jsou jednotlivá zrna pokryta vrstvou hydrátů. Molekuly vody obtížně pronikají touto vrstvou, proto se hydratace zpomaluje. Vzniká vnitřní C–S–H gel, jenž má drobnovláknitou strukturu [15], [17].

### **2.1.7 Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slinku**

Výroba portlandského slinku s sebou nese i poměrně velkou zátěž pro přírodu. Z toho důvodu se hledají způsoby, jak omezit množství jeho výroby. Jako v každém odvětví se i zde hledají způsoby nových alternativních přístupů, které by přinesly pojivové systémy s přidaným benefit v podobě nové vlastnosti, či využití druhotných surovin [6].

#### ***2.1.7.1 Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slinku a popílku z fluidního spalování***

Existují dva základní typy spalování fosilních paliv v tepelných elektrárnách, jedná se o vysokoteplotní spalování a spalování na fluidním loži. Odpadním produktem spalování jsou popílky. Při fluidním spalování se rozlišují úletové, které jsou odfiltrovány ze spalin, a ložové, které zůstávají na roštu v kotli. Při fluidním spalování je jako odsířovací prostředek použit  $\text{CaCO}_3$  a jeho reakcí s  $\text{SO}_2$  vzniká  $\text{CaSO}_4$ . Ložové popílky z fluidního spalování obsahují zvýšené množství anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) a volné vápno ( $\text{CaO}$ ), které tu zůstaly po odsíření. Díky obsahu těchto dvou komponent může fluidní ložový popílek tuhnout i tvrdnout po smíšení s vodou. Hydraulické vlastnosti jsou závislé na obsahu volného vápna a anhydritu, jejich množství je ale proměnlivé v závislosti na kvalitě spalovaného uhlí. Fluidní ložové popílky nemohou být použity jako příměs cementu, protože nesplňují technické požadavky normy EN 450-1 (European Committee for Standardization, 2005). Nicméně přidavek fluidního ložového popílku do systému může v některých případech zvýšit mechanické vlastnosti [18], [19], [20]

### **2.1.7.2 Alternativní pojivové systémy na bázi portlandského slínku s obsahem $\text{Na}_2\text{SO}_4$**

Přídavek pucolánu zpravidla prodlužuje počátek tuhnutí a snižuje počáteční pevnosti. Přídavkem alkalických aktivátorů může být aktivována pucolánová reakce, hlavně v počátečních časech a tím pádem by se zvýšily počáteční pevnosti [21], [22].

Pokud se alkalický aktivátor přidá do systému obsahující portlandský cement a latentně hydraulickou látku vzniká systém, který lze označit za hybridní systém, tedy systém alkalické aktivace portlandského cementu a aluminosilikátů. Průběh probíhajících reakcí v tomto systému je poměrně složitý, někteří autoři předpokládají tvorbu: C–S–H a N–A–S–H gelu. Další studie naznačují, že mohou oba gely interagovat, což by vedlo k odlišnému složení a mikrostruktuře [23], [24].

Jedna z prací uvádí použití hybridního cementu na bázi cihelného obrusu, hydroxidu sodného a křemičitanu sodného s obsahem portlandského cementu (< 20 %), ve výsledku byla značně navýšena pevnost v tlaku oproti tomu bez portlandského cementu [23].

Byla vypracována studie, která zkoumala působení  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (4 %) v systému slínek (18 %) a popílek třídy F (FA) (78 %). Výsledkem jsou dva druhy odlišné gelové fáze, v blízkosti alitových zrn se očekává Ca – bohatý C–S–H gel, zatímco v mezilehlých zónách se nacházejí gely s nižším obsahem Ca a vyšším obsahem Al, tento gel má výrazný vliv na počáteční pevnosti i reologické chování [22].

Cihelný obrus má odlišné složení od popílku třídy F, nicméně více druhů gelových fází může vznikat. Problém s vyšším obsahem alkálií je, že můžou s amorfním oxidem křemičitým tvořit gely kyseliny křemičité. Vznikající gel je příčinou objemových změn a mohou vznikat trhlinky v betonu [25].

## 2.2 Keramika

Keramika je materiál anorganický, nekovový a ve vodě prakticky nerozpustný. Má heterogenní strukturu, je z nejméně 30 % krystalický, dále obsahuje skelnou fázi a určité množství pórů. Výroba keramiky je založena na vytvarování z plastického těsta, dále dochází k vysušení a výpalu, přičemž se materiál zpevní a ztuhne [26], [7].

Existuje více možností, jak dělit keramiku. Jedním z nich je dělení podle chemického a fázového složení. Dále podle obsahu pórů: (hutná, slinutá a pórovitá keramika). Další možností je dělení podle struktury:

- Hrubá keramika: obsahuje částice do 2  $\mu\text{m}$ , které jsou nutné pro tváření, ale podíl částic od 0,1–5 mm je zřetelný pouhým okem. Patří sem cihlářské nebo žárovzdorné materiály.
- Jemná keramika: obsahuje částice pouze do 0,1 mm, strukturu lze pozorovat pouze mikroskopem. Příkladem je porcelán či technická keramika.

Podle účelu a použití je obvyklé dělení na:

- Stavební keramiku (cihlářské výrobky, kanalizační kamenina, obklady či dlažba)
- Žárovzdornou (šamot, dinas nebo magnezitové výrobky)
- Keramiku pro průmyslové účely (brusné, řezné nástroje; chemická odolnost či elektrické izolátory)
- Spotřební keramiku (porcelán, nádobová nebo umělecká keramika) [26], [7].

### 2.2.1 Keramika – cihlářská výroba

V dalších částech se práce zaměřuje pouze na cihlářskou výrobu, neboť pouze odpadní produkty neboli možné druhotné suroviny, z tohoto odvětví byly zkoumány.

Cihelný recyklát vzniká při finálním opracování cihlářských výrobků. Jednou z možností je opracování přímo v továrním závodě, další možností je opracování na stavbách. Nezanedbatelnou část tvoří nepovedené kusy či zbytky při výrobě. Dále se jedná o materiál, který vznikl rozbitím při převozu či manipulaci na stavbě.

### 2.2.2 Historie cihlářství

Keramika patří k nejstarším lidským dovednostem. Prvním byly nádoby z hlíny na uchování potravin, nejdříve byly pouze sušeny, následně i páleny. Jednalo se o keramiku s hrubozrnným, pórovitým stěpem, tyto výrobky se datují zhruba do období 10000–3000 př. n. l. Velké technické i estetické úrovně dosáhlo hrnčířství v Řecku, odtud pochází i výraz *keramos*, který byl původně název pro dobytčí roh a později roh na pití z pálené zeminy. Později se v Athénách nazývala čtvrť hrnčířů *Keramikos* [26], [27].

Stavební keramika je po hrnčířství nejstarší keramickou výrobou. Pálené cihly se začaly používat přibližně v 3. tis. př. n. l. Postupem času se zdokonalovala výroba, zejména v antické

době. V Čechách je první záznam o cihlářské výrobě z 9. století. V 16. století se již běžně používají keramické cihly, krytina, ozdobné dlaždice a v tomto století jsou první zmínky o terakotě. Do 19. stol. se cihly vyráběly ručně a vypalovaly se v mlířích. Zrušení nevolnictví a později zrušení roboty umožnilo lidem stěhovat se podle vlastního uvážení, především do větších sídel. V tomto období rostl počet obyvatel i vzrůstal průmysl, proto vzrostla poptávka po stavebních materiálech a dosavadní ruční výroba přestávala stačit. Tedy v 19. století se poprvé objevují snahy o mechanizaci výroby cihel. Mlíře byly nahrazeny periodickými pecemi, následně kruhovými a poté tunelovými pecemi, které byly patentovány v roce 1879 [27].

### 2.2.3 Suroviny pro cihlářskou výrobu

Cihlářské suroviny se řadí mezi keramické suroviny a dělí se na:

- plastické (tvárnivé), které po rozdělání s vodou tvoří plastické těsto a jsou schopné zpevnění po sušení a výpalu.
- neplastické (netvárnivé) se rozdělují podle funkce na ostřiva, taviva a lehčiva, některé materiály mohou plnit více funkcí zároveň [27], [28].

#### 2.2.3.1 *Plastické suroviny*

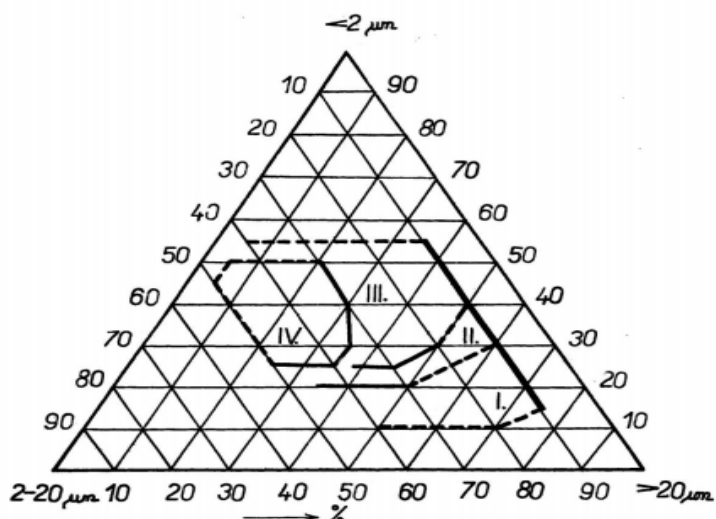
Ložiska plastických surovin vznikla zvětráváním hornin s vysokým obsahem živců, hydrotermálním rozkladem, transportem a uložením produktů rozkladu. Jedná se o jílové zeminy, jejichž vznik a charakter závisí na složení původní horniny a prostředí, velkou roli hraje hodnota pH vody. Cihlářské zeminy jsou všechny, které jsou použitelné pro cihlářskou výrobu. Mezi sebou se mohou lišit svými chemickými i fyzikálními vlastnostmi různou měrou. Zeminy jsou posuzovány podle technologických vlastností, které jsou vhodné pro určitý druh výrobku. Základními vlastnostmi jsou:

- Velikost a distribuce částic
- Obsah škodlivin, stanovuje se chemickým rozbořem (hrubý křemen, vápenaté konkrce, pyrit, velké krystaly sádrovce, obsah organických látek, rozpustné sloučeniny)
- Množství vody potřebné k vytvoření plastického těsta
- Vlastnosti suroviny během sušení (smrštění, průběh smrštění a pevnost po vysušení)
- Vlastnosti vypálené suroviny (pórovitost, smrštění, pevnost po výpalu a popřípadě další speciální požadavky jako je mrazuvzdornost) [28].

Obecné dělení je podle poměrného zastoupení zrn různých rozměrů, podle tohoto kritéria lze rozlišit jíl, hlínu, prach a písek, viz tab. 2. Vymezuje se oblast distribucí částic, která je vhodná pro příslušný druh cihlářského výrobku, tento diagram se nazývá Winklerův potrojný a je znázorněn na obr. 3 [28].

tab. 2: granulometrie jílovitých zemin [28]

jílovina $d < 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	prachovina $d \in (2 ; 50) \cdot 10^{-6} \text{ m}$	pískovina $d \in (0,05 ; 2) \cdot 10^{-3} \text{ m}$
jíl	$\geq 50 \%$ jíloviny	
hlína	$20 \div 50 \%$ jíloviny + $50 \div 80 \%$ prachoviny	
prach	$< 20 \%$ jíloviny + $> 30 \%$ prachoviny	
písek	$< 20 \%$ jíloviny + $> 50 \%$ prachoviny	



Oblast:

- I. suroviny vhodné pouze pro výrobu plných cihel
- II. suroviny pro děrované cihly
- III. suroviny pro výrobu krytiny
- IV. suroviny pro výrobu tvarovek zvětšených rozměrů a stropnic

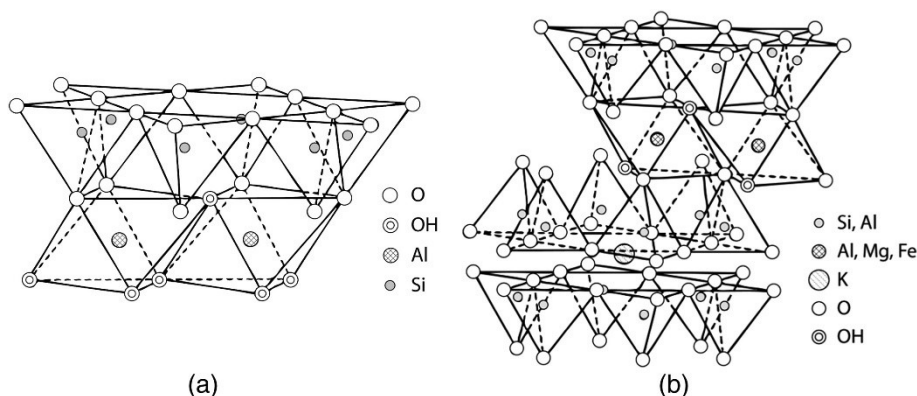
obr. 3: Winklerův diagram (upraveno [28])

V jílových zeminách jsou nejvíce zastoupeny minerály kaolinit, montmorillonit a illit chemické složení je znázorněna v tab. 3. Dalšími nerosty jsou halloysit, vermikulit, chlorit a amorfni nerosty.

tab. 3: chemické složení kaolinitu, montmorillonitu a illitu [28]

vzorec	Chemické složení [hm %]					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	N <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Kaolinit     Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	39,50	46,54	–	–	–	13,96
Montmorillonit     Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O,	20,0– 27,1	47,9– 51,2	1,0– 3,7	2,1– 6,6	0,5– 1,4	17,1– 23,7
Illit     nK <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	21,7– 32,8	50,1– 51,7	0– 0,6	2,0– 4,5	6,2– 7,4	6,4– 7,0

Kolinit, dvojrstevný minerál, je složen z opakujících se vrstev tetraedrů Si–O a Al–O–OH oktaedrů, viz obr. 4 vlevo. Kyslíky jsou v tomto uskupení společné pro tetraedry i oktaedry, tloušťka tohoto dvojrství je 0,7 nm i s mezivrstvím je to 0,715 nm. Jednotlivé základní dvojrstvy jsou vázány Van der Waalsovými vazbami. Struktura montmorillonitu je složena z dvou vrstev tetraedrů Si–O, mezi nimi se nachází vrstva oktaedrů Al–O–OH. Tloušťka trojvrstvy je 0,95 nm, kdežto vzdálenost mezi jednotlivými základními vrstvami je 1,4 nm. Důvodem jsou absorbované ionty ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), které jsou obklopeny vrstvami vody. Základní trojvrstva je chudá na pozitivní náboj, což je kompenzováno kationty absorbovanými na povrchu trojvrstvy. Illit je trojvrstevný minerál, struktura je vyobrazena na obr. 4 vpravo. Má podobnou strukturu montmorillonitu, ale  $\text{Si}^{4+}$  ionty v tetraedrech jsou až do 20 % nahrazeny  $\text{Al}^{3+}$  ionty. Vzniklý deficit je vyvážen ionty  $\text{K}^+$  v mezivrstvě. Díky zastoupení  $\text{K}^+$  iontů, jsou základní trojvrstvy poutány pevněji, vzdálenost mezi jednotlivými základními trojvrstvami je 1,0 nm, a proto illit nebobtná narozdíl od montmorillonitu [26], [27], [29].



obr. 4: struktura kaolinitu (a), struktura illitu (b) [29]

Vedle těchto se vyskytují v cihlářských surovinách také další nerosty, které však nevykazují plastické vlastnosti, jejich výčet je znázorněn v tab. 4: ostatní nerosty v jílových zeminách tab. 4 [27].

tab. 4: ostatní nerosty v jílových zeminách [27]

skupina nerostů	oxidy	živce	slídy	uhličitany	hydroxidy hliníku
název nerostu	křemen, rutil, anatas	ortoklas, albit	muskovit, biotit	kalcit, dolomit, siderit	hydrargillit, diaspor

### 2.2.3.2 Neplastické suroviny

Neplastické suroviny ovlivňují vlastnosti keramických směsí. Běžně je ovlivněna plasticita směsi, smrštění a pevnost během sušení i po výpalu, dále mikrostruktura a objemová hmotnost. Neplastické suroviny je možné rozdělit na ostríva, taviva a lehčiva, přičemž některé používané materiály mohou plnit dvě funkce různou měrou zároveň [26], [28].

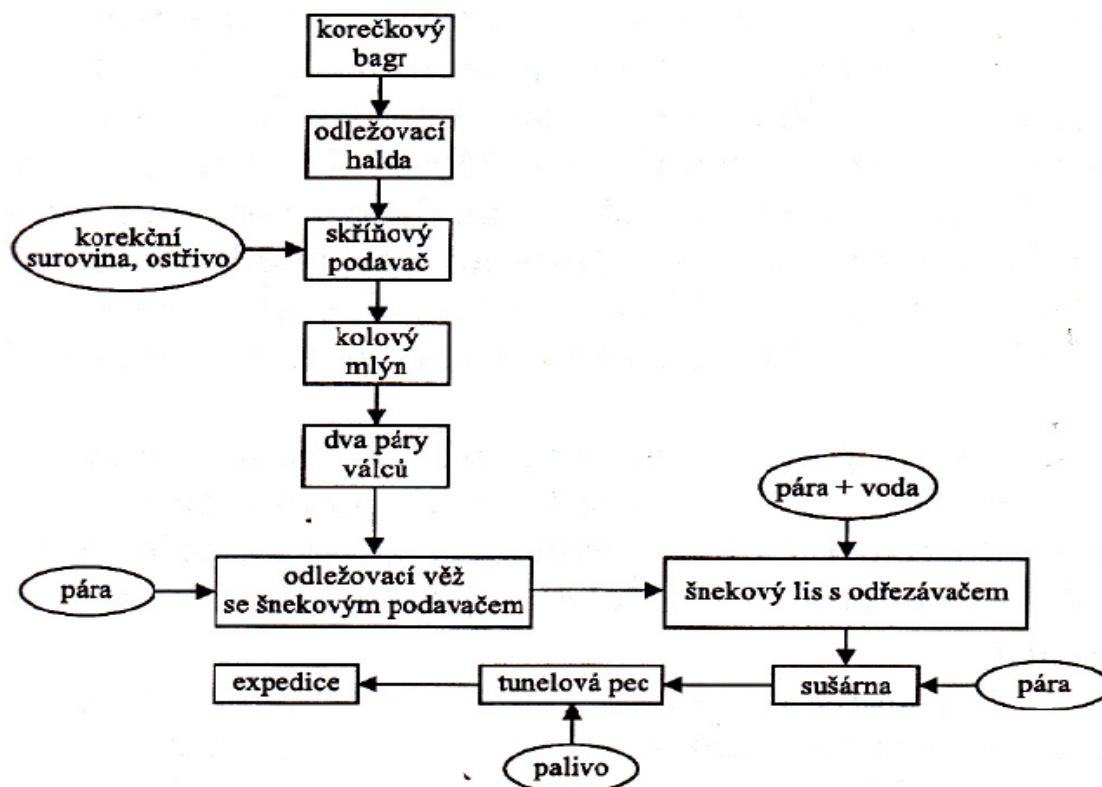
Ostřiva snižují citlivost k sušení při sušení a výpalu. Na druhou stranu však snižují plastičnost cihlářského těsta a zvyšují teplotu výpalu. Ostřiva lze dělit podle chemické povahy na křemičitá, hlnitokřemičitá a zvláštní. Křemičité ostřivo obsahuje většinou více jak 92 %  $\text{SiO}_2$ , jako základní zdroj slouží křemen. Působením tepla vykazuje křemen objemové změny, v důsledku změn modifikací  $\text{SiO}_2$ , generuje se napětí a mohou vznikat trhlinky. Příkladem hlnitokřemičitých ostřiv jsou pálené jíly a lupky (jílovec). Výpalem vzniká a stabilizuje se určité množství mulitu a dalším pálením nedochází k žádným podstatným fyzikálním a chemickým změnám. Mezi zvláštní ostřiva lze řadit korund a odpadní materiály (strusky, škváry či popílky) [26], [28].

Taviva při výpalu tvoří taveninu a snižují teplotu slinutí a tání. Taviva lze dělit na základní a eutektikální. V keramice se nejčastěji používají živce, které lze řadit do základních taviv. Pro tavení je důležitý obsah alkalických oxidů. Příkladem živců je ortoklas ( $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ), albit ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ) a anortit ( $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ), v přírodě se vyskytují jako směsi ortoklas–albit a albit–anortit. Eutektikální taviva obsahují ve vhodné formě oxidy, které s dalšími keramickými surovinami tvoří v žáru taveninu, která má nižší bod tání než jednotlivé složky [26], [28].

Lehčiva slouží ke snížení objemové hmotnosti, dále jejich použití může vést ke snížení tepelné vodivosti keramického střepu. Na druhou stranu mohou snižovat pevnost po výpalu. Podle způsobu vylehčení rozeznáváme lehčiva působící přímo, která mají malou objemovou hmotnost (křemelina či škvára). Druhou skupinou jsou látky, které při výpalu vyhoří, sem patří piliny, sláma, nebo uhelný prach [28].

#### **2.2.4 Výroba cihlářských výrobků**

Technologie výroby výchozí surovinové směsi se liší podle požadovaného typu cihlářského výrobku (např.: děrované, duté, tenkostěnné). Výchozí princip technologie cihlářských je obdobný pro všechny závody, ale konkrétní kroky výroby se mohou lišit. Schéma základního postupu je vyobrazeno na obr. 5. Při výrobě klasických výrobků se nyní používá automatizovaný kontinuální proces výroby. První fáze je příprava suroviny, dalším krokem je tváření, následuje sušení a výpal, posledním krokem je finální opracování, tímto krokem je završena fáze výroby a následuje expedice hotových výrobků.



obr. 5: základní schéma technologie cihlářských výrobků [26][1]

#### 2.2.4.1 Příprava cihlářské směsi

Hlavní surovinou je cihlářská hlína, její podíl z celkového složení materiálu je přibližně 85 %. Těžba probíhá na hliništi pomocí těžebních strojů. Výběr vhodného stroje závisí na způsobu těžby, variabilitě uložení vrstev zeminy či na objemu těžby. Mezi nejvíce používané patří korečková, lžicová nebo kolesová rypadla. Natěžená hlína je poté smíchána s ostřivou a tavivou [28], [30].

Následují zdobňovací a homogenizační procesy. Mletí ovlivňuje celou řadu technologických parametrů. Redukuje náchylnost tvorby textury, snižuje pórovitost a tím zvyšuje pevnosti i mrazuvzdornost. Při mletí se zmenšuje povrch částic, zvyšuje se potřeba rozdělovací vody. Tato linka se sestává z několika typů strojů, např.: drtiče, mlýny, třídiče, podavače, mísidla apod. Skladba linky se v jednotlivých závodech liší dle typu produkovaného cihlářského výrobku a podle dostupných surovin. Při drcení používají kladivové drtiče. Následuje mletí, nejvíce používané mlýny jsou válcové a kolové mlýny. Míšení hrubé keramiky probíhá nejčastěji ve dvouhřídelovém míchadle [27], [28], [30].

Pomletá surovinová směs putuje do odležovacích boxů. Probíhá navlhčení a působením vody dochází k nabobtnání jílovitých minerálů. Zároveň boxy fungují jako zásobárna suroviny. Z odležovacích boxů surovina putuje do vyrovnávacího podavače, kde se přidá potřebné množství vody a probíhá mokré mletí směsi. Dále surovina putuje do propařovacího mísidla, kde se přidá mokrá pára. Mokrá pára zlepšuje homogenizaci i zpracovatelnost [27], [30].

#### **2.2.4.2 Tváření cihlářských výrobků**

Procesem tváření vzniká výrobek o předepsaných rozměrech. Nejčastěji se používá lisování pomocí šnekového lisu. Do mísiče se dopraví navlhčená směs, zde dochází k případnému přidavku vody či ostatních přísad, a nastává finální homogenizace. Tato směs je protlačena přes děrovanou desku do vakuové komory. Vznikající nudličky jsou potrhány, aby měly větší povrch, což zintenzivní únik vzduchu. Vzduch snižuje soudržnost částic, tedy se zvýší výsledná pevnost i mrazuvzdornost. Přes šnekovou komoru a koncový šnek se materiál dostane do ústí. Tvar ústí se promítá do konečné podoby cihlářského výrobku, tedy podoba cihly je dána tloušťkou a počtem otvoru v ústí. Ze šnekového lisu vychází tvarovaný polotovár, který je řezán na požadovanou výšku strunou [28], [30]. Vytvarovaný výrobek je zobrazen na obr. 6.



