



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ LEHKÉHO UMĚLÉHO  
KAMENIVA NA BÁZI SPÉKANÝCH  
VYSOKOTEPLTNÍCH POPÍLKŮ V TEPELNĚ  
ODOLNÝCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH**

POSSIBILITIES OF USING LIGHT ARTIFICIAL AGGREGATE BASED ON SINTERED HIGH-TEMPERATURE FLY ASH IN HEAT-RESISTANT CONCRETE STRUCTURES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

Tomáš Mazán

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. KLÁRA KŘÍŽOVÁ, Ph.D.

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**BRNO 2021**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Tomáš Mazán
<b>Název</b>	Možnosti využití lehkého umělého kameniva na bázi spékaných vysokoteplotních popílků v tepelně odolných betonových konstrukcích
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Klára Křížová, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

## PODKLADY A LITERATURA

Odborné tuzemské i zahraniční časopisy, sborníky z tematických konferencí a symposií a internetové odkazy z daného oboru. Doporučeny jsou zejména: sciencedirect. com, normy ČSN, Beton TKS, apod.

[1] Georges Roufael, Anne-Lise Beaucour, Javad Eslami, Dashnor Hoxha, Albert Noumowé. Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures, 2020.

[2] David Suescum-Morales, José D.Ríos, Antonio Martínez-De La Concha, Héctor Cifuentes, José Ramón Jiménez, José M. Fernández. Effect of moderate temperatures on compressive strength of ultra-high-performance concrete: A microstructural analysis, 2020.

[3] Mehrdad Abdi Moghadam, Ramezan Aliizadifard. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures, 2020.

[4] Fahad K. Alqahtani, Idrees Zafar. Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete, 2020.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Odolnost betonu vysokým teplotám je zásadní z pohledu navrhování specifických betonových konstrukcí, které mohou být v budoucnu vystaveny teplotnímu zatížení. Pro zvýšení odolnosti betonů vůči vysokým teplotám je zásadní komplexně posoudit vhodnost návrhu složení se zaměřením se na všechny vstupní suroviny.

Cílem bakalářské práce je posoudit možnost využití lehkého umělého kameniva na bázi vysokoteplotních popílků, tzv. Agloporitu v betonech vystavených krátkodobému teplotnímu zatížení dosahující teplot až 1000°C.

1. Na základě studia odborných periodik zpracovat nejnovější poznatky ve výrobě lehkého umělého kameniva na bázi spékaných popílků a jeho aplikace.
2. Z pohledu řešerší se zaměřit na oblast odolnosti betonů vystavených vysokým teplotám a definovat jednotlivé možnosti, jak snížit riziko destrukce betonů.
4. Navrhnout základní metodický postup výroby betonů s použitím lehkého umělého kameniva Agloporit.
5. Navrhnout a experimentálně ověřit soubor betonů v porovnání s referenční směsí. Ověřit základní fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu (objemová hmotnost ztvrdlého betonu, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem) a odolnost vůči vysoké teplotě.
6. Ze získaných výsledků optimalizovat sestavené receptury betonů pro dosažení zvýšené odolnosti v případě vystavení krátkodobému teplotnímu zatížení.

Předpokládaný rozsah bakalářské práce 40- 50 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca popisuje súčasný stav poznania výskumu a vývoja v oblasti tepelne odolných betónových konštrukcií s použitím kameniva na báze pórovitého kameniva zo spečených popolčekov. Teoretická časť predstavuje výrobu a základné vlastnosti kameniva Agloporit. Ďalej sú uvedené zásady použitia pre jednotlivé vstupné suroviny ľahkých betónov. Uvedená je taktiež problematika teplotného zaťažovania s vplyvom na betónové konštrukcie a jednotlivé materiály. Experimentálna časť sa zaoberá vplyvom množstva ľahčeného kameniva na odolnosť voči vysokým teplotám. Záver práce sa venuje vyhodnoteniu získaných výsledkov a zostaveniu optimálnej receptúry LWAC, ktorá by bola schopná odolávať krátkodobému tepelnému zaťaženiu.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Popolček, Agloporit, pórovité kamenivo, ľahký betón, teplotné zaťažovanie, odolnosť voči vysokým teplotám, pevnosť v tlaku

## **ABSTRACT**

The final thesis describes contemporary knowledge of research and development in the area of the heat-resistant concrete constructions with using porous aggregate from flying ash. The theoretical part introduces the production and the agloporit aggregate basic features. The principles of using in the incoming materials of light weight concrete are presented next. The thermal loading with influence at concrete constructions and the other individual materials is also mentioned in the final thesis. The experimental part of the thesis deals with the impact of lightweight aggregate quantity on the high temperature resistance. Conclusion pays attention to the obtained results evaluation and to the composition an optimal formula LWAC, which could be able to resist short-term thermal loading.

## **KEYWORDS**

Flying ash, Agloporit, porous agregate, light weight concrete, thermal loading, high temperature resistance, compressive strenght

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Tomáš Mazán *Možnosti využití lehkého umělého kameniva na bázi spékaných vysokoteplotních popílků v tepelně odolných betonových konstrukcích*. Brno, 2021. 56 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Možnosti využití lehkého umělého kameniva na bázi spékaných vysokoteplotních popílků v tepelně odolných betonových konstrukcích* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Tomáš Mazán  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Možnosti využití lehkého umělého kameniva na bázi spékaných vysokoteplotních popílků v tepelně odolných betonových konstrukcích* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Tomáš Mazán  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Na tomto mieste by som rád poďakoval Ing. Kláre Křížové Ph.D. z Ústavu technológie stavebných hmôt a dielcov za odbornú pomoc a cenné rady pri spracovaní bakalárskej práce. Ďalej by som chcel vyjadriť vďaku Ing. Martinovi Lišovskému zo spoločnosti Svoboda a syn s.r.o, za skúsenosti a pomoc pri realizácii. Veľká vďaka patrí mojej rodine za ich podporu, nielen pri mojej ceste štúdiom.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. CIEĽ PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>3. TEORETICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>10</b>
3.1 DELENIE ĽAHKÝCH BETÓNOV .....	10
3.2 DRUHY PÓROVITÉHO UMELÉHO KAMENIVA .....	11
3.2.1 KERAMZIT .....	12
3.2.2 AGLOPORIT .....	13
3.3 TECHNOLÓGIA VÝROBY AGLOMEROVANÉHO KAMENIVA .....	15
3.4 VÝBER SUROVÍN PRE LWAC .....	17
3.4.1 CEMENT .....	18
3.4.2 VODA .....	20
3.4.3 PRÍSADY .....	21
3.4.4 PRÍMESY .....	22
3.4 VLASTNOSTI LWAC .....	26
3.5 ODOLNOSŤ VOČI VYSOKÝM TEPLOTÁM .....	28
<b>4. ODPORÚČANIE K DOSIHNUTIU VYSOKEJ ODOLNOSTI VOČI TEPELNÉMU ZAŤAŽOVANIU .....</b>	<b>32</b>
<b>5. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....</b>	<b>35</b>
5.1. ETAPA 1 .....	36
5.2. ETAPA 2 .....	36
5.3. ETAPA 3 .....	38
5.3.1. PREVEDENIE SKÚŠIEK NA ČERSTVOM BETÓNE .....	39
5.4. ETAPA 4 .....	40
5.5. ETAPA 5 .....	42
5.5.1. TEPLOTNÍ ZATĚŽOVÁNÍ BETONU .....	43
5.5.2. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE ODOLNOSTI VOČI TEPLOTNÉMU ZATAŽOVANIU .....	44
5.5.3. VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV LWAC VOČI TEPLOTNÉMU ZAŤAŽENIU .....	46
5.5.4. NÁVRH RECEPTURY LWAC S ODOLNOSTÍ VŮČI VYSOKÝM TEPLOTÁM .....	51
<b>6. ZÁVER .....</b>	<b>52</b>
<b>7. POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>	<b>54</b>



# 1. ÚVOD

Betón patrí k najpoužívanejším stavebným materiálom so širokým spektrom použitia. V modernom stavebníctve si čoraz viac nachádzajú miesto ľahké betóny s označením LWC – Light Weight Concrete.