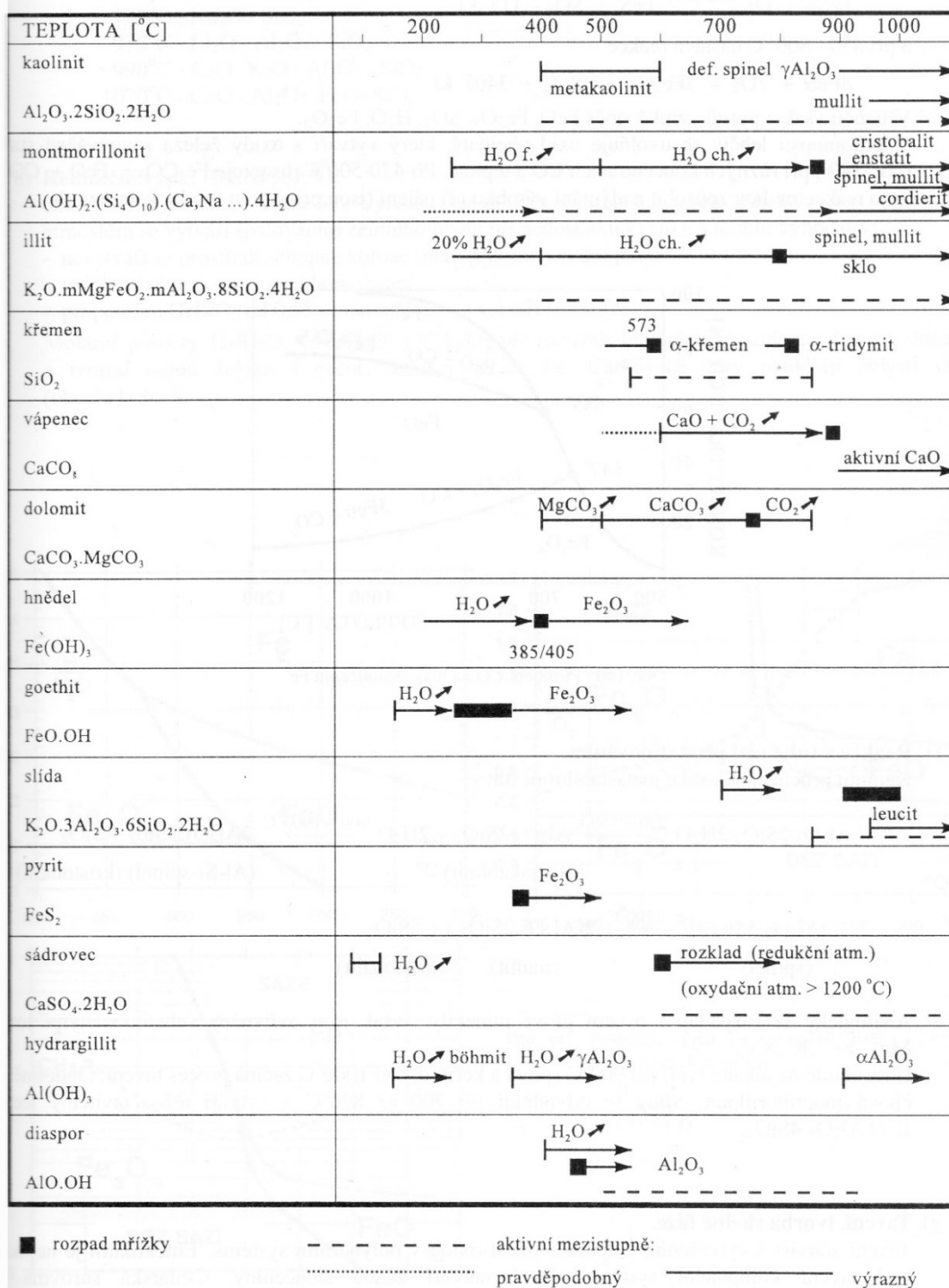
obr. 6: zleva vytvarovaný, vysušený a vypálený cihlářský výrobek[31]

#### **2.2.4.3 Sušení cihlářských výrobků**

Sušení je technologický proces, při kterém dochází působením tepla ke snížení vlhkosti pod mez určenou podmínkami výpalu. Sušící teplota je taková, aby příliš rychlý únik par nezpůsobil poškození výlisku. Vysušením ztrácí výlisek plastické schopnosti a nabývá počáteční pevnosti. Při sušení dochází ke smrštění, protože odchází molekuly vody a částice plastických surovin mají tendenci ke shlukování. Při výrobě hrubé keramiky se používá kontinuální sušení, hlavním představitelem jsou kanálové sušárny. Na obr. 6 uprostřed je znázorněn výrobek po sušení [27], [28].

#### **2.2.4.4 Výpal cihlářských výrobků**

Výpal je technologické označení a značí tepelné zpracování materiálu za účelem vytvoření cihlářského výrobku, který bude mít požadovanou pevnost. Slinování je odpovídající proces, ke kterému dochází v materiálu, konkrétněji se jedná o fyzikálně chemické procesy v keramickém střepu, které vedou ke zpevnění látky [27], [32]. Mineralogické pochody v cihlářském střepu jsou uvedeny na obr. 7.

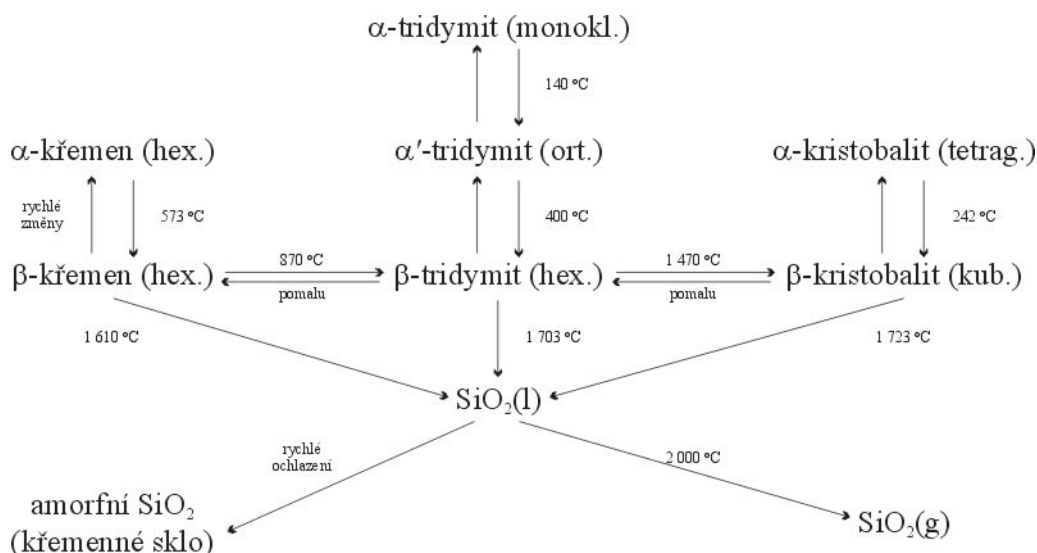


obr. 7: mineralogie výpalu cihlářských zemín [28]

Výsušek obsahuje vodu v podobě adsorbované na povrchu částic, krystalickou i strukturně vázanou. Adsorbovaná voda se odpařuje v teplotním rozmezí 80–120 °C. Voda, která je vázána krystalicky, se uvolňuje při teplotách 60–250 °C. Odchod strukturně (chemicky) vázané vody je závislý na typu daného minerálu, pohybuje se v rozmezí 600–800 °C [27],[28].

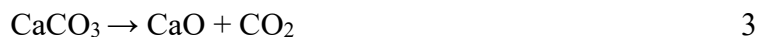
Oxidace organických látek je důležitá při použití lehčiv organického původu (piliny, sláma). Spalování těchto látek nastává v přítomnosti kyslíku přibližně od 350 °C [28], [31].

Změna modifikace má největší význam u křemene, neboť souvisí s objemovými změnami, viz obr. 8. Dalším příkladem jsou přechody diasporu, böhmitu či gibbsitu až na korund [28].

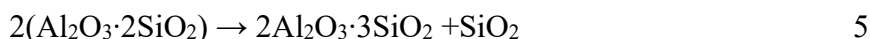
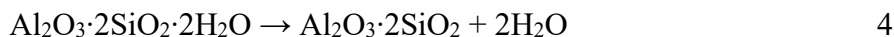


obr. 8: krystalové modifikace  $\text{SiO}_2$  [33]

Termická disociace je typická pro uhličitany. Rozklad vápence probíhá podle reakce 3, teplota je závislá na tlaku, disociace začíná v teplotním intervalu 500–600 °C, nejvíce  $\text{CO}_2$  je uvolněno v rozmezí 700–900 °C. Dolomit se začíná rozkládat při teplotě 400 °C [28].



Jílové minerály prochází několika metastabilními stavy. Příkladem je kaolinit, viz reakce 4, který je dehydratován na metakaolin, při vyšších teplotách (900–1000 °C) se tvoří Al–Si spinel a cristobalit, viz reakce 5. Analogicky probíhají reakce v ostatních minerálech, ty jsou však ovlivněny substituovanými ionty ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) [27], [28].



Při spalování zemního plynu za nedostatku kyslíku se vytváří redukční atmosféra. Pokud je molární poměr  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  vyšší než 0,55, z oxidů Fe se tvoří  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , který černě zabarvuje stěp, ale nevznikají saze. Redukční výpal je výhodný, neboť se nevytváří prostředí schopné koroze (není přítomna vodní pára) [28].

Vlivem vyšší teploty dochází ke spojování částic a materiál se zpevňuje. Tento proces se nazývá slinování a může probíhat v systému bez přítomnosti taveniny, nebo v přítomnosti kapalné fáze. Tavenina se při výpalu cihlářských výrobků téměř neobjevuje, neboť se pálí na teplotu přibližně

900 °C. Zpevnění nastává reakcemi v tuhé fázi, reakce startují přibližně od 700 °C, kdy CaO nebo MgO reagují s jílovými minerály. Velký vliv na pórovitost má rozpad vápence. Pórovitost vytvořená reakcemi v tuhé fázi je otevřená [27],[28]].

Cihlářský výrobek setrvává v peci přibližně 24 hod, neboť je nutné zabezpečit dostatečně pomalé ochlazení, aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí. Po výpalu se změnila barva na „cihlovou“, viz obr. 6. obr. 3 V současné době se při výpalu používají kontinuální tunelové pece [27], [30].

#### 2.2.4.5 Broušení cihlářských výrobků

Dříve se při spojování cihel používala malta, jejíž množství bylo takové, že překryla cihlu a zakryla poměrně hrubý povrch. V dnešní době se používá lepidlo na spojování, používá se tenká souvislá vrstva, z tohoto důvodu je potřeba hladký povrch cihlářského výrobku. Po výpalu je povrch cihel poměrně hrbolatý a navíc je výška ve středu nižší než na krajích. Proto byl zařazen poslední krok před expedicí a to broušení. K tomuto účelu se používá bruska, viz obr. 9. Například při výrobě cihlářského výrobku HELUZ PLUS 40 se obrušují 2 mm na obou stranách, při produkci 650 palet cihel denně se jedná přibližně o 18,5 m<sup>3</sup> cihelného obrusu denně, za rok to činí asi 16 kt odpadního materiálu [30], [31].



obr. 9: bruska povrchu cihel používaná ve firmě HELUZ [31]

## 2.3 Využití cihelného recyklátu, současný stav a návrhy do budoucna

Produkce cihelného recyklátu jako odpadního materiálu z výroby cihel narostla v minulých letech z důvodu výše zmíněné technologie zdění. Odpady na bázi cihlářských výrobků jsou ve velkém produkovány ve stavebnictví, největší částí jsou demoliční odpady, menší tvoří opracování cihel k finálnímu použití nebo rozbité kusy. V současnosti se cihelný recyklát používá spolu s dalšími demoličními odpady na zásypy a úpravu terénu.

### 2.3.1 Produkce odpadů ve stavebnictví

V České republice je schválen plán odpadového hospodářství do roku 2024. V něm se v oblasti stavebních a demoličních odpadů navrhuje strategie na snížení produkce odpadů. Je snaha podpořit co nejvíce bezodpadové hospodaření. Je patrné, že problém odpadů, konkrétně cihelného obrusu i recyklátu, je v České republice znám. Zároveň předcházení vzniku odpadů je v oblasti stavebnictví velmi složitý problém, zajímavé však jsou možnosti recyklace i jiné možnosti materiálového zhodnocení [4].

### 2.3.2 Antuka

Antuka je drť, která vzniká z pálených cihlářských výrobků – cihel či střešních tašek. Vyrábí se rozdrčením surovin a následně mletím na požadované granulometrie (0–2 mm a 2–5 mm). Antuka obsahující velikost částic v rozmezí 0–2 mm se nazývá jemnou, přičemž se občas vymezuje podkategorie, které se liší obsahem podílu, který je menší jak 0,05 mm. Tato antuka se používá jako povrch sportovišť (tenis, volejbal či nohejbal). Antuka se používá na tyto venkovní sportoviště z důvodu dobré propustnosti vody a kurty pokryté antukou jsou pružné. Výraz antuka je fonetická výslovnost francouzského spojení *en tout co*, které znamená *v každém případě*, což odkazuje na skutečnost, že je možné použít hřiště v každém počasí. Dále se vymezuje velikost částic v rozmezí 2–5 mm, tato antuka se používá jako dekorativní vysypávání cest nebo jako substrát pro rostliny [34], [35].

### 2.3.3 Cihelný recyklát jako kamenivo

Na odpad z cihlářských výrobků lze pohlížet jako na kamenivo, které lze získat drcením cihlářských výrobků z demoličního odpadu. Hlavní myšlenkou je využití demoličního odpadu. Demoliční odpad tvoří asi polovinu veškerého odpadu. V současné době převážně skládkován, přičemž cihelný recyklát tvoří po betonu druhou největší část. Dalším přínosem je možnost omezení těžby přírodního kameniva, které vedle ekologických problémů obnáší i ztrátu zemědělské půdy, hluk či možnosti eroze. Použití tohoto kameniva nezlepšuje vlastnosti výsledného betonu. Proto by mělo být použití cihelného recyklátu omezeno v betonu na nejnižší úroveň a uplatnění by mělo být v nekonstrukčních aplikacích. Důvodem zhoršených vlastností je velká porozita cihelného kameniva, která vede ke zvýšení potřeby záměsové vody, což vede ke snížení pevností [2], [36], [37], [38], [39].

### 2.3.4 Cihelný recyklát jako náhradu cementu

Odlišným přístupem je použití jako částečná náhrada cementu, kdy je použit ve formě cihelného obrusu (prachu), který se získává drcením a následným mletím. Bylo prokázáno, že pevnost betonu může být zvýšena částečným nahrazením cementu cihelným obrusem. Optimální přídavek je 10–20 %, aby bylo dosaženo obdobných, nebo vyšších pevností v tlaku [2], [40], [41], [42].

S vyšším přídavkem cihelného obrusu než optimálním byl prokázán pokles pevností. Tento trend je přičítán zředovacímu efektu, kdy je materiál o dobrých pojivových vlastnostech nahrazen pojivem o nižších pojivových vlastnostech. Dalším pohledem na věc je fakt, že při nižším obsahu portlandského slínku se neuvolní dostatečné množství  $\text{Ca(OH)}_2$ , které je potřebné pro pucolánovou reakci [2].

Nicméně v literatuře jsou popsány i případy, kdy přídavek cihelného obrusu vede vždy ke snížení pevností v tlaku. Jedním z možných vysvětlení je již zmíněná vysoká porozita cihlářského střeptu, a s tím související potřeba na vyšší obsah záměsové vody, což ve výsledku vede ke snížení pevností. Dalším důvodem může být nízký obsah amorfni fáze v cihelném obrusu [43], [44].

Pravděpodobným důvodem dosažení vyšších pevností v tlaku je pucolánová aktivita cihelného obrusu, která byla prokázána na různých typech cihelných prachů z různých zemí (Polsko, Litva, Dánsko a Británie) [2], [45], [46]. Dalším důvodem je, že zakomponováním cihelného obrusu se následně vytvoří hustší mikrostruktury [47]. Vnesením částice pucolánu do systému se dosahuje zvýšení pevností a odolnosti systému. Přínos částice pucolánu v pojivovém systému lze rozdělit na fyzikální benefit neboli „filler effect“ a na chemický neboli na pucolánovou aktivitu. V praxi se uplatňují oba tyto efekty a je velmi obtížné rozlišit, jakou měrou se podílejí na výsledných vlastnostech systému [48].

### 2.3.5 Chemické složení cihelného obrusu

Chemické složení cihel, potažmo cihelných obrusů se poměrně liší mezi sebou. Důvod je zmíněn výše, neboť požadavky na cihlářskou surovinu jsou spíše technické: potřeba záměsové vody, chování při sušení a výpalu či mechanické vlastnosti výsledného střeptu. Chemický rozbor je důležitý pro stanovení škodlivin. Z těchto důvodů se chemické složení cihel liší podle lokality těžby, popřípadě podle dalších korigujících přísad v cihlářské směsi.

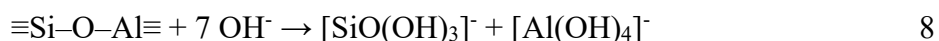
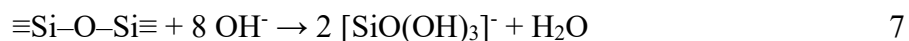
Jemně mletý cihelný prach může být považován za pucolánově aktivní materiál, pokud je minimální obsah oxidů  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  vyšší jak 70 % [41]. Nicméně kaolinit má v porovnání s illitem i montmorillonitem vyšší pucolánovou aktivitu. Pravděpodobným důvodem je vyšší obsah hydroxylových skupin a jejich rozmístění v krystalové struktuře. Což během dehydroxylace vede k méně uspořádané struktuře a obnažení Al-skupin. Illit a montmorillonit mají tendenci si zachovávat svoji strukturu vrstev i po dehydroxylaci. Tedy Al-skupiny jsou uvězněny mezi Si-tetraedry a mají menší možnost reakce [49].

### 2.3.5.1 Pucolánová aktivita

Pucolány jsou silikáty a aluminosilikáty, které sami nemají pojivové vlastnosti. Nicméně v přítomnosti hydroxidu vápenatého a vody jsou schopny za normální teploty reagovat na sloučeniny, které tuhnou i tvrdnou a jsou stále ve vodě i na vzduchu [43], [50].

Pucolány lze dělit na přírodní a technologické. Přírodní pucolány byly používány již v románských stavbách a jednalo se o sopečné produkty (tufy a pemzy). Dalšími příklady mohou být jemně mletý čedič, břidlice, chalcedony nebo opály. Technologické pucolány obvykle potřebují ke svému vzniku vhodné teplotní podmínky. Příkladem jsou popílky z vysokoteplotního či fluidního spalování, mikrosilika nebo vypálené jíly (metakaolin). Pucolánová aktivita lze určit na základě reakce domnělého pucolánu s hydroxidem vápenatým. Dalším způsobem je náhrada za cement a sledování mechanických vlastností výsledných malt. Popřípadě lze využít izotermický kalorimetr při měření tepla exotermické hydratační reakce nebo určení obsahu „vázané vody“ v rozsahu 110–400 °C v peci [43], [50], [51].

Při samotné reakci se disociuje hydroxid vápenatý ve vodném prostředí dle rovnice 6. Zvýšená koncentrace OH<sup>-</sup> iontů způsobuje rozpad vazeb silikátů a aluminosilikátů podle rovnic 7 a 8.

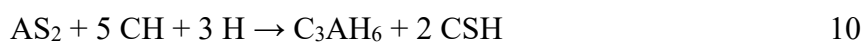
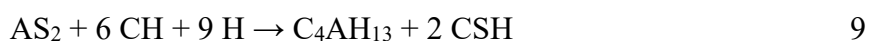


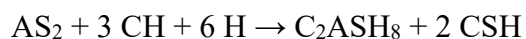
Vzniklé ionty v přítomnosti Ca<sup>2+</sup> tvoří hydratované křemičitany C–S–H typu, kalcium aluminát (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>), hydratovaný gehlenit (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>) a C<sub>3</sub>A·CaCO<sub>3</sub>·12H<sub>2</sub>O. Silikáty se rozpouštějí rychleji než alumináty a vyšší koncentrace Ca<sup>2+</sup> je potřeba na tvorbu kalcium aluminátů [43].

### 2.3.5.2 Pucolánová aktivita cihelného obrusu

Během výpalu na teplotu 600–900 °C se krystalová mřížka jílových minerálů zhroutí za tvorby metastabilní amorfní fáze, které se mohou účastnit pucolánové reakce. Dále vypálený cihlářský střep může obsahovat suroviny, které nejsou výpalem změněny (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, muskovit nebo anatas). Při výpalu vyšším jak 900 °C se amorfní fáze uspořádá do nových sloučenin (mulit, cristobalit, tridimit), které ztrácí pucolánovou aktivitu.[43].

Pokud výchozí surovina obsahuje především kaolinit, je během výpalu transformován na metakaolinit (AS<sub>2</sub>). Ve vodním prostředí a v přítomnosti hydroxidu vápenatého může metakaolinit reagovat podle následujících rovnic 9, 10, 11.





11

Metastabilní produkty  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  a  $\text{C}_3\text{AH}_6$  se mohou transformovat na stabilní hydrogranát  $\text{C}_3\text{AS}_2\text{H}_{6-2Z}$ . Což vede k redukci objemu, tedy snížení pevnosti výsledné malty.

### 2.3.5.3 „*Filler effect*“

Objasnění „*filler effectu*“, tedy proč i částice které nereagují v prostředí tuhnoucí cementové pasty, je spíše fyzikální podstaty. Jedním z vysvětlení „*filler effectu*“ je, že zakomponováním menších částic do betonu či malty se vhodně uspořádají částice a dojde k vhodnému vyplnění prostorů v pojivu. Díky tomu se zvýší hustota i pevnosti v tlaku. Další mechanismus souvisí se zřed'ovacím mechanismem, tedy při náhradě slinku jiným materiálem je v systému relativně více místa pro růst hydratačních produktů. Třetí navrhovaný mechanismus spočívá v tom, že do systému jsou vneseny potenciální zárodky pro nukleaci C–S–H gelu. Jelikož dochází k nukleaci na povrchu částice plniva, tvar částice a její povrch, potažmo její velikost, ovlivňuje výsledné vlastnosti pojiva [48], [52].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části jsou uvedeny nástroje pro analýzu vstupních surovin. Dále je popsána příprava alternativních cementů a zkušebních těles z nich. Následně jsou uvedeny nástroje na pro jejich analýzu.

#### 3.1 Měření velikosti částic

Velikost částic surovin byla změřena laserovou difrakcí. Principem je vyhodnocení difrakčního obrazce, který vznikl interakcí paprsku a zkoumaných částic. Velké částice rozptylují paprsek do relativně malých úhlů, naproti tomu malé částice rozptylují do velkých úhlů. Difrakční obrazec může být popsán matematicky pomocí teorií Fraunhofera nebo Mii. Analýza byla provedena pomocí přístroje SYMAPATEC HELOS KR a vyhodnocení pomocí programu WINDOX 5 [53], [54].

#### 3.2 Rentgenová difrakční analýza

Pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD) lze studovat strukturu sloučenin. Principem je sledování difrakce záření na mřížce krystalového materiálu. Difrakci je možné si představit jako interferenci rentgenových vln po ohybu primárního záření. Difrakce vzniká, pokud je splněn Bragova difrakční podmínka:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \sin \theta \quad 12$$

Kde  $n$  je celé číslo,  $\lambda$  značí vlnovou délku,  $d$  vzdálenost mezi rovinami a  $\theta$  úhel, pod kterým dopadají paprsky rentgenového záření na strukturní rovinu. K difrakci tedy dochází pouze, když záření dopadá pod daným úhlem a zároveň vzdálenost mezi rovinami se rovná celému násobku vlnové délky rentgenového záření. Při měření získáme charakteristické hodnoty  $d$ , které jsou charakteristické pro dané fáze a porovnáním se standardem, lze získat kvalitativní informaci. Zároveň může být měřen podíl amorfní fáze, která se projevuje jako šum na difrakčním obrazi [55].

Rozlišují se dvě XRD metody monokrystalová a prášková. Díky difrakci na monokrystalu lze určit strukturu monokrystalu. Naproti tomu prášková difrakce slouží k především k detekci krystalických sloučenin. Porovnáním se známou databází lze určit látku a díky velkému množství dat z částíček prášku lze určit i množství látky[55].

Rentgenová difrakční analýza byla provedena na přístroji Empyrean od firmy Panalytical. Ke vzorku cihelného obrusu bylo přidáno známé množství fluoritu vápenatého, aby byl zjištěn obsah amorfního podílu.

### 3.3 Stanovení pucolánové aktivity

Pro stanovení pucolánové aktivity (P. A.) byl použit modifikovaný Chapellův test. Pucolánová aktivita se v tomto testu stanoví jako množství  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , které se spotřebuje na reakci s pucolánem [43], [51].