Prvé ľahké betóny s použitím pórovitého prírodného kameniva boli používané už v starovekom Ríme, kde používali najmä prírodné vyvreté horniny z vulkanickej činnosti ako napríklad pemzy, tufy, tufity. [1] Podľa vedcov v indickom Anantapure a ich výskumu sa počiatky použitia LWC datujú až do obdobia 3000 rokov p.n.l , kde boli používané hlavne prírodné, vysoko pórovité, vyvreté horniny. [19]

Ako hlavné výhody LWC sa uvažuje predovšetkým nízka objemová hmotnosť v pomere ku vysokej pevnosti v tlaku. Ďalšou charakteristickou vlastnosťou sú dobré tepelno-izolačné vlastnosti. Predmetom výskumu a vývoja ľahkých betónov je hľadanie nových materiálov, ktoré by sa dali aplikovať v LWC a zároveň aj nájdenie využitia súčasných výrobkov. Moderným trendom pre zachovanie prírodných zdrojov pre ďalšie generácie je použitie odpadných prípadne recyklovaných materiálov či už v surovom alebo upravovanom stave. Tento trend má celú radu výhod ,predovšetkým šetrenie prírody ,ale aj znižovaním ceny kameniva ,keďže na výrobu kameniva sú primárne používané druhotné suroviny. [11] [12]

V prípade porovnania s bežným betónom a konštrukčnými vlastnosťami vieme zvýšiť únosnosť konštrukcie o 14 %. V závislosti na požiadavkách, vieme tento faktor využiť aj opačne a to zmenšením hrúbky/šírky daného konštrukčného materiálu. Využitie tohto špecifického materiálu možno vidieť aj v prípade dlhých mostných konštrukcií, tieto konštrukcie musia byť často pružné a odolávať viacerým nepriaznivým vplyvom. [19]

Jedným druhom zo skupiny LWC betónov je aj ľahčený betón s použitím aglomerovaného kameniva (LWAC) . Tento typ betónu požíva kamenivo na báze aglomerovaného kameniva vyrobeného z popolčeku. Jednou z najvýznamnejších stavieb s použitím LWAC je Pantheon, Aquadukty a Koloseum v Ríme. Použitie LWAC sa začalo rozvíjať v rokoch 1900-1908 v Americkom Los Angeles, ale zároveň aj v Európe v Škandinávskych krajinách v období pred 2. svetovou vojnou. Po 2.svetovej vojne bolo napredovanie výskumu v oblasti ľahčených betónov exponenciálne z viacerých známych dôvodov. Prvá budova postavená čisto z ľahkého betónu s použitím aglomerovaného kameniva bola neďaleko Londýna a slúžila ako administratívna budova v roku 1958. V medzivojnovom období sa LWAC používal nielen v stavitelstve ale aj v lodnom stavitelstve, kde sa využíval predovšetkým ako tepelná izolácia a ochrana. Nízka objemová hmotnosť umožnila použitie tohto typu betónu v masívnych konštrukciách ako sú stenové panely, stropné dosky iné. Zníženie hmotnosti použitím ľahkého kameniva sa využíva aj na stavbu v zónach, kde hrozí seizmická aktivita. Čo sa týka tepelno-izolačných vlastností tak LWAC má približne 6 krát lepšiu odolnosť voči vedeniu tepla ako bežný betón. V krajných prípadoch, ako napríklad v Kanadskom New Brunswicku , kde bola postavená špeciálna exteriérová stena z 200 mm hrubého LWAC sa ukázali tepelno-izolačné vlastnosti tohto betónu na toľko, že bola hodnota peňazí ušetrených na rozdielnosti cene oproti klasickému betónu vrátená do 2 rokov od vybudovania. [19]

## 2. CIEĽ PRÁCE

Cieľom bakalárskej práce je posúdiť možnosť využitia ľahkého umelého kameniva na báze vysokoteplotného popoľčeku – Agloporitu, v betónoch vystavených krátkodobému teplotnému zaťaženiu.

Teoretická časť práce bude zameraná na popis základných technológií výroby kameniva Agloporit. Odolnosť voči vysokým teplotám úzko súvisí s výberom materiálov a ich pomerov, preto budú popísané jednotlivé vstupné suroviny s ohľadom na predošlé skúsenosti a výskumy. V neposlednej rade bude nutné zvoliť vhodný metodický postup pri výrobe ľahkých betónov s aglomerovaným kamenivom (LWAC), aby bola dosiahnutá kvalita výsledného čerstvého a zatvrdnutého betónu. Praktická časť práce bude rozdelená na dielčie etapy s cieľom navrhnúť vhodnú receptúru, ktorá je schopná odolávať vysokým teplotám do 1000°C. Laboratórne budú vykonané skúšky ako pevnosť v tlaku a stanovenie objemovej hmotnosti, skúšky pre určenie odolnosti voči teplotnému zaťažovaniu. Z výsledkov bude vyhodnotená optimálna receptúra, ktorá by bola s ohľadom na použité materiály najvýhodnejšia pre oblasť odolnosti LWAC voči extrémnemu zaťaženiu vysokou teplotou.

## 3. TEORETICKÁ ČASŤ

Teoretická časť práce sa zaoberá obecnými poznatkami ľahkých betónov. V základnej rovine sú uvedené dva hlavné zástupcovia ľahkého pórovitého kameniva keramzit a Agloporit. Ďalšia časť je venovaná samotnej technológii aglomerovaného kameniva. Na základe štúdia súčasných odborných periodík sú definované vlastnosti vstupných surovín a ich samotný vplyv na výrobu LWAC. Posledná časť je zameraná na oblasť odolnosti betónov voči vysokým teplotám a dejom prebiehajúcich pri tomto extrémnom zaťažení. V neposlednej rade sú definované jednotlivé odporúčania pre dosiahnutie vysokej odolnosti z pohľadu použitia jednotlivých vstupných surovín.

### 3.1 DELENIE ĽAHKÝCH BETÓNOV

Pre ľahké betóny sú presne definované pravidlá, ktoré ohraničujú jeho fyzikálne a mechanické vlastnosti. Čo sa týka objemovej hmotnosti, tak podľa ČSN EN 206 + A1 [29] je udávaná hodnota pre LWC od 800 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. Dosiahnutie takto nízkej objemovej hmotnosti je možné viacerými spôsobmi :

1. **Priamo** – zväčšením množstva pórov a kapilár. Zámerné zmenšenie tzv. Spacing faktoru, respektíve prevzdušnenie betónu spôsobí vyľahčenie betónovej štruktúry
2. **Nepriamo** – nahradením konvenčne používaného kameniva ľahčeným kamenivom.

Na základe týchto možností delíme ľahké betóny na:

**Ľahké medzerovité betóny** – Dosiahnutie požadovanej objemovej hmotnosti je spôsobené zmenou krivky zrnitosti, ktorá je pretržitá a tým sa zrná kameniva dotýkajú len bodovo cementovým tmelom, ďalším spôsobom je zmiernenie účinnosti hutnenia. Pri výrobe tohto typu betónu sa dá použiť klasické hutné ale aj pórovité kamenivo.

**Priamo ľahčené betóny** – Za použitia plynovorných alebo penovorných prísad, ktoré vytvárajú v štruktúre póry, ktoré sú prevažne guľového tvaru. Výhodou použitia týchto prísad je zabezpečenie homogenity v celom objeme betónu.

**Nepriamo ľahčené betóny** – Pomocou pridania ľahčeného kameniva, ktoré je obalené cementovým tmelom a tým vytvára štruktúru s požadovanými vlastnosťami. Široký sortiment ľahčených-pórovitých kamenív dokáže ovplyvňovať ďalšie špecializované vlastnosti. [11]



**Obrázok 1** a) betón s hutným cementovým tmelom a použitím pórovitého kameniva  
b) medzerovitý betón s použitím pórovitého kameniva c) penobetón d) pórobetón [12]

### 3.2DRUHY PÓROVITÉHO UMELÉHO KAMENIVA

V súčasnosti je na trhu celá rada dodávateľov, ktorá ponúka ľahké pórovité kamenivá vyrábané rôznymi typmi technológií. Tieto kamenivá sa častokrát líšia aj v závislosti na lokalite v ktorej boli vyrábané. Alebo v opačnom prípade môže mať jeden typ kameniva rôzne označenia a názvy, čo sa týka jednotlivých krajín.