Nejprve byl připraven  $\text{CaO}$  vypálením z  $\text{CaCO}_3$  na teplotu  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , poté byl ochlazen na  $200\text{ }^\circ\text{C}$  v peci, následně v exikátoru na laboratorní teplotu. Do plastové Erlenmeyerovy baňky bylo naváženo  $0,8\text{ g}$   $\text{CaO}$  a bylo přidáno  $0,4\text{ g}$  cihelného obrusu, hmotnosti byly odečteny na čtyři desetinná čísla. Poté bylo přidáno  $100\text{ ml}$  převařené vody. Erlenmeyerovy baňky byly uzavřeny a vloženy do nádrže s vodou, viz aparatura na obr. 10. Voda v nádrži byla temperovaná na  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Nádrž byla umístěna na třepačku a byla míchána  $16\text{ hod}$ , při konstantní teplotě  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Po uplynutí času na pucolánovou reakci, byly Erlenmeyerovy baňky ochlazeny na laboratorní teplotu.

Stanovení obsahu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bylo provedeno sacharátovou metodou, viz 3.4. Do Erlenmeyerovy baňky bylo přidáno  $24\text{ g}$  sacharózy a suspenze byla protřepána  $15\text{ min}$ . Obsah baňky byl zfiltrován na Büchnerově nálevce. Z filtrátu bylo odebráno  $20\text{ ml}$  do titrační baňky a byla provedena titrace odměrným roztokem  $\text{HCl}$  ( $c = 0,1\text{ mol/l}$ ) na fenolftalein. Stejným způsobem byl proveden blank, který neobsahoval cihelný obrus.

Pucolánová aktivita byla vypočítána jako spotřeba  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v  $\text{mg}$  na  $1\text{ g}$  pucolánu, podle následující rovnice. Byl proveden přepočítání navážky  $\text{CaO}$  na  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , neboť bylo pracováno ve vodním prostředí. Byla vypočítána P. A. jako rozdíl původní navážky  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a množství  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , které nebylo zreagováno, což bylo zjištěno titrací. Dále byla zjištěna spotřeba  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , jež byla spotřebována mimo pucolánovou reakci (reakce se vzdušným  $\text{CO}_2$ ) za daných podmínek, neboli spotřeba na blank. Tato spotřeba bylo opět vztažena na původní navážku, aby byla dosažena absolutní hodnota, která může být odečtena.

$$P. A. = \left( \frac{\left( \frac{m_{1\text{CaO}} \cdot Mr_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{Mr_{\text{CaO}}} - \left( \frac{1}{2} \cdot Mr_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \cdot c_{\text{HCl}} \cdot V_{1\text{HCl}} \cdot f_{zř} \right) \right) - \left( \frac{m_{\text{BlankCaO}} \cdot Mr_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{Mr_{\text{CaO}}} - \left( \frac{1}{2} \cdot Mr_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \cdot c_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{BlankHCl}} \cdot f_{zř} \right) \right)}{m_{1\text{pucolán}}} \right) \cdot 1000$$

[mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g pucolán]

13

$m_{1\text{CaO}}$  – hmotnost navážky  $\text{CaO}$  do vzorku 1,  $Mr_{\text{CaO}}$  – molární hmotnost  $\text{CaO}$ ,  $Mr_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$  – molární hmotnost  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $c_{\text{HCl}}$  – koncentrace odměrného roztoku  $\text{HCl}$ ,  $V_{1\text{HCl}}$  – spotřeba  $\text{HCl}$  na titraci vzorku 1,  $f_{zř}$  – faktor zředění,  $m_{\text{BlankCaO}}$  – hmotnost navážky  $\text{CaO}$  blanku,  $V_{\text{BlankHCl}}$  – spotřeba  $\text{HCl}$  na titraci blanku,  $m_{1\text{pucolán}}$  – navážka pucolánu pro vzorek 1.



obr. 10: aparatura pro stanovení pycolánové aktivity

### 3.4 Stanovení volného vápna

Sacharátovou metodou bylo stanoveno volné vápno ve fluidním ložovém slinku. Principem je reakce volného vápna se sacharózou. Vzniklý rozpustný produkt je titrován odměrným roztokem kyseliny chlorovodíkové na fenolftalein [56].

Nejprve byl připraven odměrný roztok kyseliny chlorovodíkové o koncentraci 0,1 mol/l. Tento roztok byl standardizován pomocí vysušeného  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  na methyloranž. Poté bylo naváženo přibližně 0,7 g popílku s přesností na 1 mg. Popílek, 10 g sacharózy a 50 ml převařené destilované vody bylo umístěno do Erlenmayerovy baňky. Baňka byla míchána na automatické třepačce 15 min. Suspenze byla přefiltrována na Büchnerově nálevce a filtrát byl kvantitativně převeden do titrační baňky. Titrace byla provedena odměrným roztokem HCl na fenolftalein. Obsah volného vápna byl vypočítán jako hmotnostní podíl podle rovnice 14. Volné vápno bylo změřeno na fluidním ložovém popílku, stanovení bylo pětkrát opakováno.

$$w(\text{CaO}) = \frac{\frac{1}{2}c_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}} \cdot Mr_{\text{CaO}}}{m_{\text{popílek}}} \cdot 100 [\%] \quad 14$$

$c_{\text{HCl}}$  – koncentrace odměrného roztoku HCl,  $V_{\text{HCl}}$  – spotřeba odměrného roztoku HCl,  $Mr_{\text{CaO}}$  – molekulová hmotnost CaO,  $m_{\text{popílek}}$  – hmotnost navážky popíku

### 3.5 Příprava cementů a zkušebních těles

Veškeré sypké suroviny na přípravu alternativního cementu na jednu směs (500 g) byly semlety v kulovém laboratorním mlýně po dobu 30 min. Tímto způsobem byla zajištěna homogenita a zároveň byly částice mechanicky aktivovány.

Zkušební tělesa byla připravena v laboratorním mixéru smíšením vytvořeného alternativního cementu a destilované vody. S měnícím se zastoupením složek v cementu, byl změněn i vodní součinitel. Cihelný obrus je porézní a s jeho přidáním je nutné zvýšit množství záměsové vody, aby výsledná pasta měla stejnou konzistenci. Tato skutečnost byla pro každou pastu i maltu ověřena na setřásacím stolku. Čas smíšení vody a cementu byl brán jako počátek, byly nastaveny nízké otáčky míchání, po 30 s byl v případě malt přidán písek, po 60 s byla zvýšena rychlost otáček. Po 90 s bylo míchání zastaveno a stěrkou byly setřeny stěny nádoby. V čase 180 s bylo opět zapnuto míchání, míchání bylo na vyšší otáčky, celkový čas míchání byl 240 s.

Na připravených pastách i maltách byla nejdříve ověřena konzistence na setřásacím stole. Bylo provedeno 15 úderů a následně byl změřen rozliv. Připravenou směsí byly naplněny formy, následně byly zhutněny na vibračním stole po 15 s. Naplněné formy byly umístěny ve vlhké atmosféře. Po 24 hod bylo provedeno odformování. Zkušební tělesa byla ponechána ve zračí komoře při teplotě 20 °C a vlhkosti 90–100 %. Pro pasty byly použity formy 20×20×100 mm, pro malty, měření délkové roztažnosti a objemové hmotnosti byly použity formy 40×40×160 mm.

### 3.6 Měření počátku a konce tuhnutí

Pro měření počátku a konce tuhnutí byl použit automatický Vicat. Principem je vlačování zkušební jehly do připravené pasty konstantní silou. Tedy když směs začne tuhnout, jehle je kladen větší odpor a není dovoleno protlačit na dno pasty. Na opačném konci od hrotu jehly je záznamové zařízení, které zaznamená polohu jehly po vpichu. Zpočátku, když se jehla dostane na dno je na záznamovém archu vidět vodorovná linie značek, při počátku tuhnutí a jeho průběhu hrot jehly pronikne do nižší hloubky pasty, tedy každá značka je výše než předcházející. Konec tuhnutí je opět zaznamenán vodorovnou linií, neboť v určitém bodu, už jehla není schopna proniknout do zatvrdlého tělesa. Automatický Vicat vidět na obr. 11: automatický Vicat obr. 11 a záznam vyhodnocení je uveden na obr. 37 v příloze. Frekvence vpichů byla 1 vpich za 10 min.



obr. 11: automatický Vicat (vyroben 1979)

### 3.7 Izotermická kalorimetrie

Izotermická kalorimetrie je metoda, pomocí níž lze měřit tepelné pochody ve vzorku. Měření probíhá při konstantní teplotě vzorku i termostatu. Měří se nepřímo tepelný příkon potřebný na vyrovnání tepelného gradientu vzorku, respektive bloku.

Byl použit izotermický osmikanálový mikrokolorimetr TAM Air od firmy TA instruments. Bylo měřeno při 20 °C za použití dvouampulového uspořádání, aby byly potlačeny okolní vlivy.

### 3.8 Hydraulický lis pro měření pevností v tlaku

Na zkušebních tělesech byly měřeny pevnosti v tlaku a ohybu. K tomuto účelu bylo použito zkušební pracoviště DESTTEST 3310. Pracoviště se skládá z lisů pro zkoušky pevností v tlaku (BS-300) i pro měření pro měření pevnosti v trojbodém ohybu (BS-10). Měření probíhalo na zkušebních tělesech o velikosti 20×20×100 mm a 40×40×160 mm. Minimální lisovací síla pro lis BS-10 je 0,2 kN a pro lis BS-300 je 6 kN [57],[58].

### 3.9 Měření objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla měřena na zatvrdlých pastách či maltách. V daných časových intervalech byla měřena hmotnost zkušebního tělesa, hmotnost byla vztažena k objemu zkušebního tělesa (40×40×160 mm). Rovnice na výpočet objemové hmotnosti je uveden jako rovnice 15.

$$\rho = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}] \quad 15$$

*m* – hmotnost tělesa, *V* – objem tělesa

### 3.10 Měření objemových změn

Objemové změny byly měřeny na zkušebních tělesech o velikosti 40×40×160 mm. Tělesa obsahovaly kontakty, které sloužily na upevnění do měřicího zařízení. Po odformování byla naměřena hodnota ve dni 1, která sloužila jako reference. Poté bylo v daných časových intervalech změřeno těleso i etalon. Objemová změna byla vypočítána podle následující rovnice 16.

$$\delta l = \frac{(l_1 - et_1) - (l_x - et_x)}{160} \cdot 1000 [\text{mm/m}] \quad 16$$

*l*<sub>1</sub> – délka zkušebního tělesa první den, *et*<sub>1</sub> – délka etalonu první den, *l*<sub>*x*</sub> – délka zkušebního tělesa v *x*-tém dni, *et*<sub>*x*</sub> – délka etalonu *x*-tém dni

## 4 CHARAKTERIZACE POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

V této části jsou popsány použité materiály, jedná se o: portlandský slínek, cihelný obrus a fluidní ložový popílek.

### 4.1.1 Portlandský slínek

Namletý p-slínek měl měrný povrch  $280 \text{ m}^2/\text{kg}$  (dále označen jako S2) a jemněji namletý slínek měl měrný povrch  $400 \text{ m}^2/\text{kg}$  (dále označen jako S1).

Pomocí laserové difrakce byly změřeny velikosti částic, výsledky jsou uvedeny na tab. 7. Slínek s větším měrným povrchem obsahuje menší částice. Rozdělení distribuce částic je uvedeno v příloze na obr. 38 a obr. 39.

tab. 5: velikosti částic portlandského slínku

	$D_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$D_{90}$ [ $\mu\text{m}$ ]	modus [ $\mu\text{m}$ ]
S 1	3,19	11,55	9,96
S 2	4,61	13,04	11,16

Bylo zjištěno mineralogické složení slínku, viz tab. 6. Zastoupení jednotlivých složek je obvyklé pro portlandský slínek.

tab. 6: mineralogické složení slínku

	$\text{C}_4\text{AF}$ [%]	$\text{CaO}$ [%]	$\text{C}_3\text{S}$ [%]	$\beta\text{-C}_2\text{S}$ [%]	$\text{C}_3\text{A}$ kub. [%]	$\text{C}_3\text{A}$ ort. [%]
slínek [%]	9,1	0,3	77,7	9,7	1,5	1,6

### 4.1.2 Cihelný obrus

Cihelný obrus byl vyroben na začátku roku 2017 v závodu na výrobu cihel v České republice, byl namlet na měrný povrch  $850 \text{ m}^2/\text{kg}$  (dále označen jako O1) a na měrný povrch  $730 \text{ m}^2/\text{kg}$  (dále označen jako O2).

Pomocí laserové difrakce byly změřeny velikosti částic, výsledky jsou uvedeny na tab. 7. Cihelný obrus s větším měrným povrchem obsahuje menší částice. Rozdělení distribuce částic je uvedeno v příloze na obr. 40 a obr. 41.

tab. 7: velikosti částic cihelného obrusu

	$D_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$D_{90}$ [ $\mu\text{m}$ ]	modus [ $\mu\text{m}$ ]
O 1	2,17	8,11	2,59
O 2	2,55	9,94	2,59

Byla provedena rentgenová difrakční analýza, vyhodnocení bylo provedeno Rietveldovou metodou. Ke vzorku cihelného obrusu byl přidán fluorit vápenatý, aby mohl být zjištěn obsah

amorfního podílu. V tab. 8 je zaznamenáno mineralogické složení cihelného střepu. Ve vzorku se nachází přibližně čtvrtina amorfni fáze, což je první předpoklad pro možnost pucolánové aktivity. Dále se nachází poměrně velké množství křemene. Další větší skupinou jsou živce (albit, ortoklas), pro jejichž rozklad nebyla při výpalu cihel dostatečně vysoká teplota.

tab. 8: mineralogické složení cihelného obrusu

	amorfni fáze [%]	křemen [%]	hematit [%]	albit [%]	ortoklas [%]	augit [%]	akermanit [%]	muskovit [%]
cihelný obrus	26,7	30,5	1,4	16,6	2,5	8,6	4,8	8,8

Pucolánová aktivita byla stanovena pomocí modifikovaného Chapelle testu, příklad výpočtu je uveden jako rovnice 17. Pro každý vzorek byl test opakován dvakrát a titrace každého vzorky byla rovněž provedena dvakrát.

$$P. A. = \left( \frac{\left( \frac{m_{CaO}}{Mr_{CaO}} \cdot Mr_{Ca(OH)_2} - \left( \frac{1}{2} \cdot Mr_{Ca(OH)_2} \cdot c_{HCl} \cdot V_{HCl} \cdot f_{zř} \right) \right) - \left( \frac{m_{Blank_{CaO}}}{Mr_{CaO}} \cdot Mr_{Ca(OH)_2} - \left( \frac{1}{2} \cdot Mr_{Ca(OH)_2} \cdot c_{HCl} \cdot V_{Blank_{HCl}} \cdot f_{zř} \right) \right)}{m_{pucolán}} \right) \cdot 1000 =$$

$$\left( \frac{\left( \frac{0,7977 \text{ g}}{56,093} \cdot 74,093 - \left( \frac{1}{2} \cdot 56,093 \cdot 0,102 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot 37,9 \cdot 10^{-3} \text{ dm}^{-3} \cdot 5,735 \right) \right) - \left( \frac{0,794 \text{ g}}{56,098} \cdot 74,093 - \left( \frac{1}{2} \cdot 56,093 \cdot 0,102 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot 41,4 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ dm}^{-3} \cdot 35 \right) \right)}{0,3976} \right) \cdot 1000 =$$

202,94 mg Ca(OH)<sub>2</sub> / g pucolán 17

tab. 9: výsledky stanovení pucolánové aktivity pomocí Chapelle testu

	P. A. [mg Ca(OH) <sub>2</sub> / g pucolán]
O 1	202 ± 8
O 2	191 ± 6

V tab. 9 jsou uvedeny výsledky stanovení pucolánové aktivity. Pucolánová aktivita cihelného obrusu s větším měrným povrchem je vyšší než s měrným menším povrchem. Rozdíly jsou ale velmi malé.

#### 4.1.3 Fluidní ložový slínek

Použitý popílek pocházel z fluidního spalování a konkrétně se jednalo o mletý ložový popílek. Popílek byl vyprodukován na začátku roku 2017.

Pomocí laserové difrakce byly změřeny velikosti částic, výsledky jsou uvedeny v tab. 10.

tab. 10: velikost částic fluidního ložového slinku

	D <sub>50</sub> [μm]	D <sub>90</sub> [μm]	modus [μm]
ložový fluidní popílek	43,99	207,19	164,32

Byla provedena rentgenová difrakční analýza. Jak je vidět v tab. 11, fluidní ložový popílek obsahuje velké množství složek, tedy kvalitativní analýza by byla poměrně nepřesná. Proto bylo zvoleno značení podle symbolů. Nejvíce je zastoupen anhydrit, který tvoří přibližně čtvrtinu, dále křemen a volné vápno, které tvoří asi pětinu obsahu.

tab. 11: mineralogické složení fluidního ložového popílku

	křemen	anhydrit	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	kalcit
Fluidní ložový popílek	++	++	++	+	+
	albit	muskovit	ortoklas	hematit	rutil
Fluidní ložový popílek	+	+	+	+	+

++ fáze je přítomna; + fáze je přítomna v malém množství

Stanovení volného vápna bylo provedeno sacharátovou metodou. Obsah volného vápna byl vypočítán na hodnotu  $w = 21,6 \pm 0,5 \%$ . Tato hodnota souhlasí s hodnotou stanovenou pomocí XRD.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

V první části jsou shrnuty výsledky výzkumu v oblasti náhrady části cementu cihelným obrusem. Bylo zkoumáno množství slinku, které by mohlo být nahrazeno. Následně byl testován vliv měrného povrchu, přičemž byly použity dva obrusy a dva slinky jiného měrného povrchu. Jako určující parametr byl zvolen čas počátek a konec tuhnutí, poté byla provedena izotermická kalorimetrie, zajímavým faktorem by mohla být barva výsledných alternativních cementů. Byly provedeny i testy na maltách, pro vybrané receptury, zkoumanými vlastnostmi byla pevnost v tlaku, objemová hmotnost a objemová změna zkušebních těles.

Ve druhé části byly vybrány dvě konkrétní receptury a byla snaha o vylepšení jejich vlastností. V první fázi byl použit přídavek fluidního ložového popílku do systému. Dále byl zkoumán jiný zdroj síranových iontů, místo síranu vápenatého byl použit síran sodný. I v těchto systémech byla byla rozhodující pevnosti v tlaku, dále byly provedeny zkoušky objemové roztažnosti.

### 5.1 Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slinku s obsahem cihelného obrusu

V následující kapitole bylo testováno množství a vliv měrného povrchu cihelného obrusu v systému s portlandským cementem. Pro tuto práci bylo na cihelný obrus pohlíženo jako na přírodní kalcinovaný pucolán. Poté by výsledné cementy mohly být označeny jako pucolánový cement (CEM IV A nebo CEM IV B) a mohly být porovnány s ČSN 197-1. Jako hlavní kritéria byla brána v potaz: počátek a konec tuhnutí, pevnost v tlaku počáteční i po 28 dnech zrání, následně objemová stálost. Byla snaha připravit alternativní cement, který splňoval českou normu a dané vlastnosti v ní obsažené, viz obr. 12 [8].

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku MPa			Počátek tuhnutí minuta	Objemová stálost (rozeptnutí) mm
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost 28 dnů		
	2 dny	7 dnů			
32,5 L <sup>a</sup>	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	–	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	–			
42,5 L <sup>a</sup>	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≤ 10
42,5 N	≥ 10,0	–			
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 L <sup>a</sup>	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	–			
52,5 R	≥ 30,0	–			

<sup>a</sup> Třída pevnosti určena pouze pro cementy CEM III.

obr. 12: požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti uvedené jako charakteristické hodnoty [8]

Cementy byly semlety v laboratorním kulovém mlýnu, který zdaleka nedosahuje výkonu průmyslového. Už z tohoto důvodu nelze dosažené výsledky brát jako absolutní, a které by šlo srovnávat s normou bez chyby. Avšak lze posoudit chování připravených cementů, které obsahovali cihelný obrus a s cementem bez cihelného obrusu připraveným stejným způsobem.

A porovnat tyto hodnoty s normou, tedy získat podklad pro výběr možných směsí, které by bylo možné testovat v průmyslových zařízeních.

Byla utvořena řada, viz tab. 12, kde bylo postupně zvyšováno množství cihelného obrusu. Výsledná směs mohla obsahovat slínek s větším měrným povrchem (S1) nebo s menším měrným povrchem (S2), dále cihelný obrus s větším měrným povrchem (O1) nebo s menším měrným povrchem (O2). Následně směs, která obsahovala slínek s měrným povrchem větší : menšímu v poměru 1 : 1 a s cihelný obrus s měrným povrchem větší : menšímu v poměru 1 : 1, viz tab. 13.

tab. 12: připravené řady s měnícím se obsahem cihelného obrusu

	S [%]	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]	E [%]	F [%]
Slínek	95	85	75	65	55	40	35
Sádrovec	5	5	5	5	5	5	5
Cihelný obrus	0	10	20	30	40	55	60

tab. 13: připravené řady s měnícím se obsahem slínku i obrusu s větším a menším povrchem

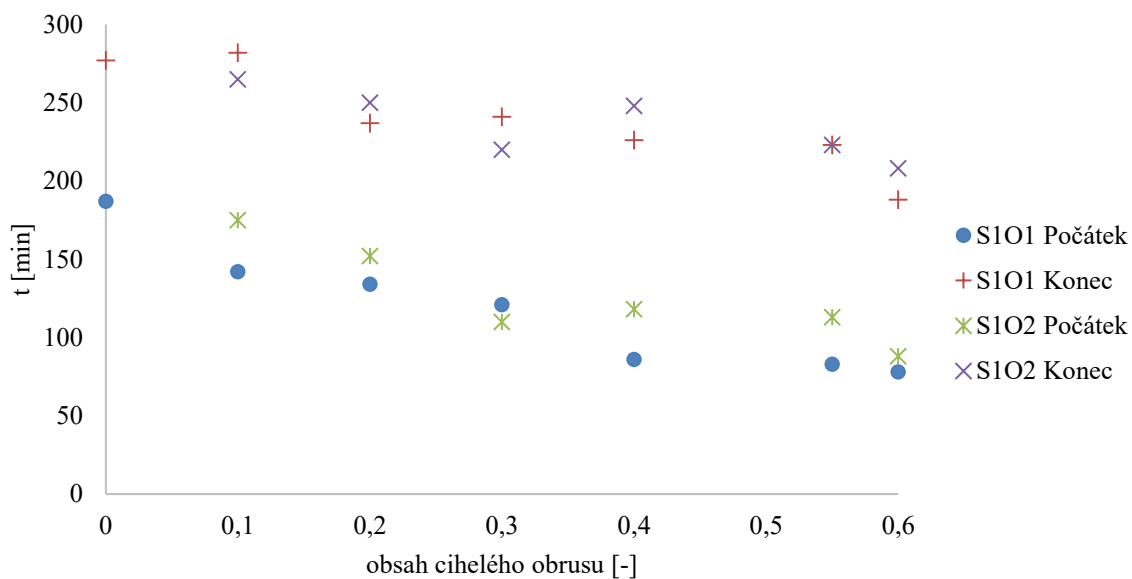
	Slínek		Cihelný Obrus	
	větší měrný povrch	menší měrný povrch	větší měrný povrch	menší měrný povrch
S1O1	++		++	
S1O2	++			++
S2O1		++	++	
S2O2		++		++
S5O5	+	+	+	+

### 5.1.1 Sledování počátku a konce tuhnutí alternativního pojivového systému na bázi portlandského slínku s obsahem cihelného recyklátu

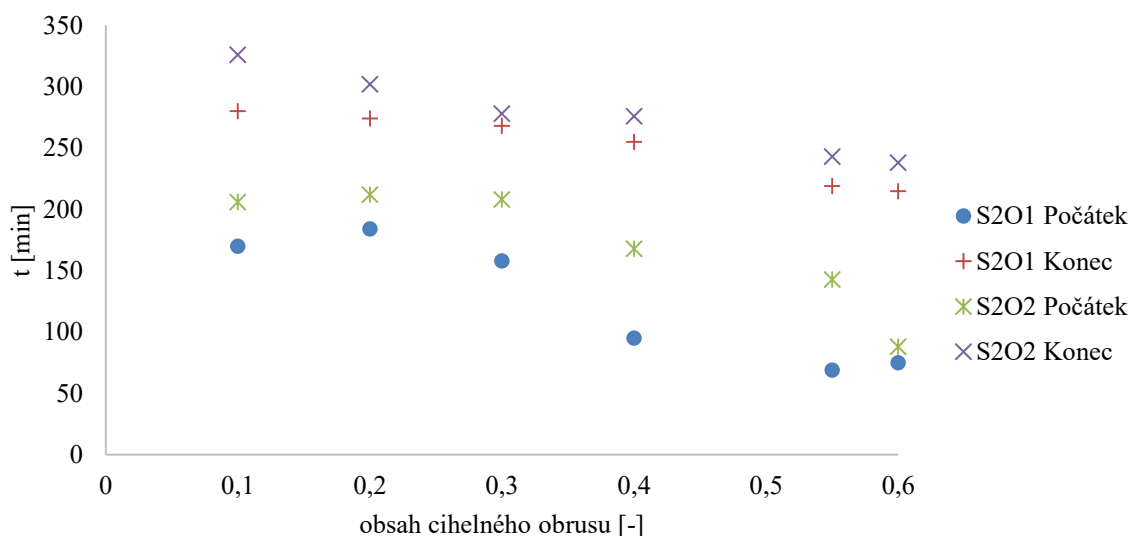
Byl stanoven vodní součinitel  $w = 0,33$ ; poměr voda ku připravenému cementu. Tento poměr byl dodržen pro všechny směsi. Výsledky jsou zobrazeny v grafech na obr. 13 a obr. 14 a konkrétní hodnoty v tab. 21 příloze.

Pro systém obsahující slínek s větším měrným povrchem platí, že s rostoucím přídatkem cihelného obrusu nastává dříve počátek i konec tuhnutí, jak je patrné z grafu na obr. 13. Tento trend je pro směsi obsahující slínek s menším měrným povrchem stejný a je znázorněn v grafu na obr. 14.

Pro oba druhy slínku platí, že pokud obsahovaly obrus, který měl větší povrch, nastával počátek tuhnutí dříve než u cementů s hrubším cihelným obrusem. Čas konce tuhnutí je přibližně stejný u obou typů obrusů, pro slínek s větším povrchem. Avšak pro cementy se slínkem, který měl menší povrch, obsahující jemnější slínek nastával dříve i konec tuhnutí.



obr. 13: stanovení počátku a konce tuhnutí pro slínek s větším měrným povrchem



obr. 14: stanovení počátku a konce tuhnutí pro slínek s menším měrným povrchem

Porovnáním časů konců a počátků tuhnutí pro různé slinky, lze říci, že u slinky s větším měrným povrchem nastává počátek i konec tuhnutí dříve. Tedy obdobný trend jako u cihelného obrusu. Čím má částice větší měrný povrch, tím jsou rychlejší reakce a hydratace se zrychluje.

Zpravidla přidavek pucolánu oddaluje počátek i konec tuhnutí. Tento fakt potvrzuje kalorimetrie, která byla provedena pro tyto cementy, viz 5.1.2. Důvodem pro opačný trend naměřený pomocí automatického Vicatova přístroje je velká potřeba záměsové vody pro cihelný obrus, který je značně porézní. Tedy když byl dodržen stejný vodní součinitel pro všechny testy, v systému s vyšším obsahem obrusu je nedostatek vody, což v krátkodobém horizontu urychluje tuhnutí [21], [64]. Pokud by připravené cementové pasty měly stejnou

konzistenci, nebo nadbytek vody je očekáván trend opačný, přidavek cihelného obrusu by oddaloval počátek tuhnutí, což bylo dokázáno kalorimetrií.

Cement pevnostní třídy 32,5 N; R má mít čas tuhnutí  $\leq 75$  min, podle ČSN 197-1 viz obr. 12 a tab. 21. Tuto hodnotu splňují všechny připravené cementy [8].

Ve směsi, ve které je rovnoměrně zastoupen S1 a S2 i O1 a O2, byly časy přibližně uprostřed ostatních kombinací. Výsledky jsou uvedeny v příloze v tab. 21.

### 5.1.2 Sledování tepelných procesů při hydrataci testovaných pojivových systémů metodou izotermické kalorimetrie

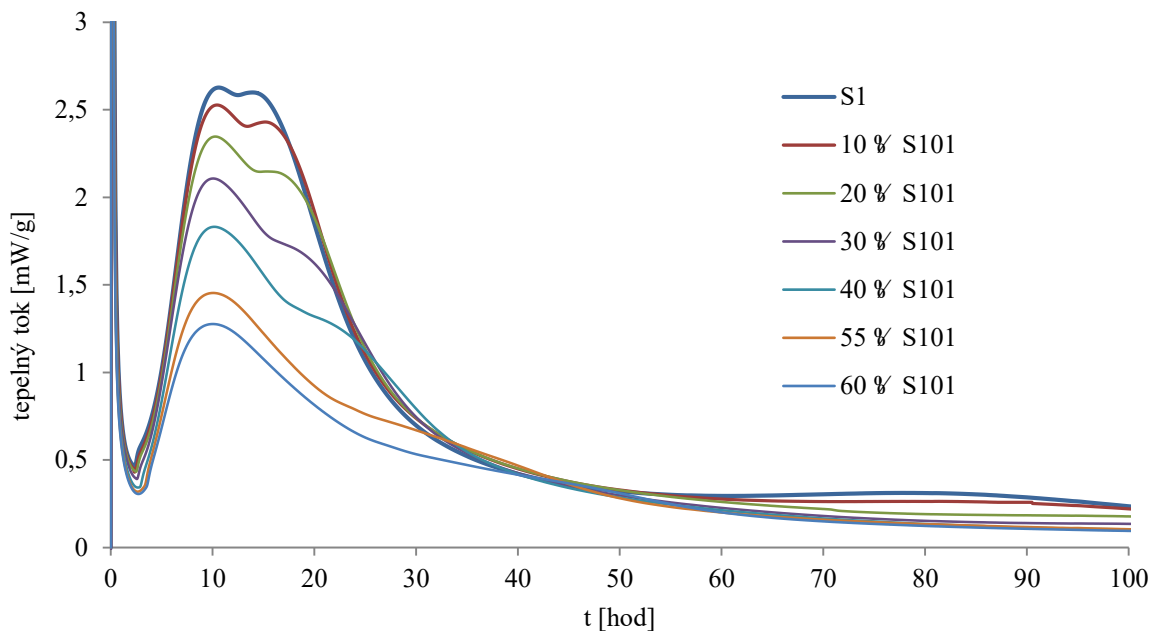
Pro měření kalorimetrie byly použity připravené cementy viz tab. 12 a tab. 13. Měření probíhalo při 20 °C. Byly měřeny 4 g vzorku, vodní součinitel (voda / cement) byl zvolen 0,4, aby vodní součinitel neovlivňoval výsledky. Vzorky byly 1 min míchány mimo, poté byly vloženy do kalorimetru. Výsledkem měření jsou závislosti tepelného toku na čase, následně byla provedena integrace těchto křivek a byla vytvořena závislost celkového uvolněného tepla na čase. První pík kalorimetru je zatížen chybou z hlediska různých teplot vzorku a kalorimetru, proto nebude rozebírán. Kritéria pro posouzení byly:

- 1) čas precipitace portlanditu (počátek tuhnutí)
- 2) čas hlavního hydratačního píku
- 3) pozice hlavního hydratačního píku (hodnota tepelného toku)
- 4) vyčerpání síranů (tvorba sekundárního ettringitu)
- 5) přeměna ettringitu na monosulfát

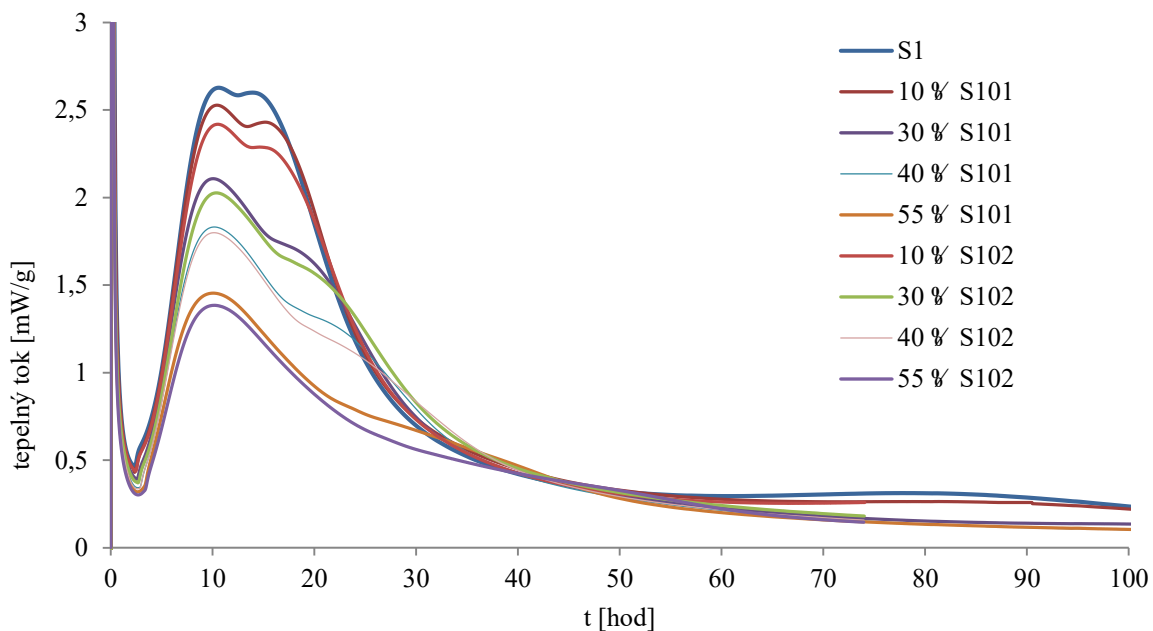
tab. 14: výsledky vyhodnocení kalorimetrie

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
	[hod]	[hod]	[mW/g]	[hod]	[hod]		[hod]	[hod]	[mW/g]	[hod]	[hod]
S1	2,6	10,6	2,63	13,9	77,8	S1	2,6	10,6	2,63	13,9	77,8
10 % S1O1	2,6	10,5	2,53	15,1	84,6	10 % S1O2	2,6	10,5	2,42	16,4	-
20 % S1O1	2,7	10,2	2,35	16,3	-	20 % S1O2	2,7	10,5	2,25	17,5	-
30 % S1O1	2,8	10,1	2,11	18,9	-	30 % S1O2	2,8	10,4	2,03	20,5	-
40 % S1O1	3,0	10,1	1,83	23,4	-	40 % S1O2	3,0	10,1	1,80	25,6	-
55 % S1O1	3,5	10,0	1,45	36,9	-	55 % S1O2	3,6	10,2	1,38	50,7	-
60 % S1O1	3,7	10,0	1,28	42,9	-	60 % S1O2	3,7	10,1	1,26	55,3	-
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
	[hod]	[hod]	[mW/g]	[hod]	[hod]		[hod]	[hod]	[mW/g]	[hod]	[hod]
S2	3,4	11,2	2,05	18,4	-	S2	3,4	11,2	2,05	18,4	-
10 % S2O1	3,5	11,2	2,02	20,3	-	10 % S2O2	3,5	11,4	1,90	21,1	-
20 % S2O1	3,5	10,9	1,90	22,9	-	20 % S2O2	3,5	11,3	1,85	23,6	-
30 % S2O1	3,6	10,9	1,73	26,8	-	30 % S2O2	3,6	10,9	1,70	27,7	-
40 % S2O1	3,7	10,9	1,54	30,1	-	40 % S2O2	3,7	10,9	1,51	33,0	-
55 % S2O1	4,0	11,1	1,18	-	-	55 % S2O2	4,0	11,0	1,15	-	-
60 % S2O1	4,1	10,8	1,04	-	-	60 % S2O2	4,1	10,8	1,06	-	-

Výsledky kalorimetrického měření jsou uvedeny v tab. 14, pro představu chování v čase byly v grafu na obr. 15 zobrazeny výsledky měření receptury S1O1, ve které byl měněn obsah cihelného obrusu podle tab. 12. Vliv velikosti měrného povrchu cihelného obrusu byl znázorněn na obr. 16, pro lepší přehlednost byly vybrány pouze čtyři receptury.



obr. 15: kalorimetrické křivky pro různý přídavek cihelného obrusu receptury S1O1



obr. 16: kalorimetrické křivky znázorňující vliv velikosti měrného povrchu cihelného obrusu vybraných receptur S1O1 a S1O2

Čím bylo více v systému cihelného obrusu tím déle nastávala precipitace portlanditu, zároveň byl tento děj méně intenzivní. Tento trend se projevil v obou řadách při dvou poměrech slinku. Důvodem je pravděpodobně zřed'ovací efekt, kterým se projevil cihelný obrus. Precipitace portlanditu je schopnost, kterou vnáší do systému cement, pokud je ho méně, sníží se intenzita tohoto píku a nastává později. V závislosti na měrném povrchu cihelného obrusu, lze říci, že velikost povrchu obrusu nehraje roli. Precipitace portlanditu vede k počátku tuhnutí. Jak bylo řečeno výše, přídavek cihelného obrusu oddálí počátek tuhnutí, což souhlasí s teorií [21].

Pozice hlavního hydratačního píku nastává dříve v závislosti na zvětšujícím se obsahu cihelného obrusu, zároveň je snížena hodnota jeho tepelného toku v hlavním hydratačním píku, čím je ve směsi více cihelného obrusu. Toto lze vysvětlit opět zřed'ovacím efektem, v systému je méně fází, které jsou schopny reagovat, tedy hydratační reakce skončí dříve a jsou méně intenzivní. Pokud vezmeme v úvahu velikost měrného povrchu použitých materiálů, je vidět, že když má složka větší povrch jsou reakce urychleny a byly zaznamenány vyšší hodnoty uvolněného tepla v hlavním hydratačním píku.

Pík vyčerpání síranů má nastávat několik hodin po hlavním hydratačním píku. Toto je splněno pouze u přídavku 10 % cihelného obrusu. Bylo pozorováno oddálení a zmenšení intenzity píku vyčerpání síranů v závislosti na zvyšujícím se obsahu cihelného obrusu. Vyčerpání síranů je vlastnost cementu, konkrétně fáze  $C_3A$ , pokud jí v systému ubývá, dojde ke zmenšení intenzity tohoto píku. Důvodem pro posun k pozdějším časům je patrně nadbytek síranových iontů v systému. Při míchání byl dodržen konstantní poměr sádrovce ve směsi, ale byl zmenšován podíl slinku ve směsi. Tedy s vyšším přídavkem cihelného obrusu se zvětšuje podíl síranových iontů na slinek [59]. Nicméně bylo pozorováno i oddálení píku vyčerpání síranů pro receptury s menším měrným povrchem. Slinku o daném povrchu je v daných směsích stejné množství, liší se pouze jemností cihelného obrusu. Cihelný obrus obsahuje hlinitanové ionty, které mohou reagovat se sádrovcem [60]. Jemnější obrus je více reaktivní tedy může uspíšit vyčerpání síranů.

Poslední pík reprezentuje přeměnu ettringitu na monosulfát, nicméně byl naměřen pouze u cementu bez přídavku u receptury 10 % S1O1, kde byl již hodně posunut k pozdějším časům.

Bylo změřeno celkové hydratační teplo cementu v závislosti na čase. Jako charakteristické bylo považováno hydratační teplo po 41 hod, které je definováno českou normou [61]. Dále hydratační teplo po 72 hodinách, kdy je vývoj tepla ustálen a lze hodnoty porovnávat mezi sebou.

tab. 15: hydratační tepla po 41 a 72 hod

	41 hod [J/g]	72 hod [J/g]		41 hod [J/g]	72 hod [J/g]
S1	216	252	S1	216	252
10 % S1O1	214	249	10 % S1O2	210	243
20 % S1O1	205	238	20 % S1O2	199	230
30 % S1O1	185	214	30 % S1O2	185	216
40 % S1O1	174	202	40 % S1O2	168	197
55 % S1O1	140	168	55 % S1O2	130	160
60 % S1O1	125	153	60 % S1O2	115	144
	41 hod [J/g]	72 hod [J/g]		41 hod [J/g]	72 hod [J/g]
S2	191	231	S2	191	231
10 % S2O1	191	227	10 % S2O2	182	218
20 % S2O1	184	217	20 % S2O2	179	211
30 % S2O1	170	202	30 % S2O2	171	203
40 % S2O1	151	183	40 % S2O2	145	178
55 % S2O1	117	149	55 % S2O2	110	140
60 % S2O1	107	136	60 % S2O2	102	129

Podle ČSN EN 196-9 mohou mít cementy s nízkým hydratačním teplem po 41 hodinách teplem hydratační teplo nejvýše 270 kJ/kg. Všechny připravené cementy by tuto normu splnily.

Po 72 hodinách je vidět pokles hodnot hydratačních tepel v závislosti na snižujícím se obsahu portlandského slinku. Dále je patrné, že cementy obsahující složky s větším měrným povrchem generují více hydratačního tepla než cementy stejné receptury o menším měrném povrchu slinku. Pokud porovnáme hodnoty tepel s pevnostmi v tlaku viz 5.1.3 pro ty samé cementy, je zaznamenán trend, čím vyšší má směs hydratační teplo, tím byly naměřeny větší pevnosti v tlaku.

Pokud bychom považovali cihelný obrus za inertní plnivo, bez žádného účinku na pevnosti, mělo by být výsledné hydratační teplo úměrné zastoupení slinku ve směsi. Byl proveden přepočítání na obsah cementu bez příměsí, pro receptury S1O1. Naměřená hodnota pro samotný cement byla 252 J/g, přepočtená hodnota pro 10 % náhrady měla hodnotu 277 J/g, pro 30 % J/g a pro 55 % náhrady 373 J/g. Bylo zjištěno, že cihelný obrus má určité vlastnosti, které přispívají k tvorbě hydratačního tepla. Jedná se patrně o pucolánovou aktivitu a „filler efekt“, které se promítají do výsledků různou měrou.

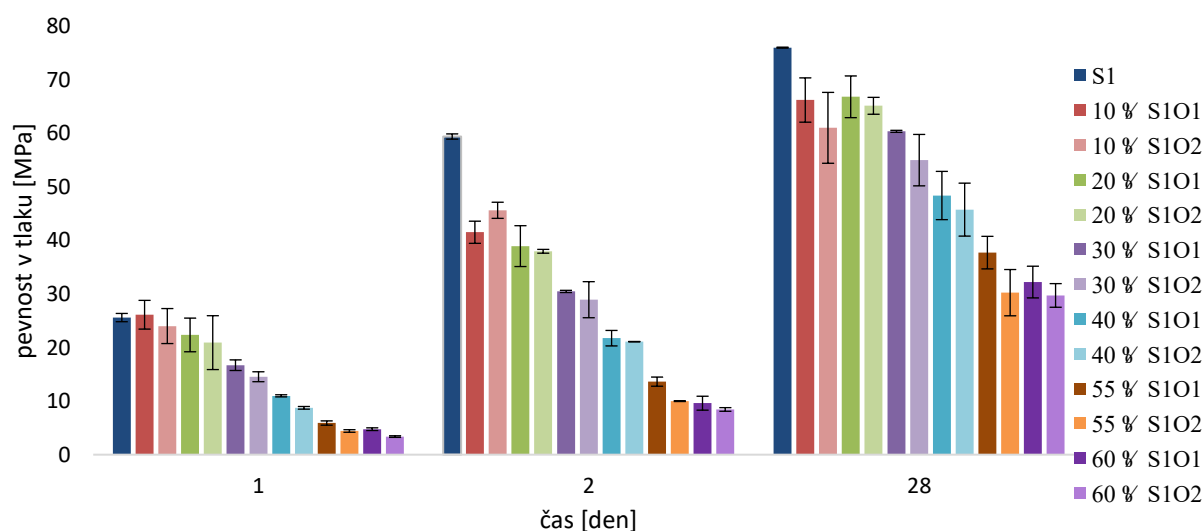
### 5.1.3 Mechanické vlastnosti testovaných pojivových systémů stanovené na pastách alternativních pojiv

Byla vytvořena zkušební tělesa, složení cementů odpovídá tab. 13 z hlediska zastoupení obsahu obrusu a měrného povrchu použitých materiálů. Konkrétní složení směsí jsou zobrazena v tab. 16, vodní součinitel ( $w$  – podíl hmotnosti vody a připraveného cementu) rostl spolu se zvyšováním obsahu cihelného obrusu ve směsi, aby byla zaručena stejná zpracovatelnost past.

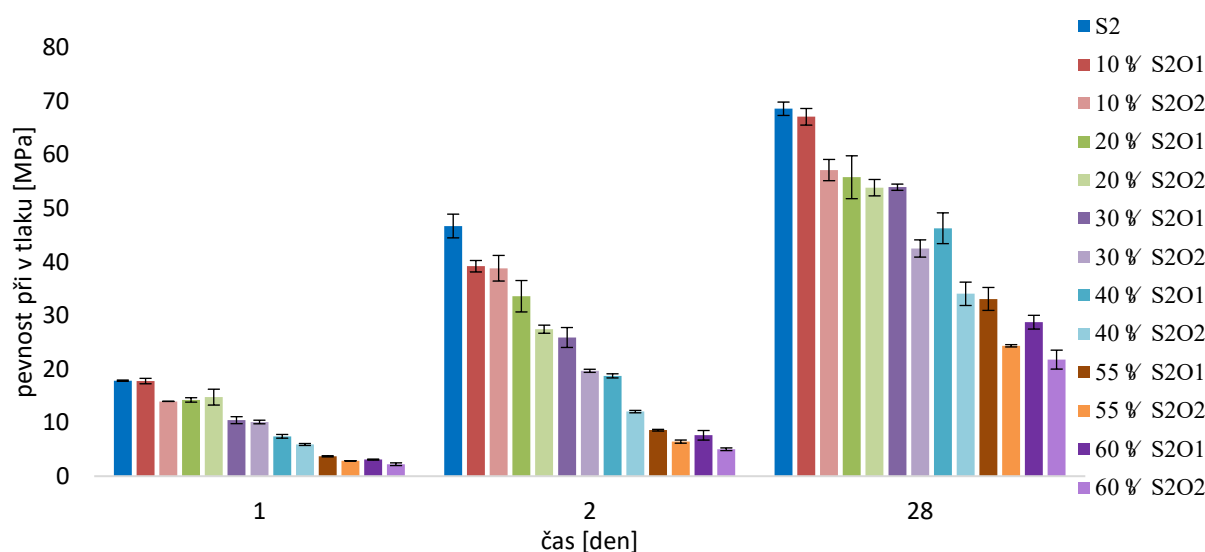
tab. 16: složení připravených past

		0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %
Slinek [%]		95	85	75	65	55	40	35
Sádrovec [%]		5	5	5	5	5	5	5
Cihelný obrus [%]		0	10	20	30	40	55	60
S1O1	w (-)	-	0,34	0,35	0,37	0,39	0,42	0,43
S1O2	w (-)	-	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,44
S2O1	w (-)	-	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,43
S2O2	w (-)	-	0,33	0,37	0,40	0,42	0,45	0,46
S5O5	w (-)	-	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42	0,43
S 1	w (-)	0,30	-	-	-	-	-	-
S 2	w (-)	0,30	-	-	-	-	-	-

Na zkušebních tělesech byly testovány pevnosti v tlaku, výsledky pro pasty obsahující slinek s větším měrným povrchem jsou uvedeny v grafu na obr. 17. Z výsledků je patrné, že čím vyšší přídavek cihelného obrusu, tím jsou menší naměřené pevnosti. Trend je stejný jako v případě slinku s větším měrným povrchem. Pevnosti klesají s přídavkem cihelného obrusu, jak je možné vidět v grafu na obr. 18. Dále je vidět, že pevnosti těles, které obsahovali cihelný obrus s větším měrným povrchem jsou vyšší než tělesa vytvořená z obrusu o menším měrném povrchu. Tato skutečnost platí i pro zkušební tělesa obsahující slinek s menším měrným povrchem.



obr. 17: pevnost v tlaku alternativních past, které obsahují slínek s větším měrným povrchem



obr. 18: pevnost v tlaku alternativních past, které obsahují slínek s menším měrným povrchem

Pevnost v tlaku pasty po 28 dnech vytvořené pouze z portlandského cementu s větším měrným povrchem (S1) dosahovala přibližně 75 MPa. Tuto hodnotu můžeme porovnat s pevností v tlaku pro stejný povrch slínku, která je například přibližně 65 MPa pro 10 % náhrady; 55 MPa pro 30 % náhrady a 30 MPa pro 55 % náhrady. Obdobně pevnost v tlaku pasty po 28 dnech vytvořené pouze z portlandského cementu s menším měrným povrchem (S1) dosahovala přibližně 68 MPa. Tuto hodnotu můžeme porovnat s pevností v tlaku pro stejný povrch slínku, která je například přibližně 63 MPa pro 10 % náhrady; 43 MPa pro 30 % náhrady a 25 MPa pro 55 % náhrady. I s náhradou slínku obrusem, lze dosáhnout poměrně vysokých hodnot.