**Tab. 1** Jednotlivé druhy umelo vyrábaného kameniva a ich obchodné názvy [7] [11] [24]

Typ kameniva	Obchodný názov	Krajina pôvodu
Keramzit	Liapor	Česká republika
	Kema, Miag	Cína
	Leca	Dánsko
	Ceric	Francúzsko
Agloporit	Agloporit, Geoporit	Česká republika
	Lytag	Poľsko
	Sphärolit	Nemecko
	Hulit, Aglit, Trulit	Holandsko
Expandovaný perlit	Perlit, Vapex	Česká republika
	Haydit	USA
Struskoporit	Oberscheld , Syntboporit, Forit	Nemecko
Ostatné	Expandit, Vermikulit, Kavilit	
Recyklované	Tehloporit, Termozit	

Pre dostupnosť a ich cenu sa najčastejšie v Českej republike používa keramzit a aploporit.

### 3.2.1 KERAMZIT

V Českej republike je keramzit známy pod obchodným názvom Liapor. Toto kamenivo je označované ako ľahké keramické kamenivo. Vznik tohto kameniva je daný surovinami, ktoré sú používané na jeho výrobu. Sú to predovšetkým íly, ktoré obsahujú minerály ako Ilit, Kaolinit a zlúčeniny kremíku. Tieto suroviny sa technologickým výrobným procesom dostanú do stavu plastického cesta, ktoré má schopnosť pri pôsobení vysokých teplôt roztaviť na povrchu tak, aby znemožnil únik plynov z vnútra kameniva a tým umožnil vznik dutín. Tento stav nazývame pyroplastickým - stav kedy sa na povrchu vytvorí dostatok taveniny, ktorá sa zleje a spečie a súčasne je vo vnútri taká konzistencia, ktorá neumožní únik vniknutých plynov. [11]

Guličky Liaporu sa vypaľujú v rotačnej peci pri teplote okolo 1200°C. Táto teplota zabezpečí optimálne vlastnosti kameniva. Do rotačnej pece sa pridáva šamotový prášok, ktorý zabraňuje vzniku tzv. nálepkov, ktoré by mohli zaniest' steny pece a zabraňuje tvorbe zhlukov – aglomerátov. [24]

Najbežnejšie vyrábaná frakcia je 4-8, ale sortiment firmy LIAS Vintřřov je široký. Kamenivo menšie ako 4mm sa vyrába odlišnou technológiou, pomocou zbalkovacieho taniera.

**Tab. 2** Kľúčové vlastnosti keramzitu [30]:

Objemová hmotnosť	500 - 1500 kg/m <sup>3</sup>
Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$	0,09 W/m·K
Pevnosť v tlaku $F_c$	0,7 – 10 MPa
Nasiakavosť $n_{\text{hmotnostne}}$	3-9 %



**Obrázok 2** Kamenivo Liapor vo frakcii 8-16 mm [30]



**Obrázok 3** Rez zmesou Liapormixu od spoločnosti Lias Vintířov, ľahký stavebný materiál, k.s. [30]

### 3.2.2 AGLOPORIT

Výskum a vývoj aglomerovaného kameniva je v súčasnosti prevádzaný len pomocou malých výskumných centier. Momentálne neexistuje veľkovýrobca aglomerovaného kameniva, ktorý by pokryl dopyt trhu, prípadne by dokázal konkurovať iným typom pórovitého umelo vyrábaného kameniva, preto je Agloporit v modernom betonárstve využívaný len výnimočne. Pre potreby trhu by bola potrebná linka na kontinuálnu výrobu Agloporitu, od popolčeka až po hotový roztriedený a vypálený výrobok. V spoločnosti Svoboda a syn s.r.o momentálne prebieha výskum na vytvorenie takejto výrobnéj linky, ktorá by bola schopná produkovať v maximálnej výrobnéj kapacite až 5 ton za hodinu. Čo sa týka kvality vyrobeného kameniva záleží predovšetkým na kvalite vstupných surovín. Tieto parametre sú pre väčšinu tuzemských popolčiek kolísavé, preto je veľmi dôležité sledovať vybrané vstupné parametre.