Jak je patrné z grafů na obr. 17 a obr. 18, zkušební tělesa, která mají stejné procento náhrady i stejný měrný povrch slínku a liší pouze měrným povrchem obrusu, mají vyšší pevnosti ty tělesa s větším povrchem cihelného obrusu. Rozdíly mezi jednotlivými počátečními pevnosti v tlaku pro stejný měrný povrch slínku a jiný měrný povrch obrusu jsou poměrně malé, někde v rámci odchylky měření. Tato skutečnost patrně souvisí s faktem, že pucolánová aktivita i velikost částic se mezi sebou liší poměrně málo.

Ve směsi, ve které je rovnoměrně zastoupen S1 a S2 i O1 a O2, byly naměřeny hodnoty pevností v tlaku přibližně uprostřed ostatních kombinací, výsledky jsou uvedeny v tab. 22 v příloze.

Na obr. 19 jsou vidět barvy cementů a připravených zkušebních těles. Je vyobrazena řada S505 jako příklad. Všechny vytvořené cementy nehladě na velikost měrných povrchů měly stejnou barvu při daném množství přídavku cihelného ohrusu. S přídavkem cihelného ohrusu se barva cementů, následně i zkušebních těles, mění z šedé na šedo-oranžovou.



0 % ohrusu



10 % ohrusu



20 % ohrusu



30 % ohrusu



40 % ohrusu



55 % ohrusu



60 % ohrusu



Zleva 0 %, 10 %; 20 %; 30 %; 40 %; 55 %; 60 % ohrusu

obr. 19: barvy připravených cementů a zkušebních těles

### 5.1.4 Mechanické vlastnosti testovaných pojivových systémů stanovené na maltách alternativních pojiv

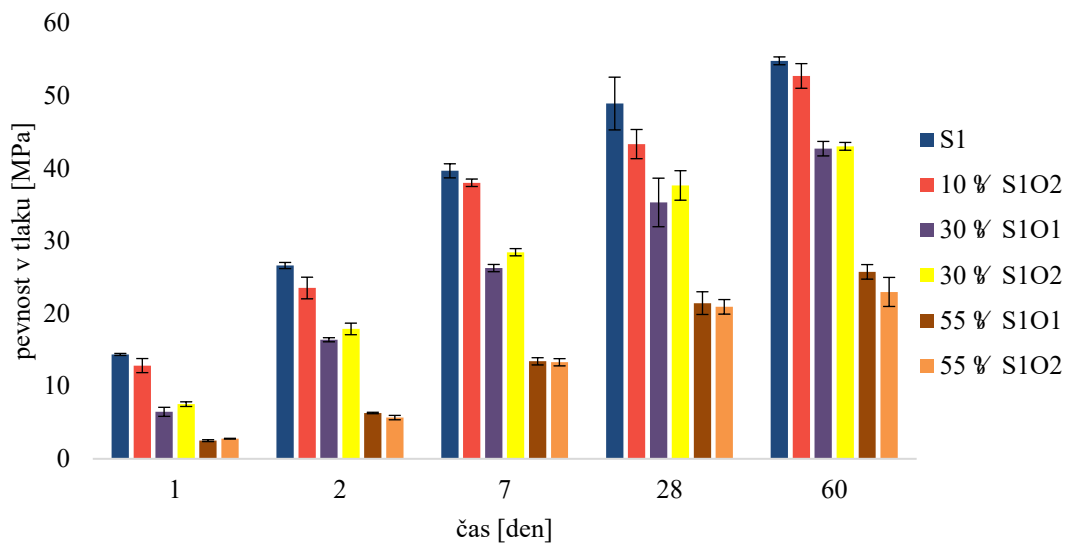
Pro přípravu malt byly vybrány směsi 10 % (pouze pro O2), 30 % a 55 %. Byla vytvořena zkušební tělesa, složení cementů odpovídá tab. 12 a tab. 13 z hlediska zastoupení obsahu obrusu a měrného povrchu použitých materiálů. Pro přípravu malt byly použity normové písky CEN I, CEN II a CEN III, které se liší velikostí částic. Poměry složek a vodní součinitel je uveden v tab. 17.

tab. 17: složení připravených malt

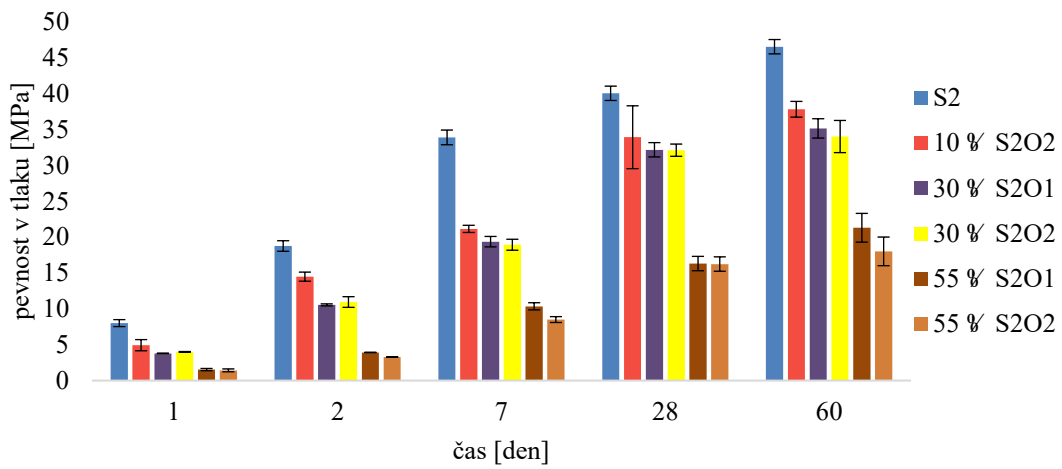
		0 %	10 %	30 %	55 %
alternativní cement [%]		25	25	25	25
písek CEN I [%]		25	25	25	25
písek CEN II [%]		25	25	25	25
písek CEN III [%]		25	25	25	25
S1O1	w (-)	-	-	0,51	0,54
S1O2	w (-)	-	0,49	0,51	0,54
S2O1	w (-)	-	-	0,50	0,56
S2O2	w (-)	-	0,49	0,51	0,57
S5O5	w (-)	-	-	0,51	0,54
S 1	w (-)	0,47	-	-	-
S 2	w (-)	0,47	-	-	-

Na zkušebních tělesech byla měřena pevnost v tlaku, výsledky jsou vidět na v grafech obr. 20. a obr. 21. Z naměřených výsledků lze usoudit, že při zvyšujícím se obsahu cihelného recyklátu, klesají pevnosti v tlaku, což bylo pozorováno i na pastách, viz 5.1.3. Tento trend je obdobný pro oba typy slinku.

Tělesa, s obsahem slinku o větším i menším měrném povrchu, která obsahovala cihelný obrus s větším měrným povrchem, mají přibližně stejnou pevnost jako tělesa odpovídajícího slinku s cihelným obrusem o menším měrném povrchu. Vliv cihelného obrusu na pevnosti může být dán jeho pucolánovou aktivitou a tzv „filler efektem“. Příklad cihelného obrusu o daném měrném povrchu byl stejný. Jediným rozdílem ve složení směsi je přídavek normového písku. Příklad písku ovlivňuje vnitřní strukturu malty, tedy je pravděpodobně ovlivněn i „filler effect“ jakým působí cihelný obrus. V tomto případě se patrně projevil malý rozdíl mezi pucolánovou aktivitou cihelných obrusů, viz 4.1.2.

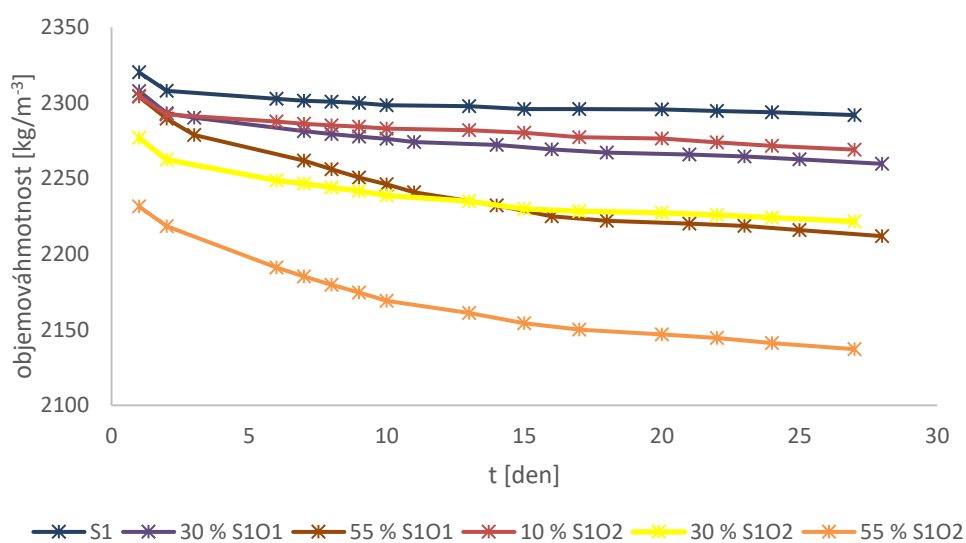


obr. 20: pevnost v tlaku pro cementové malty, které obsahují slínek s větším měrným povrchem

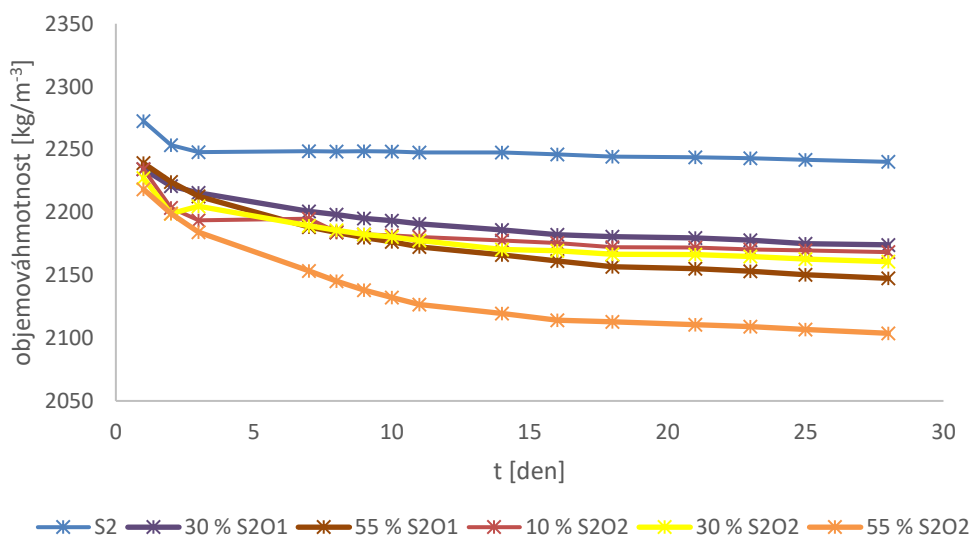


obr. 21: pevnost v tlaku pro cementové malty, které obsahují slínek s menším měrným povrchem

Byl změřen vývoj objemové hmotnosti připravených těles v čase. Jak je patrné z grafu na obr. 22 a obr. 23 obr. 22: objemové hmotnosti cementových malt, které obsahují slínek s větším měrným povrchem slínek bez příměsi má nejvyšší objemovou hmotnost po celý čas měření. Dále je vidět, že čím více obrusu v dané řadě, tím je menší objemová hmotnost. Největší pokles objemové hmotnosti byl zaznamenán u přídatku obrusu 55 %, neboť bylo potřeba nejvyšší množství záměsové vody. Z hlediska velikosti měrného povrchu použitého obrusu, je dobře patrné, že tělesa s obrusem o menším měrném povrchu mají nižší objemové hmotnosti než tělesa o větším měrném povrchu. Porovnáním obou cementů v závislosti na obsahu slínku s větším či menším povrchem slínku, lze říci, že slínek s větším povrchem má vyšší objemovou hmotnost.

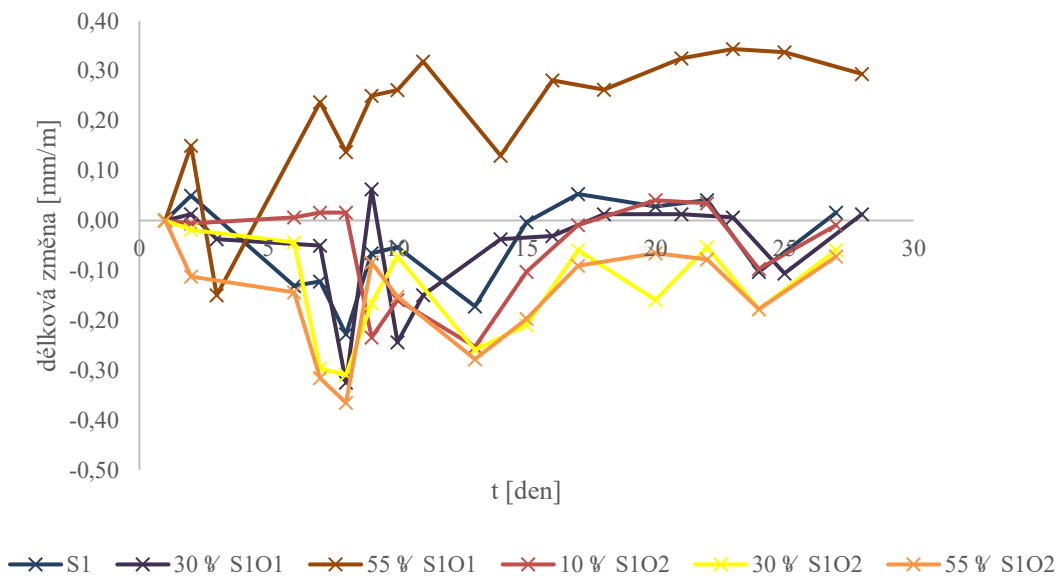


obr. 22: objemové hmotnosti cementových malt, které obsahují slínek s větším měrným povrchem

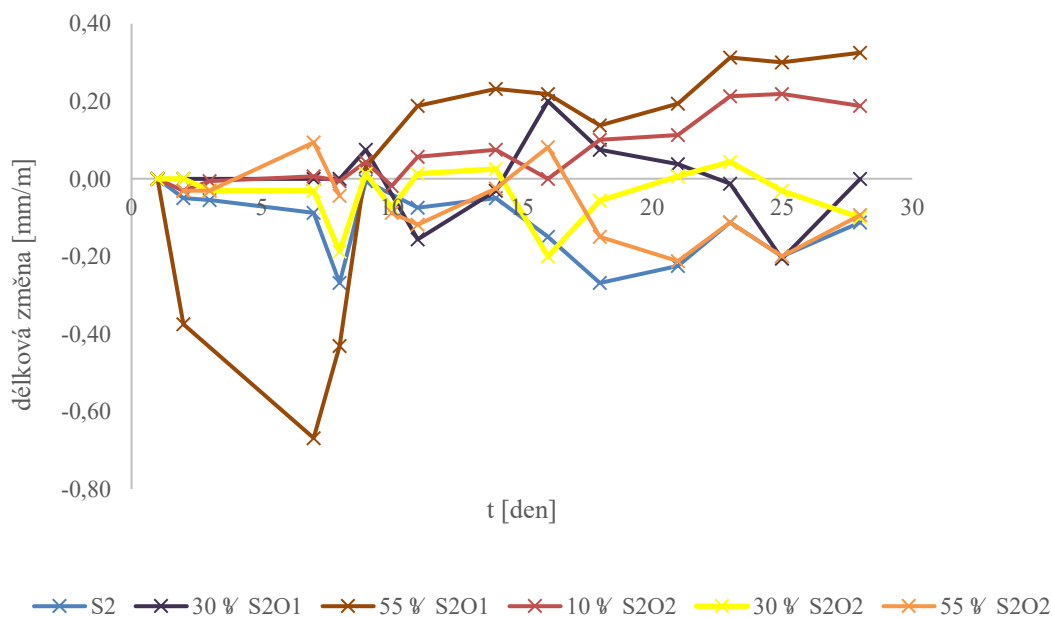


obr. 23: objemové hmotnosti cementových malt, které obsahují slínek s menším měrným povrchem

Byly změřeny délkové změny těles připravených z malt, výsledky pro slínek s větším i menším měrným povrchem jsou uvedeny v grafech na obr. 24 a obr. 25. Výsledky jsou přibližně stejné pro všechna zkušební tělesa a neliší se zásadně od malty bez přídavku cihelného ohrusu. Větší délkové změny mají tělesa s vyšším obsahem cihelného ohrusu, můžeme tedy konstatovat, že objemová stálost je funkcí množství přidaného cihelného podílu. Důvodem pravděpodobně bude vysoká porozita tohoto materiálu.



obr. 24: objemová stálost cementových malt, které obsahují slínek s větším měrným povrchem



*obr. 25: objemová stálost cementových malt, které obsahují slínek s menším měrným povrchem*

Pevnosti takto připravených těles lze orientačně porovnat s ČSN 197-1. Tato norma říká, že pro cement pevnostní třídy 32,5 N má být pevnost v tlaku po 7 dnech zrání větší nebo rovno 16 MPa a pro pevnostní třídu 32,5 R má být pevnost v tlaku po 2 dnech zrání větší nebo rovno 10 MPa. Po 28 dnech zrání platí pro pevnostní třídu 32,5 N i 32,5 R, že pevnost v tlaku má být v rozmezí větší nebo rovno než 32,5 až menší nebo rovno než 52,5 MPa [8].

Pevnosti v tlaku vzorků, kde byl použit slínek s větším měrným povrchem dosahují přibližně 43 MPa pro 10 % náhrady, 35 MPa pro 30 % náhrady a 21 MPa pro 55 % náhrady, ve srovnání se slínkem bez příměsi, který dosáhl pevnosti 48 MPa po 28 dnech. Pevnosti v tlaku pro slínek s menším měrným povrchem přibližně 34 MPa pro 10 % náhrady 32 MPa pro 30 % náhrady a 16 MPa pro 55 % náhrady, ve srovnání se slínkem bez příměsi, který dosáhl pevnosti 40 MPa po 28 dnech. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze tab. 23.

Systém s jemnějším i hrubším slínkem a přídavkem 10 % hrubším cihelného obrusu a lze předpokládat, že i s jemnějším obrusem by splňoval pevnostní třídy 32,5 N i 32,5 R. Dále systém s jemnějším slínkem a obsahem 30 % jemnějšího i hrubšího obrusu, by splňoval pevnostní třídu 32,5 N i 32,5 R. Pro systém s hrubším slínkem a přídavkem 30 % jsou dosaženy pevnosti těsně pod minimální hodnotu po 28 dnech pevnostní třídy 32,5.

Ve směsi, ve které je rovnoměrně zastoupen S1 a S2 i O1 a O2 byly časy přibližně uprostřed ostatních kombinací. Při porovnání s normou lze říci, že přídavek 30 % směsi cihelných obrusů v poměru 1 : 1 by splnil normou dané pevnosti v tlaku pro pevnostní třídy 32,5 N i 32,5 R. Výsledky jsou uvedeny v příloze v tab. 23.

Pro velikost objemové hmotnosti platí, že s přídavkem cihelného obrusu se sníží objemová hmotnost. Cement, který obsahuje cihelný obrus s větším měrným povrchem má vyšší objemovou hmotnost než cement s obrusem o menším měrném povrchu. Důvodem snížení pevností je vysychání těles. Je zde vidět vztah s potřebou záměsové vody, kdy u těles s vyšším obsahem cihelného obrusu byl pozorován větší úbytek na hmotnosti, neboť obsahovaly větší množství záměsové vody.

Délková roztažnost byla po celý sledovaný úsek přibližně stejná pro cementy bez náhrady i s náhradou cihelným obrusem. Hodnoty délkové roztažnosti byly srovnány s hodnotami objemové stálosti, která je uvedena v ČSN 197-1. Podle normy musí mít zkušební těleso 10 mm / 1 m. Z výsledků je patrné, že všechna zkušební tělesa by splnila tuto normu [8].

## 5.2 Optimalizace alternativního pojivového systému na bázi portlandského slinku s obsahem cihelného obrusu

Pro testy v následující kapitole byly vybrány dvě směsi. První obsahovala 30 % přídavku cihelného obrusu s větším měrným povrchem a rovněž slínek s větším měrným povrchem (30 % S1O1). Druhá směs obsahovala 55 % přídavku cihelného obrusu s menším měrným povrchem a rovněž slínek s menším měrným povrchem (55 % S2O2).

### 5.2.1 Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slinku a obsahem cihelného obrusu s přídavkem fluidního ložového popílku

Byl vytvořen ternární systém sestávající se z připraveného cementu s obsahem cihelného obrusu a fluidního ložového popílku. Ložový popílek byl vybrán, protože jeho přídavek k portlandskému cementu v určitém množství zvyšuje pevnost v tlaku. Fluidní ložový popílek s přídavkem cihelného obrusu (až do 50 %) tvoří také pojivový systém, jehož pevnosti jsou poměrně vysoké [20], [64].

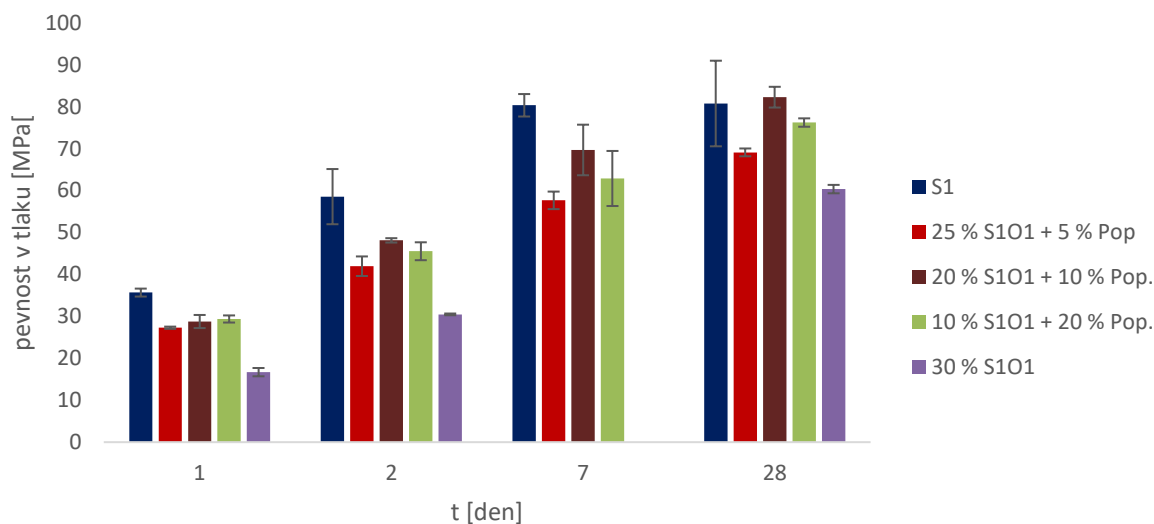
Byla vytvořena zkušební tělesa, poměry jednotlivých složek jsou uvedeny v tab. 18. Vodní součinitel byl upraven, aby měla výsledná směs stejnou konzistenci, což bylo ověřeno na setřácasím stolku. Cihelný obrus, zvyšoval nároky na záměsovou vodu, fluidní ložový popílek je snižoval oproti cihelnému obrusu.

tab. 18: složení připravených ternárních pojivových systémů

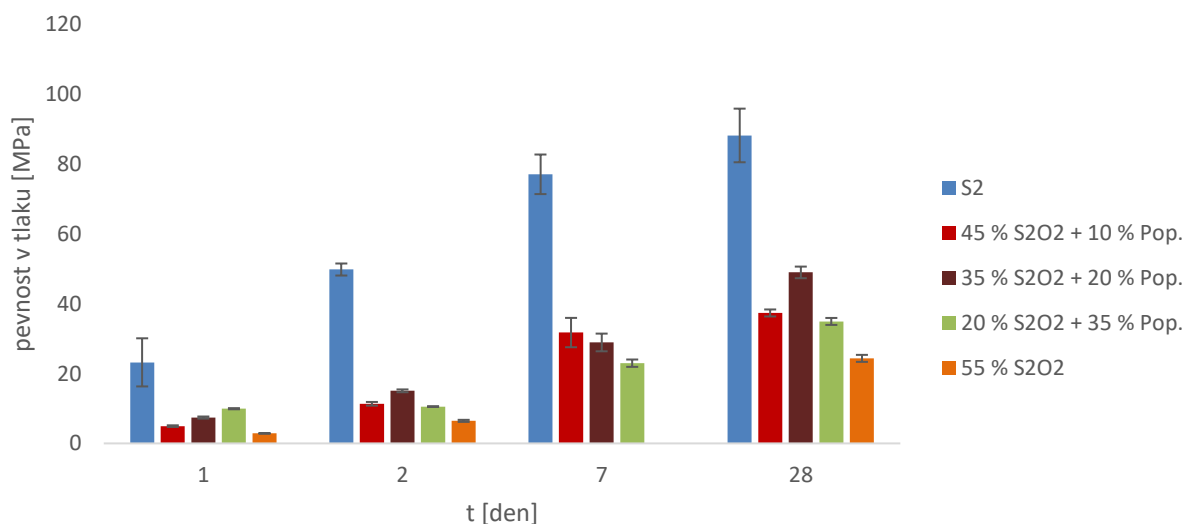
	S1	25 % O1 S1 + 5 % popílku	20 % O1 S1 + 10 % popílku	10 % O1 S1+ 20 % popílku
slinek [%]	95	65	65	65
fluidní ložový popílek [%]	-	5	10	20
cihelný obrus [%]	-	25	20	10
sádrovec [%]	5	5	5	5
w (-)	0,30	0,33	0,30	0,28
	S2	45 % O2O2 + 10 % popílku	35 % O2 S2+ 20 % popílku	20 % O2 S2 + 35 % popílku
slinek [%]	95	40	40	40
fluidní ložový popílek [%]	-	10	20	35
cihelný obrus [%]	-	45	35	20
sádrovec [%]	5	5	5	5
w (-)	0,30	0,37	0,33	0,30

V grafu na obr. 26 jsou znázorněny vývoje pevností ternárního systému, který vždy obsahoval 30 % náhrady slinku. Je patrné, že přídavek fluidního ložového popílku v rozmezí 5–20 % zvýší pevnosti oproti systému pouze s cihelným obrusem. Nejvyšších pevností bylo dosaženo u směsi, která obsahovala 20 % cihelného obrusu a 10 % fluidního ložového popílku. Po 28 dnech byla dokonce pevnost této směsi srovnatelná s pevností systému čistého cementu.

Druhá receptura obsahovala 45 % cementu a celkově 55 % náhrady. Nahrazení 10–35 % cihelného obrusu fluidním ložovým popílkem vede ke zlepšení pevnosti v tlaku, jak je patrné z grafu na obr. 27. Nejvyšších pevností byl dosaženo ve směsi, která obsahovala 35 % cihelného obrusu a 20 % popílku. Tato směs má po 28 dnech zrání přibližně dvojnásobné pevnosti než směs pouze s cihelného obrusu. Poměr cihelného obrusu a fluidního ložového popílku u směsi s nejvyšší pevností je přibližně 35 % cihelného obrusu a 20 % fluidního ložového popílku.



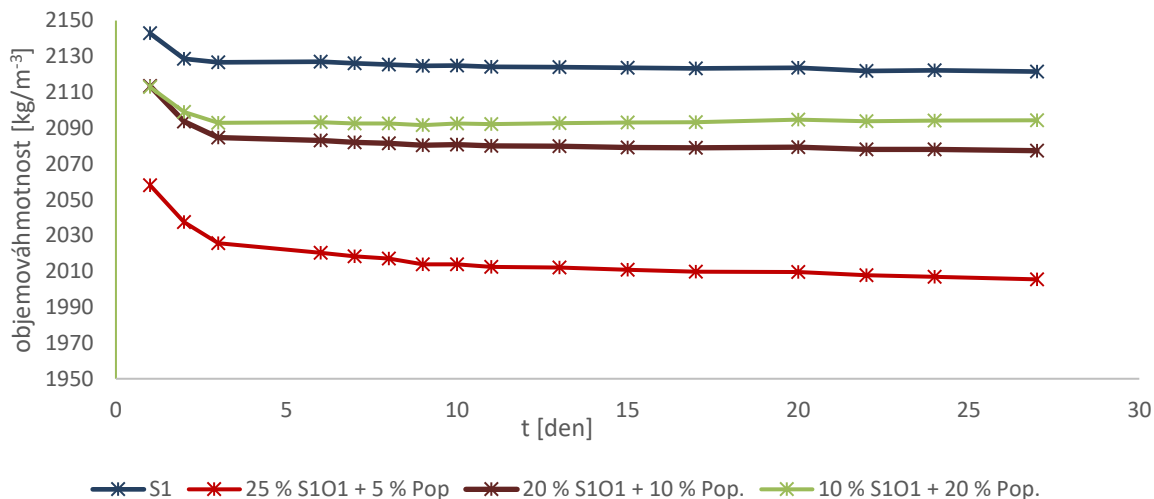
obr. 26: pevnosti v tlaku ternárního systému portlandský cement (S1, 70 %) a cihelný obrus (O1) + fluidní ložový popílek (30 %)



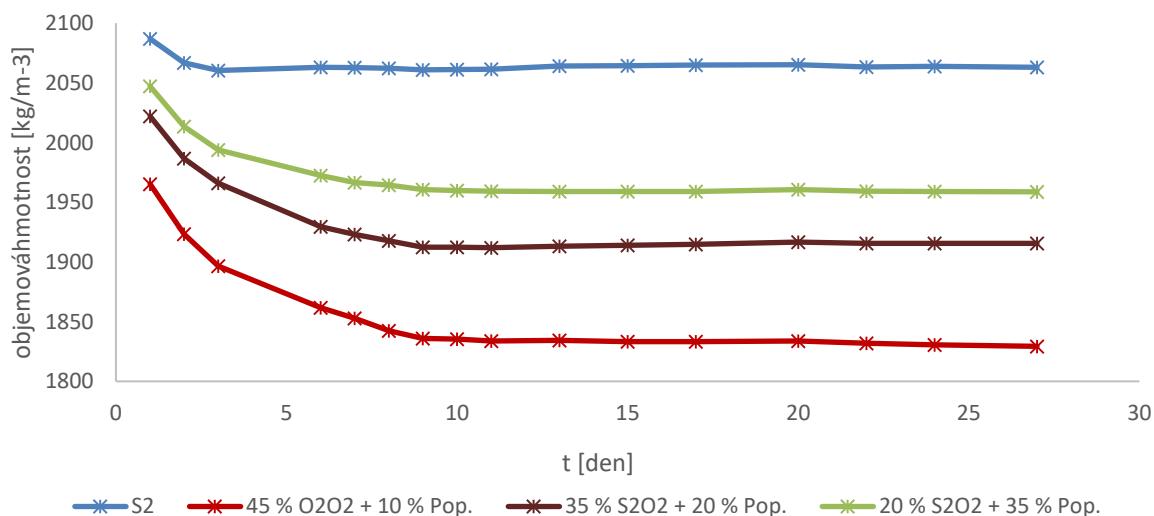
obr. 27: pevnosti v tlaku ternárního systému portlandský cement (S2 45 %) a cihelný obrus (S2) + fluidní ložový popílek (55 %)

Byla sledována objemová hmotnost těles bez příměsí a s proměnným zastoupením fluidního ložového popílku a cihelného obrusu. Vývoje objemových hmotností pro cementy (30 % S1O1)

je znázorněn na v grafu na obr. 28 a pro druhou recepturu (55 % S2O2) v grafu na obr. 29. Připravené směsné cementy měly menší objemovou hmotnost než cement bez příměsí. Cement s nejnižším přídatkem popílku má nejnižší objemovou hmotnost, s vyšším přídatkem popílku se objemová hmotnost zvyšuje.



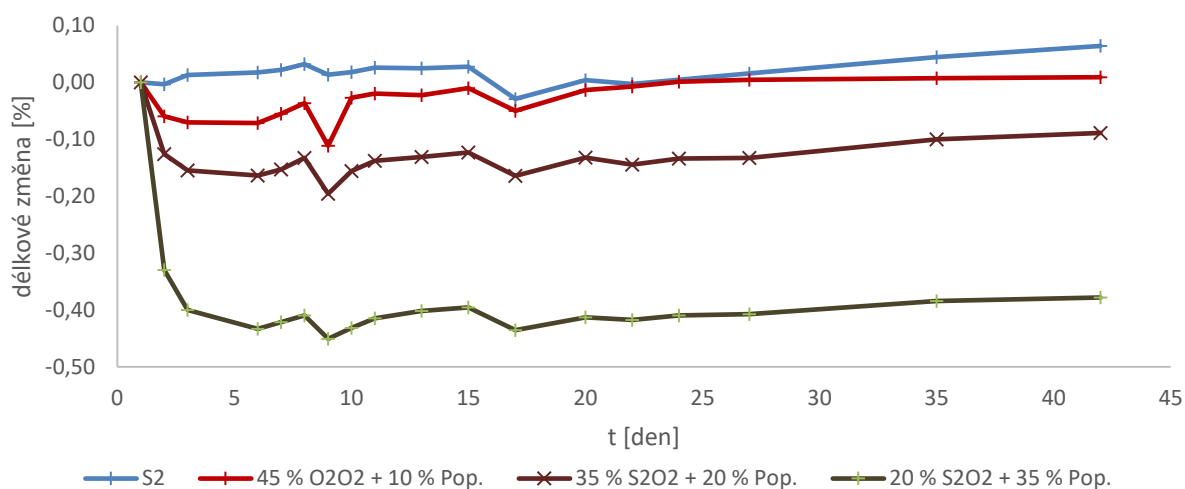
obr. 28: objemová hmotnost ternárního systému portlandský cement (S1 70 %) a cihelný obrus (O1) + fluidní ložový popílek (30 %)



obr. 29: objemová hmotnost ternárního systému portlandský cement (S2, 45 %) a cihelný obrus (O1) + fluidní ložový popílek (55 %)

Objemová roztažnost je poměrně důležitá při použití fluidních ložových popílků, neboť díky svému složení mohou tvořit sloučeniny, kterou mohou působit objemové změny. Délkové změny pro recepturu (S2O2 55 %), která celkově obsahovala větší zastoupení fluidního

ložového popílku jsou vyobrazeny v grafu na obr. 30. Po počátečním smrštění, zůstávají délkové změny téměř konstantní.



obr. 30: objemové změny ternárního systému portlandský cement (S2, 45 %) a cihelný obrus (O2) + fluidní ložový popílek (55 %)

Pomocí náhrady cihelného obrusu fluidním ložovým popílkem byly navýšeny pevnosti v tlaku oproti systému bez přídavku popílku. Pro recepturu 20 % S1O1 + 10 % popílku bylo po 28 dnech dosaženo srovnatelných pevností s cementem bez náhrady popílkem či obrusem. Optimální přídavek u obou receptur je přibližně 2 : 1 resp (4 : 7) v poměru cihelný obrus : popílek. Důvodem jsou patrně větší pojivové schopnosti popílku oproti cihelnému obrusu.

Pomocí náhrady cihelného obrusu fluidním ložovým popílkem byly navýšeny objemové hmotnosti oproti systému bez přídavku popílku. Avšak všechny připravené alternativní cementy s náhradou měly nižší objemovou hmotnost, jak cement bez náhrady popílkem či obrusem. Objemová hmotnost se v čase snižuje, neboť zkušební těleso ztrácí vodu vlivem vysušení, největší objemovou změnu mělo těleso s nejvyšším obsahem cihelného obrusu, které potřebovalo nejvyšší množství záměsové vody.

Byly měřeny objemové změny v závislosti na čase. U receptury 55 % S2O2 bylo celkově zaznamenáno počáteční smrštění, poté se velikost tělesa ustálila. S vyšším obsahem fluidního ložového popílku docházelo k většímu smrštění. Ověření tvorby fází potencionálně zodpovědných za objemové změny bylo zkoumán pomocí rentgenové difrakce. U vzorku S2O2 s nejvyšším obsahem popílku bylo nalezeno přibližně 10 % množství ettringitu, viz obr. 43. Což je poměrně velké množství, časem mohl ettringit přecházet na monosulfát, tato změna je doprovázena zmenšením objemu.

## 5.2.2 Alternativní pojivový systém na bázi portlandského slinku a obsahem cihelného obrusu s přidavkem Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Pro testy v následující kapitole byly vybrány dvě směsi. První obsahovala 30 % přidavku cihelného obrusu s větším měrným povrchem a rovněž slínek s větším měrným povrchem (30 % S1O1). Druhá směs obsahovala 55 % přidavku cihelného obrusu s menším měrným povrchem a rovněž slínek s menším měrným povrchem (55 % S2O2).

V této části byla zkoumána náhrada zdroje síranů, běžně se používá sádrovec, nicméně zde byl použit síran sodný. Důvodem byla snaha o dosažení lepších mechanických vlastností. Byly testovány pevnosti v tlaku, dále byly zjištěny objemové hmotnosti a změřeny objemové změny [21], [23].

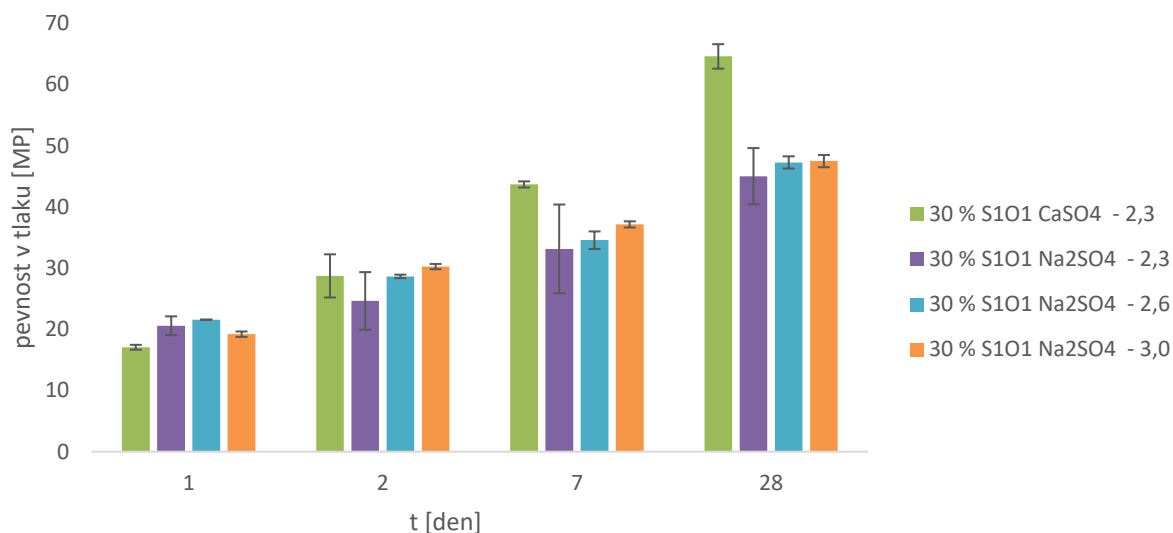
Byla vytvořena zkušební tělesa, poměry jednotlivých složek jsou uvedeny v tab. 19. Byl zvolen počáteční obsah SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iontů, v dalších řadách byl zvyšován. Jako zdroj síranů byl použit Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, zároveň byla utvořena reference, která obsahovala stejný poměr SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iontů, jenž však pocházely ze sádrovce. Obsah Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> byl u receptury 55 % S2O2 zmenšen záměrně, neboť byl v systému menší podíl slinku, tedy bylo upraveno i množství síranů.

tab. 19: složení připravených systému s přidavkem Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

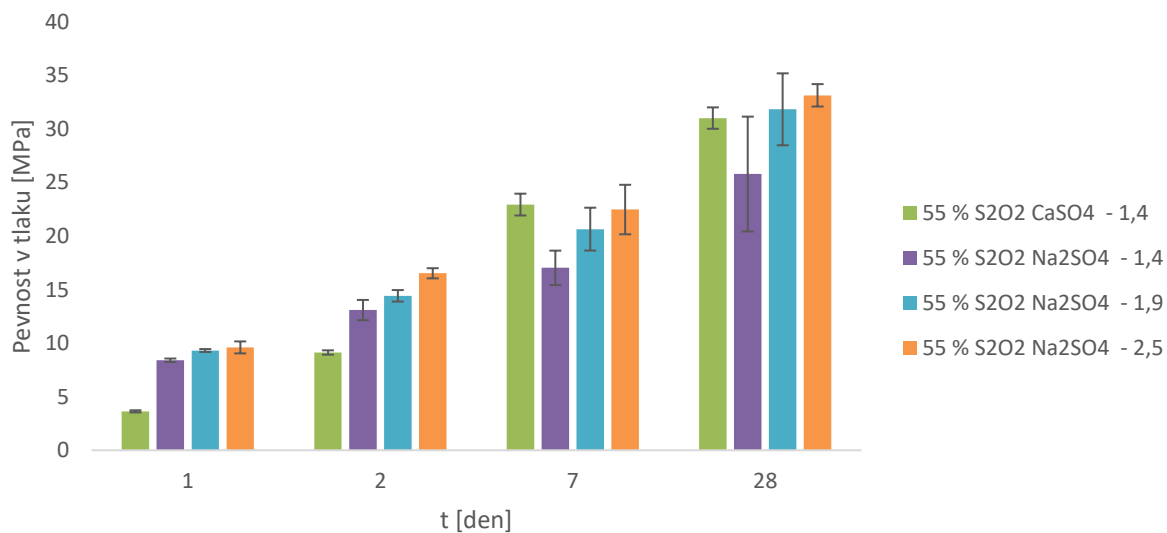
	30 % S1O1 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 2,3	30 % S1O1 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 2,6	30 % S1O1 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 3	30 % S1O1 CaSO <sub>4</sub> - 2,3
slínek [%]	66	66	65	66
obrus [%]	31	30	30	30
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [%]	3,4	3,9	4,4	-
sádrovec [%]	-	-	-	4,1
podíl SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [%]	2,3	2,6	3,0	2,3
w (-)	0,37	0,37	0,37	0,37
	55 % S2O2 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 1,4	55 % S2O2 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 1,9	55 % S2O2 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 2,5	55 % S2O2 CaSO <sub>4</sub> - 1,4
slínek [%]	41	41	41	41
obrus [%]	57	56	56	56
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [%]	2,1	2,9	3,6	-
sádrovec [%]	-	-	-	2,5
podíl SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [%]	1,4	1,9	2,5	1,4
w (-)	0,42	0,42	0,42	0,42

Jak je vidět v grafu na obr. 31 pro recepturu (30 % S1O1) je pozorován malý nárůst pevností spolu s nárůstem obsahu Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve směsi. Počáteční pevnosti v tlaku byly u všech směsí obsahující Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> byly lehce navýšeny oproti záměsem obsahujícím sádrovec. Avšak pevnosti v tlaku pro tělesa obsahující Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> byly od 7. dne zrání naměřeny menší. Časem se rozdíl mezi pevnostmi v tlaku pro systémy obsahující Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a sádrovcem zvyšoval.

I pro druhý systém (55 % S2O2) naměřené pevnosti v tlaku stoupaly se zvyšujícím obsahem Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Počáteční pevnosti byly navýšeny oproti systému se sádrovce. Od 7. dne zrání byly naměřeny pevnosti se sádrovcem přibližně stejné jako pevnosti těles s vyšším přídatkem Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Dokonce po 28 dnech zrání měla receptura s nejvyšším obsahem sádrovce naměřeny pevnosti mírně vyšší než receptura se sádrovcem.

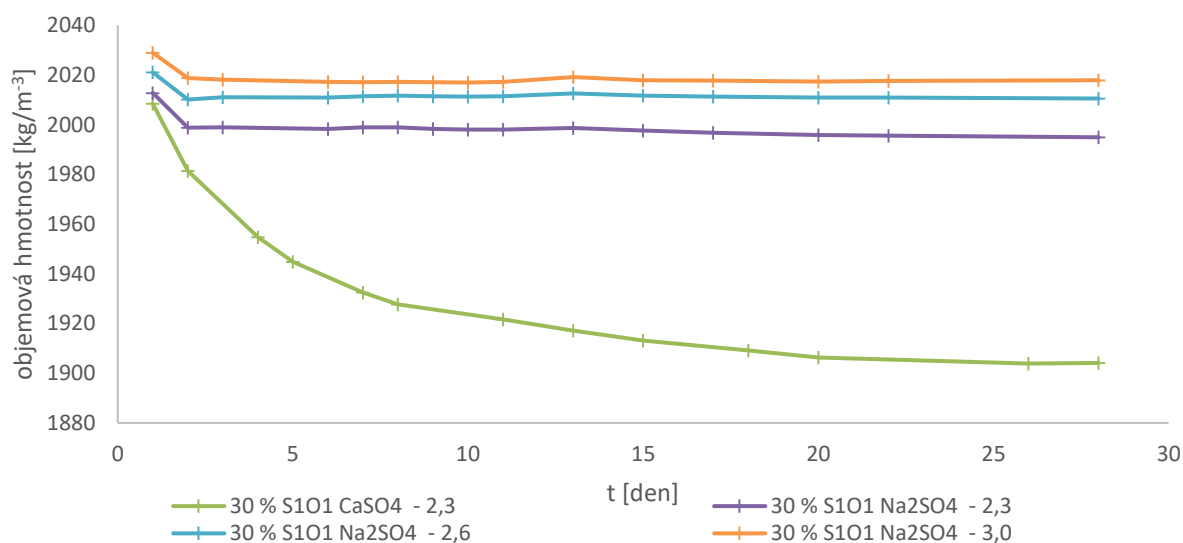


obr. 31: pevnosti v tlaku pro systém obsahující Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> jako náhradu zdroje SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iontů v systému (30 % S1O1)

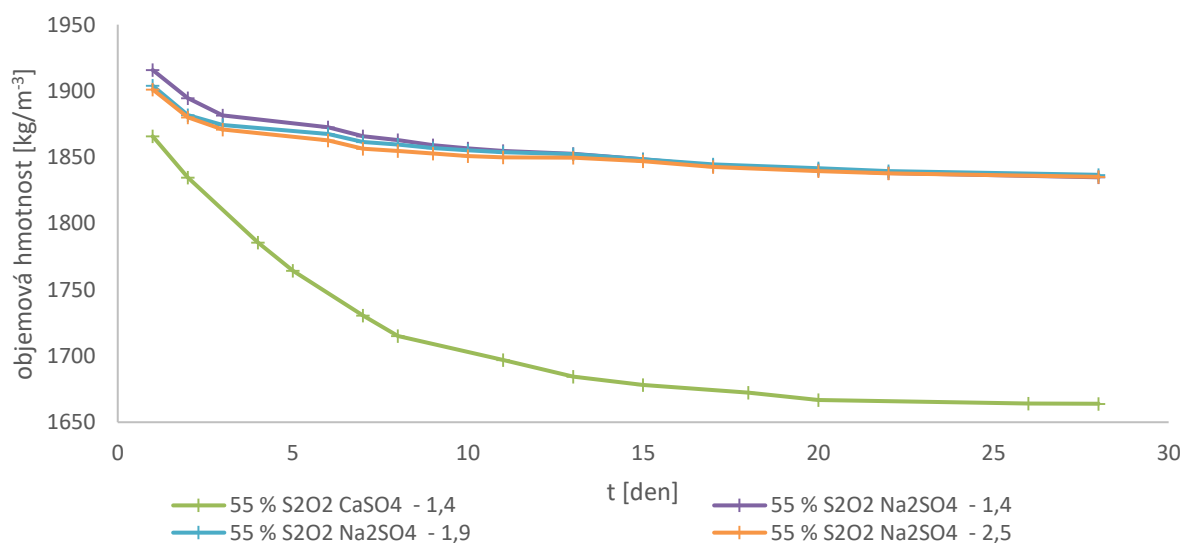


obr. 32: pevnosti v tlaku pro systém obsahující Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> jako náhradu zdroje SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iontů v systému (55 % S2O2)

Pro systém (30 % S1O1) byly naměřeny objemové hmotnosti těles se zvyšujícím se zastoupením  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a s referencí sádrovcem, výsledky jsou uvedeny v grafu na obr. 33obr. 34. Receptury obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  mají poměrně malý počáteční úbytek objemové hmotnosti asi do 2. dne, následně se objemová hmotnost víceméně ustaluje na jedné hodnotě. Na rozdíl od receptury se sádrovcem, kdy je pozorován poměrně velký úbytek objemové hmotnosti přibližně do 20. dne. I pro druhou recepturu (55 % S2O2) jsou pozorovány obdobné trendy, viz obr. 34. Změny objemových hmotností všech těles, jsou vyšší, neboť receptury obsahují vyšší procento cihelného obrusu a jsou zvýšeny nároky na záměsovou vodu i ztráty vysušením. Rozdíly mezi tělesy s různým zastoupením  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jsou velmi malé a po 11 dnech mizí.