**Obrázok 4** Rôzne typy Agloporitu v závislosti na vstupnej surovine (popolčeky z rôznych lokalít, uhoľný a tehelný prach) [8]

Minerálne zloženie závisí hlavne na vstupnej surovine. Pri použití bežných elektrárenských ložových popolčekoch od dodávateľov z českej republiky má najväčšie zastúpenie má amorfna fáza následne mulit a zlúčeniny kremíka . Čo sa týka zastúpenia oxidov, prevažuje  $\text{SiO}_2$  a to cca 53% a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v zastúpení 30%. [8]

**Tab. 3** Kľúčové vlastnosti Agloporitu [8]

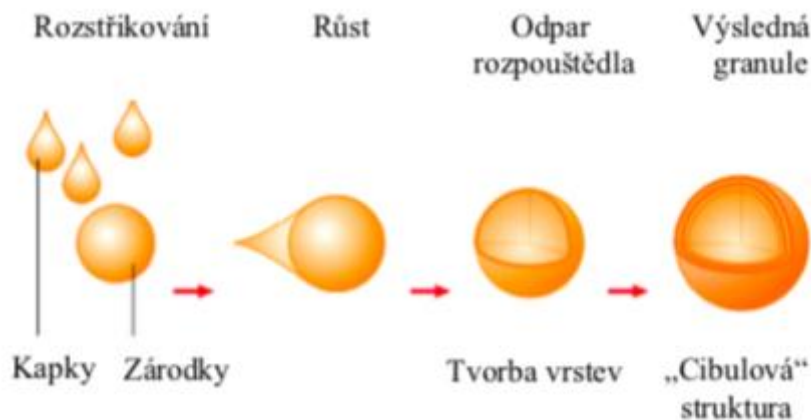
Objemová hmotnosť	1100-1300 kg/m <sup>3</sup>
Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$	0,12-0,16 W/m·K
Pevnosť v tlaku $f_c$	5-9 MPa
Nasiakavosť $n_{\text{hmotnostne}}$	28-32 %



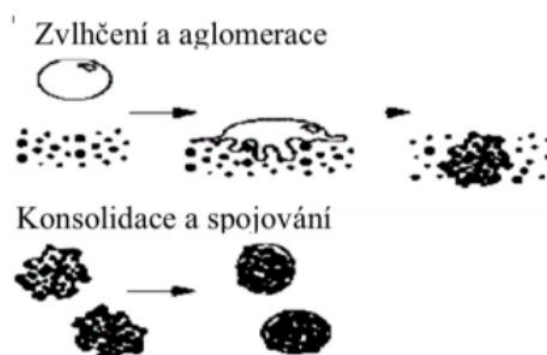
**Obrázok 5** Rez Agloporitbetónom vyrábaný v spoločnosti Svoboda a syn s.r.o. [8]

### 3.3 TECHNOLÓGIA VÝROBY AGLOMEROVANÉHO KAMENIVA

Výoba aglomerovaného kameniva prebieha za pomoci tzv. vlhkej granulácie. Pomocou tejto technológie dokážem efektívne vyrábať kamenivo veľkosti 0,1 až 10 mm. Toto kamenivo sa vyrába z odpadných elektrárenských popolčiekov, ktoré sa po zmiešaní s vodou granulujú, teda aglomerujú na zbalkovacom tanieri. Pri miešaní a rotačnom pohybe na zbalkovacom tanieri nastáva nukleácia teda zhlukovanie a obalovanie suchého materiálu ako je uvedené na obrázku 6. Kvapalina, ktorá je použitá pre aglomeráciu musí byť dostatočne zmáčavá a musí mať adhezívne účinky. V prípade, že nám nestačí ako kvapalina bežne požívaná voda, dajú sa použiť chemické vlhčidlá a rozpúšťadlá. Po vytvorení jednotlivých guľičiek nastáva fáza sušenia, ktorá spôsobí tvorbu pevných väzieb. Neskôr sa tieto zrníčka kameniva vypália pomocou tzv. samovýpalu a následne triedia na požadované frakcie. [24]