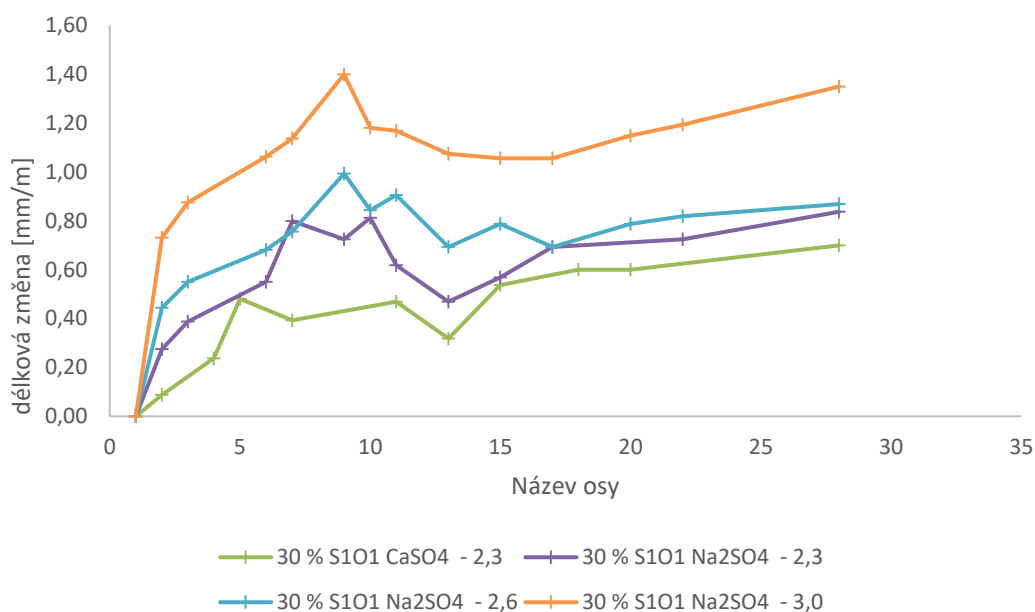


obr. 33: objemové hmotnosti pro systém obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jako náhradu zdroje  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů v systému (30 % S1O1)

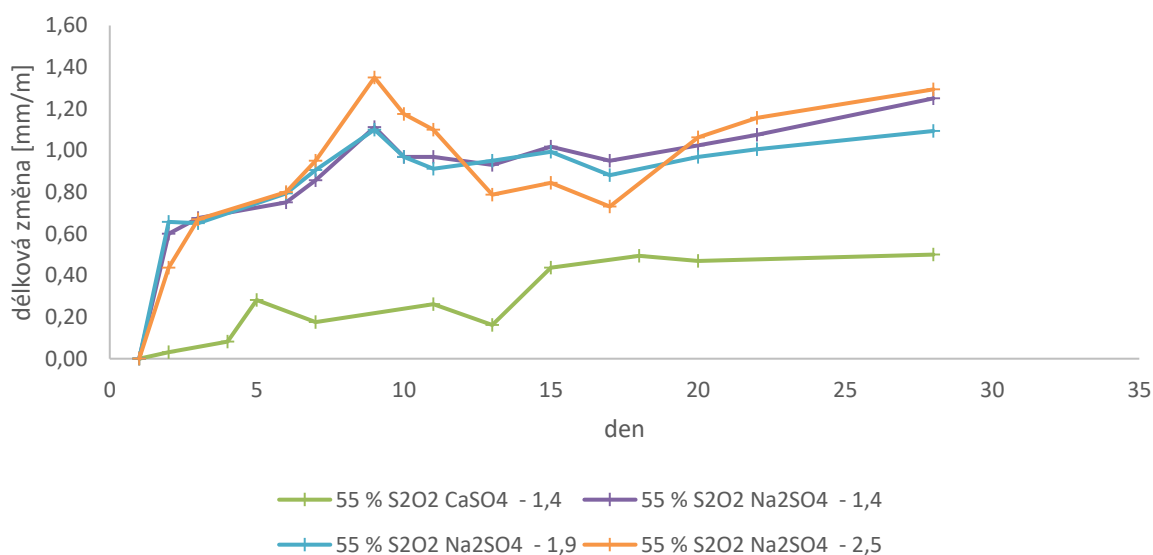


obr. 34: objemové hmotnosti pro systém obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jako náhradu zdroje  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů v systému (55 % S2O2)

Byly měřeny objemové změny zkušebních těles, pro recepturu 30 % S1O1 bylo pozorováno, že zkušební tělesa expandovala v průběhu měření. Míra nárůstu se zvyšovala se zvyšujícím se zastoupením  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  v systému, výsledky jsou uvedeny na obr. 35. Pro druhou recepturu 55 % S2O2 byly pozorovány podobné trendy délkových změn v závislosti na čase, viz obr. 36. U zkušebních těles obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  byly naměřeny větší objemové změny než u tělesa se sádrovcem. Byl u nich pozorován velký počáteční nárůst. V závislosti na různém poměru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  byly pozorovány pouze malé odlišnosti.



obr. 35: objemové změny pro systém obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jako náhradu zdroje  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů v systému (30 % S1O1)



obr. 36: objemové změny pro systém obsahující  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  jako náhradu zdroje  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů v systému (55 % S2O2)

U všech vytvořených zkušebních těles s obsahem  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  byla navýšena počáteční pevnost po 1 dni zrání. Důvodem je urychlení hydratačních reakcí, kdy rozpustnost  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  je značně vyšší než rozpustnost  $\text{CaSO}_4$  [16], takže mohou vznikat nové fáze rychleji. Pro recepturu obsahující větší množství slinku než cihelného obrusu, použití  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  snížilo naměřené pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání oproti systému s použitím sádrovce. Nicméně u receptury s menším obsahem slinku než cihelného obrusu, byly při vyšším přídávku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dosaženy pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání obdobné jako v systému se sádrovcem. Pro další práce by bylo zajímavé snížit obsah slinku, například na 20 % a možná i navýšit množství použitého aktivátoru. Dále by bylo možné použít i jiné zdroje  $\text{Na}_2\text{O}$  například  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Důvodem pro snížení objemové hmotnosti je odchod vody, což není pro systém se sádrovcem neobvyklé. Naproti tomu, systémy s obsahem  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nejeví tendenci k pouštění vody a následnému snížení objemové hmotnosti. Zdá se, že čím větší zastoupení  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , tím je voda více zadržována v testovacím tělese.

Se zvyšujícím se přídávkem  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  roste expanze zkušebních těles, což by mohlo buď v pozdějších časech, nebo při vyšších koncentracích  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  působit problémy, proto je nutné v dalších výzkumech nutně sledovat tuto vlastnost. Důvodem by mohlo být vytvoření struktury s vysokým počtem krystalově vázané vody.

Byly vytvořeny hybridní cementy, jehož mikrostruktura může být dána různými gely, které mohou mezi sebou interagovat, záleží například na pH směsi či obsahu vápníku. K potvrzení a dokonalejšímu popsání mikrostruktury by bylo možné použít infračervenou spektroskopii s Fourierovou transformací. Konkrétně intenzity píků mezi  $475$  a  $797\text{ cm}^{-1}$ , které odpovídají vazbám  $\text{Si-O-Al}$  a  $\text{SiO}_4$  tetraedru, což by mohlo napovídat rozpouštění fází z cihelného obrusu. Dále posun hlavního píku k vyšším hodnotám by mohl naznačovat tvorbu či koexistenci  $\text{C-A-S-H}$  a/ nebo  $\text{N-A-S-H}$  gelů [23],[24].

## 6 ZÁVĚR

Porovnáním připravených alternativních cementů o stejném vodním součiniteli bylo zjištěno, že čím je v systému více cihelného obrusu, tím dříve nastává počátek i konce tuhnutí. Důvodem je patrně velká porozita cihelného obrusu.

Pozorováním tepelných změn na křivkách z izotermického kalorimetru v závislosti na množství cihelného obrusu v systému, lze říci, že při zvýšení obsahu cihelného recyklátu byly dosaženy nižší hodnoty tepelného toku v hlavním hydratačním píku i celkově uvolněného hydratačního tepla po 72 hod. Porovnáním vlivu měrného povrchu cihelného obrusu, lze konstatovat, že při použití cihelného obrusu o větším měrném povrchu byly naměřeny vyšší hodnoty tepelného toku v hlavním hydratačním píku i celkově uvolněného hydratačního tepla po 72 hod. Z hlediska množství celkově uvolněného hydratačního tepla při procesu hydratace, lze usoudit, že přídavek cihelného obrusu má vliv na hydrataci připravených alternativních cementů.

Porovnáním dosažených pevností v tlaku na pastách, lze říci, že s vyšším přídavkem cihelného obrusu se pevnosti v tlaku mírně snižovaly. Dále lze říci, že použitím cihelného obrusu o větším povrchu bylo dosaženo vyšších pevností. I pevnosti v tlaku na maltách klesaly s přídavkem cihelného obrusu, nicméně vliv typu použitého cihelného obrusu (jemný, hrubý) se na pevnostech připravených tělísek projevil jen nepatrně. Což nejspíše souvisí se skutečností, že u obou zmíněných materiálů byla zjištěna obdobná pucolánová aktivita. Čím bylo zakomponováno více cihelného obrusu, tím více se objemová hmotnost výsledného tělesa snižovala, to je dáno charakterem cihelného střepu.

V práci byly rovněž studovány možnosti přípravy ternárních pojiv na bázi p-slinku, cihelného obrusu a jemně mletého ložového popílku. Při experimentech bylo zjištěno, že ve všech případech byly pevnosti v tlaku směsí s obsahem fluidního popílku vyšší, a v některých i výrazně vyšší, než u směsí bez přídavku fluidního popílku. Nejlepší směsi dosahovaly pevností v tlaku po 28 dnech zrání vyšších než 80 MPa. Lze tedy konstatovat, že tento směr by mohl být perspektivní a neměl by být v budoucnu opomíjen.

V práci byly rovněž odzkoušeny možnosti náhrady síranu vápenatého síranem sodným ve studovaném pojivovém systému portlandský slínek - cihelný obrus. Bylo zjištěno, že ve směsích, kde je obsah p-slinku nižší než obsah cihelného recyklátu, jsou pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání srovnatelné nebo při navýšených přídavcích síranu sodného vyšší než u srovnávací směsi s obsahem síranu vápenatého. Oproti tomu, je-li obsah p-slinku ve směsích s přídavkem síranu sodného vyšší, než obsah cihelného obrusu je tento trend opačný a pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání u všech testovaných směsí jsou cca o třetinu nižší než srovnávací směs s obsahem síranu vápenatého. Při testech na směsích s přídavkem síranu sodného bylo dosaženo pevností v tlaku téměř 50 MPa ve směsích s vysokým obsahem p-slinku a více než 30 MPa u směsí s nízkým obsahem slinku.

Celkově lze říci, že dosažené výsledky jsou velice dobré a cihelný recyklát by mohl být alternativou pro přípravu cementů s označením CEM IV.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

p-sínek	Portlandský sínek
T	Teplota
C	CaO
S	SiO <sub>2</sub>
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
H	H <sub>2</sub> O
N	Na
AS <sub>2</sub>	Metakaolinit
C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	Tetrakalciumaluminát hydrát
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	Trikalciumaluminát hydrát
C <sub>2</sub> ASH <sub>8</sub>	Gehlenit hydrát
CH	Hydroxid vápenatý
C <sub>3</sub> S	Trikalciumsilikát
C <sub>2</sub> S	Dikalciualuminát
C <sub>3</sub> A	Trikalciumaluminát
C <sub>4</sub> AF	Tetrakalciumaluminát ferrit
3CŜH <sub>2</sub>	Sádrovec
C <sub>6</sub> AŜ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	Ettringit
C <sub>3</sub> AŜH <sub>12</sub>	Monosulfát
C-S-H gel	Hydrosilikátový gel

## 8 LITERATURA

- [1] ROSLING, Hans, Ola ROSLING a Anna ROSLING RÖNNLUND. *Faktomluva: deset důvodů, proč se mýlíme v pohledu na svět - a proč jsou věci lepší, než vypadají*. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2018. Pod povrchem. ISBN 978-80-7555-056-9.
- [2] WONG, Chee lum, Kim hung MO, Soon poh YAP, U. johnson ALENGARAM a Tung-chai LING. Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2018, **195**, 226-239 [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.193. ISSN 0959-6526.
- [3] Produkce odpadů v roce 2017. In <https://www.czso.cz> [online]. 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/61546956/2800201801.pdf/5d1273c1-bc3a-4ce0-8b90-cfde1dd6605c?version=1.2>
- [4] Produkce minerálních stavebních a demoličních odpadů v roce 2017. In <https://www.czso.cz> [online]. 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/61546956/2800201810.pdf/1b32188d-3cd1-4ba2-8950-9db42f946252?version=1.1>
- [5] Plán odpadového hospodaření ČR. In [www.mzp.cz](http://www.mzp.cz) [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/plan\\_odpadoveho\\_hospodarstvi\\_cr](https://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr)
- [6] GE, Zhi, Zhili GAO, Renjuan SUN a Li ZHENG. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2012, **31**, 289-293 [cit. 2019-04-04]. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002. ISSN 0950-0618.
- [7] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] ČSN 197-1 (72 2101). *Cement: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ANONYMOUS. Cement Manufacturing: The History, The Process. *Cement Americas* [online]. Denver: Mining Media International, 2012, , 2 [cit. 2019-01-08]. ISSN 15335178. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1019719831/>
- [10] STEHLÍK, Michal a Vlastimil BÍLEK. *Building materials*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 171 s. : il. ISBN 802142544X.
- [11] SVAZU VÝROBCŮ BETONU. Výroba betonu. <http://www.ebeton.cz> [online]. 2018, [cit. 08-01-2019]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/vyroba-cementu>
- [12] ŠOUKAL, František. Speciální technologie maltovin. [www.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz) [online]. 2018, [cit. 08-01-2019]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/course/view.php?id=197666>
- [13] HAIMEI, Zhang. Cement. *Building Materials in Civil Engineering* [online]. Woodhead Publishing, 2011, , 1-2 [cit. 2019-01-09]. ISBN 9781845699550. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpBMCE0001/id:kt00918M76/building-materials-in/cement-2?kpromoter=Summon>
- [14] ŠATAVA, Vladimír. *Fyzikální chemie silikátů I*. Praha: VŠCHT, 1991, 272 s. ISBN 80-7080-119-0.
- [15] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. Brno: PC-DIR, 1993. ISBN 80-214-0509-0.

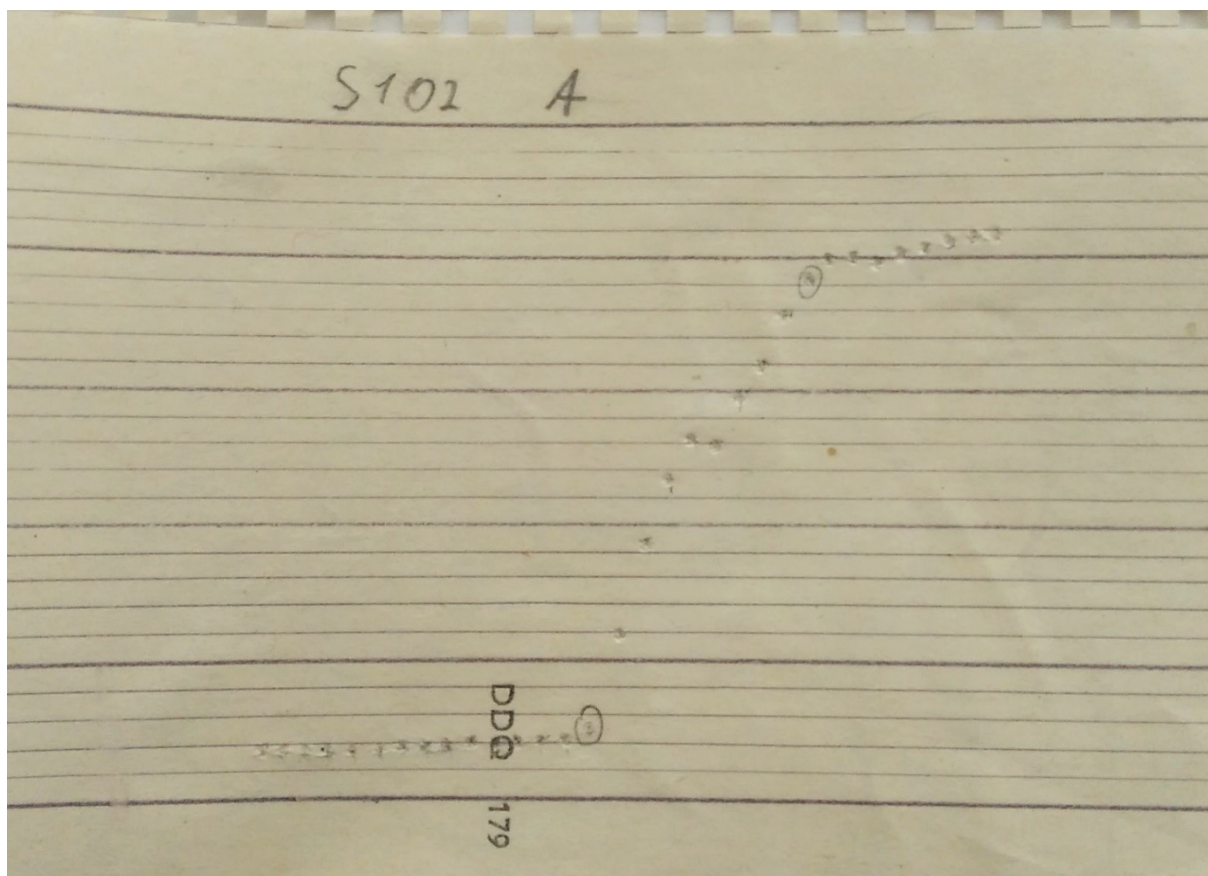
- [16] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [17] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [18] HANISKOVÁ, Denisa, Eva BARTONÍČKOVÁ, Jan KOPLÍK a Tomáš OPRAVIL. The Ash from Fluidized Bed Combustion as a Donor of Sulfates to the Portland Clinker. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2016, **151**(C), 394-401 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.392. ISSN 1877-7058.
- [19] European Committee for Standardization. European standard: Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria. EN 450-1:2005 E. 2005
- [20] ŠILER, Pavel, Petr BAYER, Tomáš SEHNAL, Iva KOLÁŘOVÁ, Tomáš OPRAVIL a František ŠOUKAL. Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2015, **78**, 181-188 [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.032. ISSN 0950-0618.
- [21] SHI, Caijun, P. V. KRIVENKO a D. M. ROY. *Alkali-activated cements and concretes*. New York, 2006. ISBN 04-157-0004-3.
- [22] DONATELLO, Shane, Ana FERNÁNDEZ-JIMENEZ a Angel PALOMO. Very High Volume Fly Ash Cements. Early Age Hydration Study Using Na 2 SO 4 as an Activator. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 2013, **96**(3), 900-906 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1111/jace.12178. ISSN 0002-7820.
- [23] ROBAYO, Rafael a., Alexandra MULFORD, Jorge MUNERA a Ruby MEJÍA DE GUTIÉRREZ. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2016, **128**, 163-169 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023. ISSN 0950-0618.
- [24] PALOMO, A, P KRIVENKO, I GARCIA-LODEIRO, E KAVALEROVA, O MALTSEVA a A FERNANDEZ-JIMENEZA. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales De Construccion* [online]. INST CIENCIAS CONSTRUCCION EDUARDO TORROJA, 2014, **64**(315) [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.3989/mc.2014.00314. ISSN 0465-2746.
- [25] DROCHYTKA, Rostislav a Jiří BYDŽOVSKÝ. *VADY A PORUCHY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH VLIV NA STANOVENÍ SLEVY Z DÍLA: Přednáška na konferenci znalců ÚSI VUT v Brně* [online]. In: . 2004, s. 6 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-01-50-55.pdf>
- [26] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-
- [27] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-4234-3.
- [28] PYTLÍK, Petr. *Cihlářství*. Brno: CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0612-7.
- [29] KUBLIHA, Marian;trnovcová. Comparison of dehydration in kaolin and illite using DC conductivity measurements. *Applied Clay Science* [online]. Elsevier B.V, 2017, **149**, 8-12 [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.1016/j.clay.2017.08.012. ISSN 0169-1317.

- [30] Svepomoci.cz. Cihly HELUZ – jak se vyrábí cihly HELUZ v cihelně Hevlín. *heluz.cz* [online]. 2016-11-21 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z <http://www.heluz.cz/cs/video-jak-se-vyrabi-nase-cihly>
- [31] Jak se vyrábějí pálené cihly HELUZ. In: Vše pro váš dům [online]. 2008 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.vseprovasdum.cz/jak-se-vyrabeji-palene-cihly-heluz.html>
- [32] Výpal a slinování. In *vscht.cz* [online]. 2013 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic\\_Technology/SM-Lect-4-C.pdf](http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-4-C.pdf)
- [33] Oxid křemičitý. In: *www.tiscali.cz* [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: [www.tiscali.cz](http://www.tiscali.cz)
- [34] Antuka – výroba a prodej. In <https://cihelna.hrabcuk.cz> [online] 2019 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://cihelna.hrabcuk.cz/cs/antuka>
- [35] Výroba a složení. In <https://www.antuka.com> [online] 2019 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.antuka.com/vyroba-a-slozeni/>
- [36] YAHYA, Khairulzan, Halim BOUSSABAINÉ a Ali nasser ALZAED. Using life cycle assessment for estimating environmental impacts and eco-costs from the metal waste in the construction industry. *Management of Environmental Quality: An International Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2016, **27**(2), 227-244 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1108/MEQ-09-2014-0137. ISSN 1477-7835.
- [37] MCGINNIS, Michael, Mark DAVIS, Andres DE LA ROSA, Brad WELDON a Yahya KURAMA. Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research* [online]. London: ICE Publishing, 2017, **69**(23), 1203-1211 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1680/jmacr.16.00338. ISSN 00249831. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2059588042/>
- [38] DEBIEB, Farid a Said KENAI. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2008, **22**(5), 886-893 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013. ISSN 0950-0618.
- [39] BAZAZ, Jafar bolouri a Mahmood KHAYATI. Properties and performance of concrete made with recycled low-quality crushed brick.(Author abstract)(Report). *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. American Society of Civil Engineers, 2012, **24**(4), 330 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000385. ISSN 0899-1561.
- [40] O'FARRELL, M., B.b. SABIR a S. WILD. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2006, **28**(9), 790-799 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014. ISSN 0958-9465.
- [41] OLOFINNADE, Oluwarotimi m, Anthony n EDE, Julius m NDAMBUKI a Gideon o BAMIGBOYE. Structural Properties of Concrete Containing Ground Waste Clay Brick Powder as Partial Substitute for Cement. *Materials Science Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2016, **866**, 63-67 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.866.63. ISSN 0255-5476.
- [42] KIRGIZ, Mehmet. Strength gain mechanisms of blended-cements containing marble powder and brick powder. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. Heidelberg: Korean Society of Civil Engineers, 2015, **19**(1), 165-172 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1007/s12205-014-0557-4. ISSN 1226-7988.
- [43] NAVRÁTILOVÁ, Eva a Pavla ROVNANÍKOVÁ. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building*

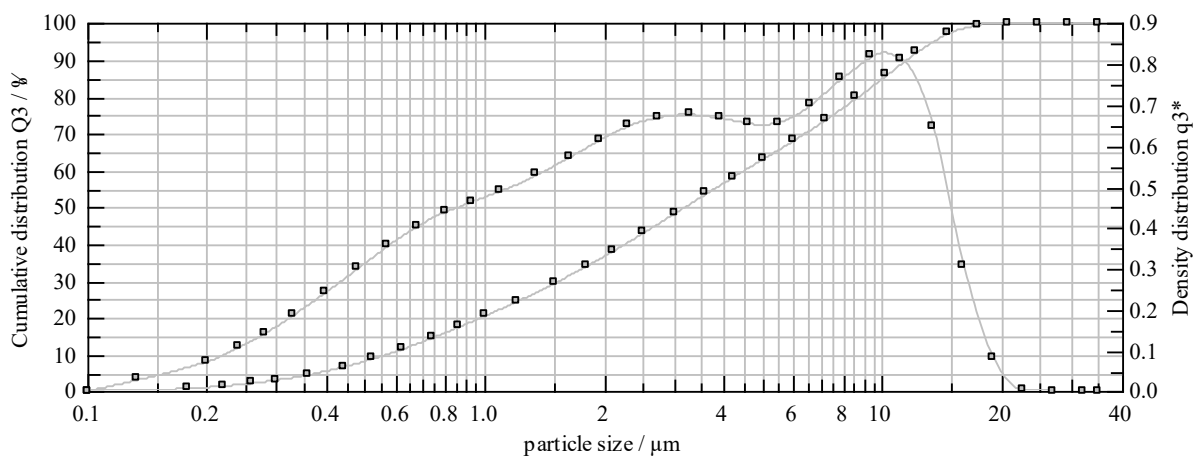
- Materials* [online]. Elsevier, 2016, **120**, 530-539 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062. ISSN 0950-0618.
- [44] ZHENG, Li, Zhi GE, Zhan yong YAO, Ren juan SUN a Jun gui DONG. The Properties of Concrete with Recycled Clay-Brick-Powder. *Applied Mechanics and Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2011, **99**, 826-831 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.826. ISSN 1660-9336.
- [45] WILD, S., A. GAILIUS, H. HANSEN, L. PEDERSON a J. SZWABOWSKI. Pozzolanic properties of a variety of European clay bricks. *Building Research & Information* [online]. Taylor & Francis Group, 1997, **25**(3), 170-175 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1080/096132197370435. ISSN 0961-3218.
- [46] NACERI, Abdelghani. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* [online]. 2009, **29**(8) [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.03.026. ISSN 0956-053X.
- [47] LIN, Kae-long, Bor-yann CHEN, Chyow-san CHIOU a An CHENG. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement. *Waste Management & Research* [online]. London, England: SAGE Publications, 2010, **28**(7), 647-652 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1177/0734242X09355853. ISSN 0734-242X.
- [48] KHAN, M., M. JAMIL, M. KARIM, M. ZAIN a A. KAISH. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. Seoul: Korean Society of Civil Engineers, 2017, **21**(1), 274-284 [cit. 2019-04-08]. DOI: 10.1007/s12205-016-0737-5. ISSN 1226-7988.
- [49] BARONIO, Giulia a Luigia BINDA. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*[online]. Elsevier, 1997, **11**(1), 41-46 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/S0950-0618(96)00032-3. ISSN 0950-0618.
- [50] FERNANDEZ, Rodrigo. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, **41**(1) [cit. 2019-04-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013. ISSN 0008-8846.
- [51] AVET, François, Ruben SNELLINGS, Adrian ALUJAS DIAZ, Mohsen BEN HABA a Karen SCRIVENER. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2016, **85**, 1-11 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.02.015. ISSN 0008-8846.
- [52] BERODIER, E. a K. SCRIVENER. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 2014, **97**(12), 3764-3773 [cit. 2019-04-08]. DOI: 10.1111/jace.13177. ISSN 0002-7820.
- [53] Fyzikálně-mechanická analýza. In: Centrum materiálového výzkumu [online]. 2011 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cs/vybaveni>
- [54] Laser Diffraction. In: Sympatec.com [online]. 2019 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/glossary/laser-diffraction/>
- [55] ŠILER, Pavel, Iva KOLÁŘOVÁ a Halina SZKLORZOVÁ. *Instrumentation in materials engineering*. Brno, 2015.
- [56] ČSN 72 2080. Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [57] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [58] Technický list: Zkušební pracoviště BS-3310. In: Betonsystem [online]. 2003 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.betonsystem.cz/PDF/TL%20DESTTEST%203310.pdf>
- [59] LERCH, William. The influence of gypsum on hydration and properties of portland cement pastes. In: *American society for testing materials*. Philadelphia, 1946, s. 42.
- [60] NOVOTNÝ, Radoslav, Eva BARTONÍČKOVÁ, Jiří ŠVEC a Miroslava MONČEKOVÁ. Influence of Active Alumina on the Hydration Process of Portland Cement. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2016, **151**, 80-86 [cit. 2019-04-24]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.383. ISSN 1877-7058.
- [61] ČSN EN 196-9 (72 2100). *Metody zkoušení cementu – část 9: stanovení hydratačního tepla – Semiadiabatická metoda*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [62] ČSN EN 196-5 (72 2100). *Metody zkoušení cementu – část 5: zkoušení pucolinty pucolánových cementů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [63] NACERI, Abdelghani. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* [online]. 2009, **29**(8) [cit. 2019-04-22]. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.03.026. ISSN 0956-053X.
- [64] TUŠLA, V. Možnosti využití cihelného obrusu v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017 48 s..

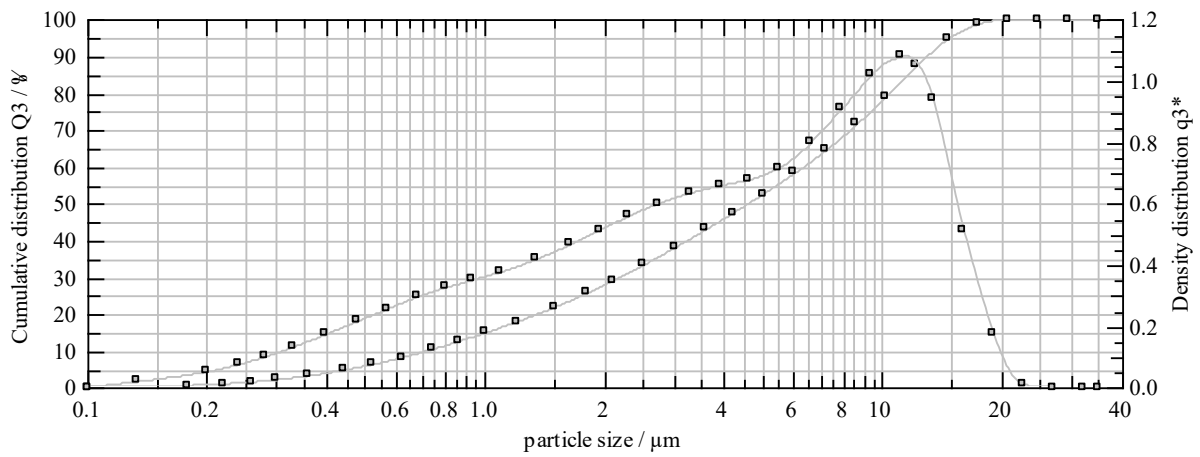
## 9 PŘÍLOHY



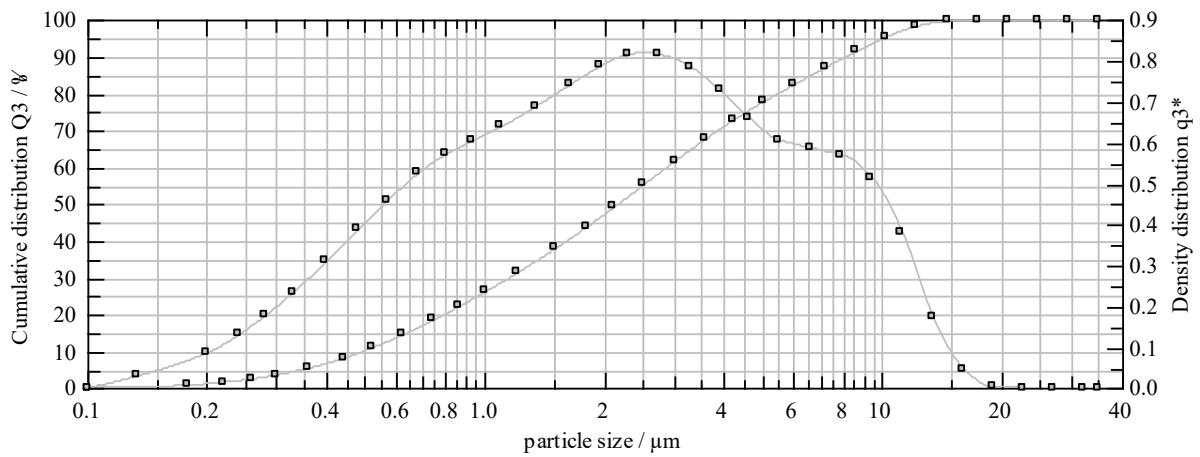
obr. 37: vyhodnocení záznamu měření počátku a konce tuhnutí pomocí automatického Vicatova přístroje



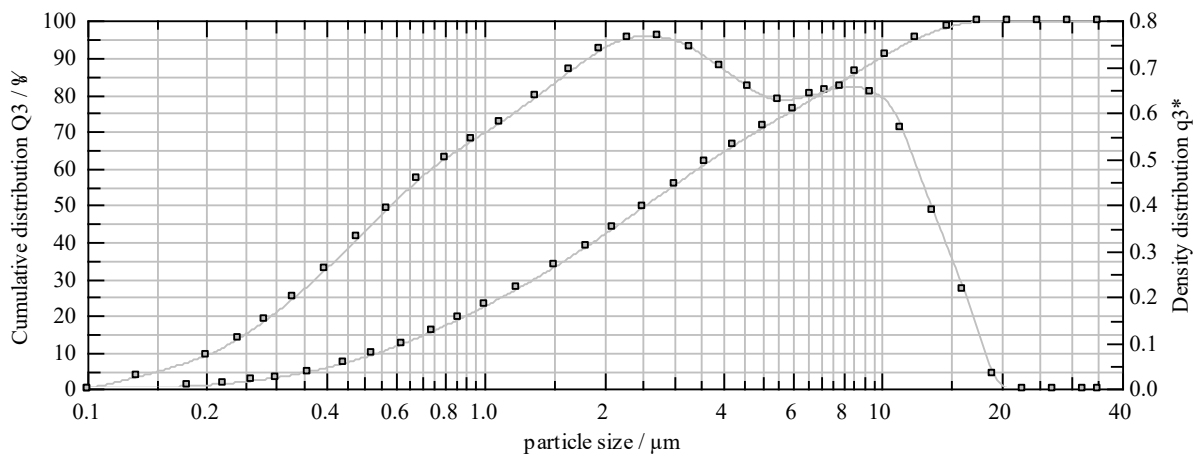
obr. 38: rozložení distribuce velikosti částic pro slínek s větším povrchem



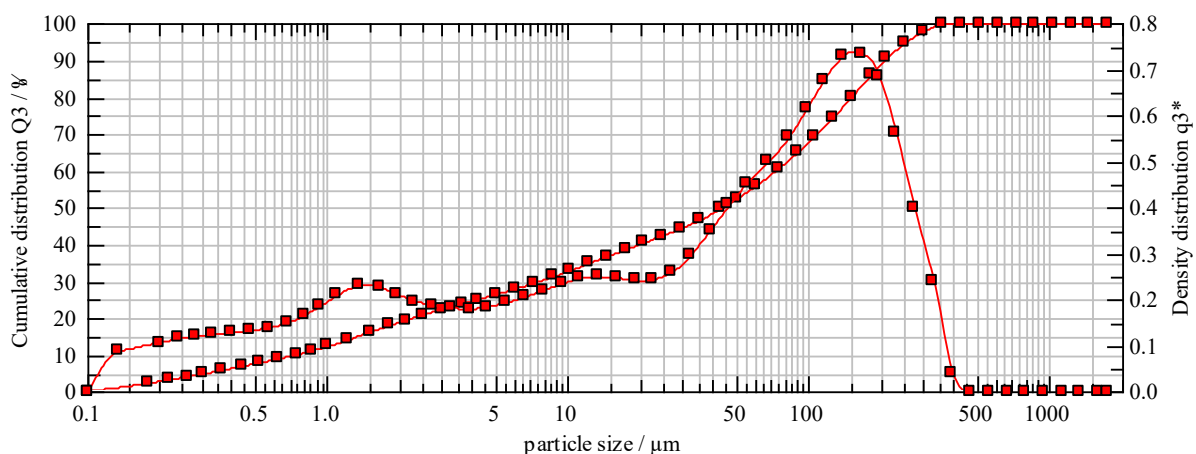
obr. 39: rozložení distribuce velikosti částic pro slínek s menším povrchem



obr. 40: rozložení distribuce velikosti částic pro cihelný obrus s větším povrchem



obr. 41: rozložení distribuce částic pro cihelný obrus s menším povrchem



obr. 42: rozložení distribuce částic pro mletý fluidní popílek

tab. 20: vybrané hodnoty popisující kalorimetrickou křivku a hydratační tepla pro recepturu S5O5

	1 [hod]	2 [hod]	3 [mW/g]	4 [hod]	5 [hod]	41 hod [J/g]	72 hod [J/g]
S5	3,1	11,6	2,19734	17,1		204	241
10 % S5O5	3,2	11,4	2,168753	18,2	-	198	231
20 % S5O5	3,2	11,2	2,025551	20,4	-	194	228
30 % S5O5	3,3	11,1	1,829194	24,5	-	179	211
40 % S5O5	3,4	10,6	1,642195	26,0	-	160	189
55 % S5O5	3,9	10,6	1,261747	-	-	122	152
60 % S5O5	4,0	10,7	1,081443	-	-	108	136

tab. 21: počátek a konec tuhnutí

	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	S1 O1	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	S1 O2	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
S1	187	277	A	142	282	A	175	265
S2	243	333	B	134	237	B	152	250
			C	121	241	C	110	220
			D	86	226	D	118	248
			E	83	223	E	113	223
			F	78	188	F	88	208
S5 O5	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	S2 O1	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	S2 O2	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
A	226	306	A	170	280	A	206	326
B	162	282	B	184	274	B	212	302
C	119	219	C	158	268	C	208	278
D	116	256	D	95	255	D	168	276
E	114	234	E	75	219	E	143	243
F	91	201	F	78	215	F	88	238

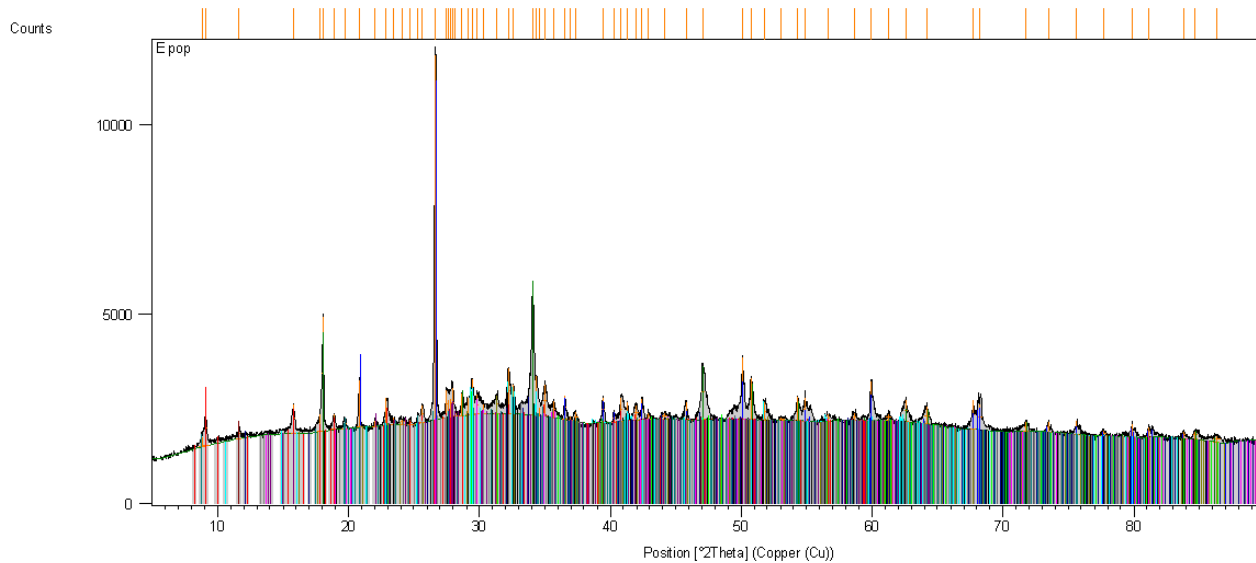
tab. 22: výsledky měření pevnosti v tlaku pro pasty složené z cementu a cihelného obrusu

S1O1 pevnosti v tlaku [MPa]								
měření	čas [dny]	S1	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %
a	1	25,1	24,2	20,1	16,0	10,8	5,6	4,6
b		26,1	28,0	24,6	17,4	11,1	6,2	4,9
<b>průměr</b>		<b>25,6</b>	<b>26,1</b>	<b>22,4</b>	<b>16,7</b>	<b>11,0</b>	<b>5,9</b>	<b>4,8</b>
a	2	59,7	40,1	36,2	30,6	22,8	13,0	8,7
b		59,1	43,0	41,6	30,3	20,7	14,2	10,5
<b>průměr</b>		<b>59,4</b>	<b>41,5</b>	<b>38,9</b>	<b>30,5</b>	<b>21,7</b>	<b>13,6</b>	<b>9,6</b>
a	28	75,9	69,1	69,6	60,5	45,2	35,6	30,1
b		76,1	63,3	64,1	60,2	51,6	39,9	34,3
<b>průměr</b>		<b>76,0</b>	<b>66,2</b>	<b>66,8</b>	<b>60,4</b>	<b>48,4</b>	<b>37,7</b>	<b>32,2</b>
S1O2 pevnosti v tlaku [MPa]								
měření	čas [dny]	S1	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %
a	1	25,1	21,7	17,4	13,9	8,9	4,3	3,3
b		26,1	26,3	24,5	15,2	8,6	4,6	3,5
<b>průměr</b>		<b>25,6</b>	<b>24,0</b>	<b>20,9</b>	<b>14,5</b>	<b>8,7</b>	<b>4,4</b>	<b>3,4</b>
a	2	59,7	44,6	37,7	26,6	21,1	9,9	8,7
b		59,1	46,7	38,2	31,3	21,1	10,0	8,2
<b>průměr</b>		<b>59,4</b>	<b>45,6</b>	<b>38,0</b>	<b>28,9</b>	<b>21,1</b>	<b>10,0</b>	<b>8,4</b>
a	28	75,9	56,3	64,0	51,6	42,3	27,2	28,2
b		76,1	65,7	66,3	58,4	49,3	33,3	31,3
<b>průměr</b>		<b>76,0</b>	<b>61,0</b>	<b>65,1</b>	<b>55,0</b>	<b>45,8</b>	<b>30,2</b>	<b>29,7</b>
S2O1 pevnosti v tlaku [MPa]								
měření	čas [dny]	S2	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %
a	1	17,9	17,4	14,5	10,0	7,7	3,8	3,2
b		17,8	18,1	14,0	10,9	7,2	3,6	3,0
<b>průměr</b>		<b>17,8</b>	<b>17,8</b>	<b>14,2</b>	<b>10,5</b>	<b>7,4</b>	<b>3,7</b>	<b>3,1</b>
a	2	48,3	40,0	31,5	27,2	18,5	8,5	7,0
b		45,1	38,4	35,7	24,6	19,0	8,7	8,3
<b>průměr</b>		<b>46,7</b>	<b>39,2</b>	<b>33,6</b>	<b>25,9</b>	<b>18,7</b>	<b>8,6</b>	<b>7,6</b>
a	28	67,7	66,0	50,9	53,5	44,3	31,6	29,7
b		69,5	68,2	60,7	54,4	48,3	34,6	27,9
<b>průměr</b>		<b>68,6</b>	<b>67,1</b>	<b>55,8</b>	<b>54,0</b>	<b>46,3</b>	<b>33,1</b>	<b>28,8</b>

<b>S2O2 pevnosti v tlaku [MPa]</b>									
měření	čas [dny]	S2	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %	
a	1	17,92	13,97	13,72	10,36	5,79	2,86	2,06	
b		17,75	13,96	15,81	9,88	6,05	2,88	2,41	
<b>průměr</b>		<b>17,84</b>	<b>13,97</b>	<b>14,77</b>	<b>10,12</b>	<b>5,92</b>	<b>2,87</b>	<b>2,24</b>	
a	2	48,28	37,14	27,98	19,47	11,90	6,25	5,2	
b		45,14	40,52	26,91	19,88	12,22	6,67	4,85	
<b>průměr</b>		<b>46,71</b>	<b>38,83</b>	<b>27,45</b>	<b>19,68</b>	<b>12,06</b>	<b>6,46</b>	<b>5,03</b>	
a	28	67,72	58,56	52,78	41,38	32,51	24,19	20,52	
b		69,49	55,75	54,95	43,65	35,60	24,5	23,02	
<b>průměr</b>		<b>68,61</b>	<b>57,16</b>	<b>53,87</b>	<b>42,52</b>	<b>34,06</b>	<b>24,35</b>	<b>21,77</b>	
<b>S5O5 pevnosti v tlaku [MPa]</b>									
měření	čas [dny]	S1	S2	10 %	20 %	30 %	40 %	55 %	60 %
a	1	25,05	17,92	21,14	17,63	12,82	8,31	4,37	3,18
b		26,14	17,75	20,69	19,71	13,30	9,63	4,5	3,31
<b>průměr</b>		<b>25,60</b>	<b>17,84</b>	<b>20,92</b>	<b>18,67</b>	<b>13,06</b>	<b>8,97</b>	<b>4,44</b>	<b>3,25</b>
a	2	59,74	48,28	42,46	33,71	24,67	17,29	9,76	6,59
b		59,05	45,14	40,46	31,64	26,79	15,74	10,80	7,27
<b>průměr</b>		<b>59,40</b>	<b>46,71</b>	<b>41,46</b>	<b>32,68</b>	<b>25,73</b>	<b>16,52</b>	<b>10,28</b>	<b>6,93</b>
a	28	75,94	67,72	68,58	55,38	47,41	47,41	37,3	29,04
b		76,06	69,49	62,93	63,88	54,47	42,31	37,39	30,64
<b>průměr</b>		<b>76,00</b>	<b>68,61</b>	<b>65,76</b>	<b>59,63</b>	<b>50,94</b>	<b>44,86</b>	<b>37,35</b>	<b>29,84</b>

tab. 23: průměrné pevnosti v tlaku malt

čas [den ]	S1	S2	S5 O5		S2 O2			S2O1		
1	14,37	8,01	5,52	3,06	4,93	3,99	1,42	10,44	3,94	
2	26,61	18,75	13,83	7,40	14,48	10,95	3,27	18,84	10,42	
7	39,65	33,89	24,26	15,82	21,14	18,93	8,50	32,18	16,20	
28	48,91	40,03	33,21	22,87	33,91	32,11	16,24	36,09	21,54	
čas [den ]						S1O2		S1O1		
1						12,84	7,53	2,78	16,19	6,24
2						23,52	17,89	5,68	26,36	13,69
7						38,01	28,44	13,29	37,66	22,54
28						43,33	37,64	20,93	42,42	25,74



Peak list
SiO <sub>2</sub> : Silicon Oxide, Quartz, SQ: 31 [%], Hexagonal, P3121
Ca(OH) <sub>2</sub> : Calcium Hydroxide, Portlandite, syn, SQ: 11 [%], Hexagonal, P-3m1
Ca <sub>6</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>25</sub> ·7H <sub>2</sub> O: Calcium Aluminum Hydroxide Sulfate Hydrate, Frringite, SQ: 10 [%], Hexagonal, P31c
(Mg <sub>0.667</sub> Al <sub>0.333</sub> )(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0.167</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>0.5</sub> : Magnesium Aluminum Hydroxide Carbonate Hydrate, Hydrotalcite, syn, SQ: 2 [%], Rhombohedral, R-3m
Ca <sub>2</sub> (Mg <sub>0.5</sub> Al <sub>0.5</sub> )(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0.167</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>0.5</sub> : Calcium Magnesium Aluminum Hydroxide Carbonate Hydrate, Hydrotalcite, syn, SQ: 2 [%], Rhombohedral, R-3m
Ca <sub>2</sub> (Mg <sub>0.85</sub> Al <sub>0.15</sub> )(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0.167</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>0.5</sub> : Calcium Magnesium Aluminum Hydroxide Carbonate Hydrate, Augite, SQ: 4 [%], Monoclinic, C2/c
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ): Sodium Aluminum Silicate, Albite, SQ: 7 [%], Anorthic, C-1
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ): Calcium Silicate, Larnite, SQ: 8 [%], Monoclinic, P21/n
(K <sub>0.82</sub> Na <sub>0.18</sub> )(Fe <sub>0.03</sub> Al <sub>0.97</sub> )(AlSi <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> : Potassium Sodium Iron Aluminum Silicate Hydroxide, Muscovite, ZIMRGS#, SQ: 9 [%], Monoclinic, C2/c
Ca <sub>2</sub> (Mg <sub>0.6</sub> Al <sub>0.4</sub> )(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0.167</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>0.5</sub> : Calcium Magnesium Aluminum Hydroxide Carbonate Hydrate, Augite, SQ: 2 [%], Tetragonal, P-421m
Ca <sub>2</sub> (Mg <sub>0.6</sub> Al <sub>0.4</sub> )(OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0.167</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>0.5</sub> : Calcium Magnesium Aluminum Hydroxide Carbonate Hydrate, Augite, SQ: 2 [%], Tetragonal, P-421m
Ca <sub>2</sub> FeAlO <sub>5</sub> : Calcium Iron Aluminum Oxide, Birnessite, SQ: 2 [%], Orthorhombic, Ibm2
CaCO <sub>3</sub> : Calcium Carbonate, Calcite, syn, SQ: 2 [%], Rhombohedral, R-3c
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Iron Oxide, Hematite, syn, SQ: 1 [%], Rhombohedral, R-3c

obr. 43: fázové složení směsi 20 % S2SO2 s obsahem 35 % fluidního ložového popílku, po 1. hydratace