**Obrázok 6** Teoretické zobrazenie tvorby zbalku [24]

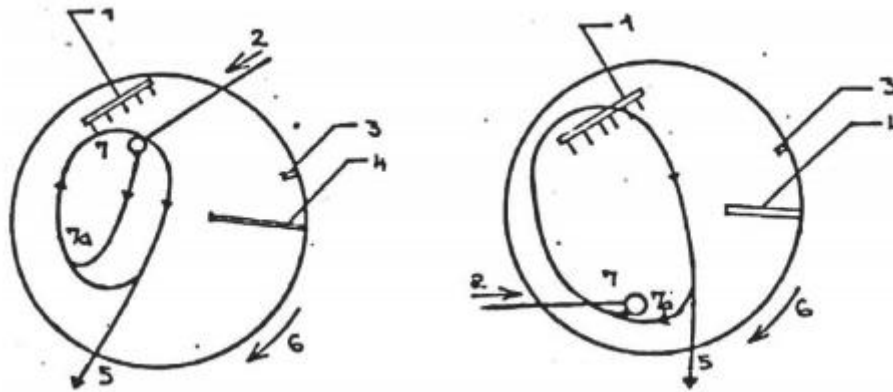


**Obrázok 7** Technológia mechanizmu aglomerácie [24]

Výrobný proces je rozdelený do rozličných technologických procesov:

### Peletizácia

Jedným z najúčinnějších zariadení na zbankovanie je práve peletizačný tanier. Surovina s k nemu privádza z vrchu pomocou špirálovitého podávača. Voda je privádzaná v špecifických miestach pomocou trysiek alebo rozprašovačov. Veľkosť trysiek, tlak a množstvo vody značne ovplyvňujú účinnosť a rýchlosť granulácie. Valivý pohyb ukázaný na obrázku č.4 trvá pokým sa zo suchého materiálu nestanú guľičky a neprepadnú cez okraj.



**Obrázok 8** Peletizačný disk – 1.prívod vody pomocou trysiek 2.prívod suchého materiálu 3.,4. zhrňovacie lišty 5.smer vypadávanie hotových zbankov 6.smer rotácie taniera 7., 7a – pohyb suroviny po tanieri a smer nukleácie.[11]

Rozhodujúcimi faktormi pre peletizačný tanier je:

- **Priemer**, obvykle 1,5 až 4 metre. Zabezpečuje dobrú čistiteľnosť a kontrolovateľnosť vyrábaného kameniva.
- **Sklon taniera**, ktorý je nastaviteľný v závislosti na vlastnostiach vstupného materiálu. Obecne sa dá povedať, čím je sklon väčší, tým bude vnikať menšia frakcia kameniva. Bežne používaný sklon sa pohybuje od 40° do 55°
- **Výška límca**. Ovplyvňuje dobu pobytu Agloporitu v tanieri a jeho prepádanie do zbernej nádoby. Pri výrobe väčšej frakcie sa zväčšuje aj výška obruby a naopak.
- **Rýchlosť otáčania**. Približná rýchlosť otáčania je 12 až 18 otáčiek za minútu čo spôsobuje vznik odstredivej sily, ktorá tlačí väčšie zrná viac k okraju, kde ich stierky alebo okrajové lopatky zrážajú naspäť do stredu. Táto rýchlosť ovplyvňuje hlavne produktivitu disku [13]



## **Sušenie**

Po aglomerovaní kameniva nastáva fáza sušenia, kedy sa za bežných atmosférických podmienok odstráni prebytočná voda a v kamenive sa vytvorí manipulačná pevnosť. V prípade, že by sme túto fázu vynechali, hrozí možnosť nedostatočného samovýpalu alebo vznik

koncentrácie napätia vplyvom zvýšeného množstva vodnej pary, čo spôsobí odstreľovanie spôsobené rýchlym zahriatím vodnej pary, ktorá nemá kam uniknúť a tým môže nastať aj poškodenie samotnej pece určenej pre výpal

## **Výpal**

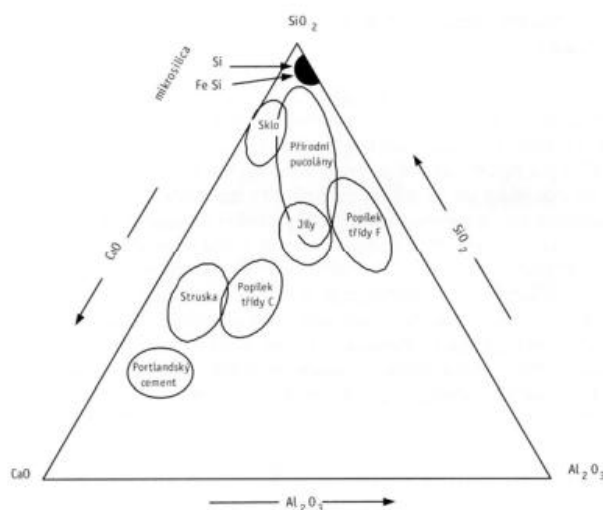
Kamenivá vyrábané za vysokých teplôt označujeme ako slinuté kamenivá. Teplota blízka teplote slinutia sa pri Agloporite pohybuje okolo 1100°C, záleží na vstupnej surovine a požadovaných vlastnostiach. Výroba s obmedzenou dávkou energie sa nazýva technológiou samovýpalu, ide v nej o schopnosť materiálu horieť bez ďalšieho dodávania energie pričom na počiatočné zapálenie je použitý určitý impulz a následné vytvorenie vhodných podmienok pre horenie.

## **Triedenie**

Po vybraní spečeného kameniva je potrebné kamenivo od seba oddeliť a následne roztrieť na požadované frakcie. V prípade požiadavku je možnosť vyrábať aj kamenivo 0-2, ktoré sa musí po výpale nadrtiť, avšak toto kamenivo sa bežne nepoužíva a má iné vlastnosti pre jeho otvorenú štruktúru. [8]

## **3.4 VÝBER SUROVÍN PRE LWAC**

Pri výbere surovín pre výrobu ľahkých betónov s použitím aglomerovaného kameniva musíme dbať na splnenie požiadavkou na pevnosť a na objemovú hmotnosť. V prípade, že chceme dosiahnuť špecifických vlastností ako napríklad dobré tepelne-izolačné vlastnosti alebo žiaruvzdornosť, tak je výber a obsah jednotlivých surovín ešte obťažnejšia. Výberom surovín sa snažíme poskladať vhodné chemické zloženie na vytvorenie vhodných chemických zlúčenín v zatvrdnutom betóne.



**Obrázok 9** Znáozornenie základných minerálnych prímiesí do bežne používaného betónu v terárnom diagrame [9]

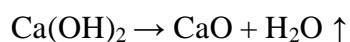
Pri návrhu betónu s požiadavkami na tepelnú odolnosť si musíme uvedomiť jednotlivé materiálové charakteristiky uvedené v obrázku 10

Nechráněný konstrukční materiál	Požární odolnost	Hořlavost	Přispívání k požárnímu zatížení	Rychlost šíření tepla v průřezu	Zabudovaná (přirozená) požární ochrana	Možnost opravy po požáru	Ochrana pro evakuaci a požární zásah
Dřevo	Nizká	Vysoká	Vysoké	Velmi nízká	Velmi nízká	Nulová	Nizká
Ocel	Velmi nízká	Nulová	Nulové	Velmi vysoká	Nizká	Nizká	Nizká
Beton	Vysoká	Nulová	Nulové	Nizká	Vysoká	Vysoká	Vysoká

**Obrázok 10** Porovnanie stavebných materiálov [10]

### 3.4.1 CEMENT

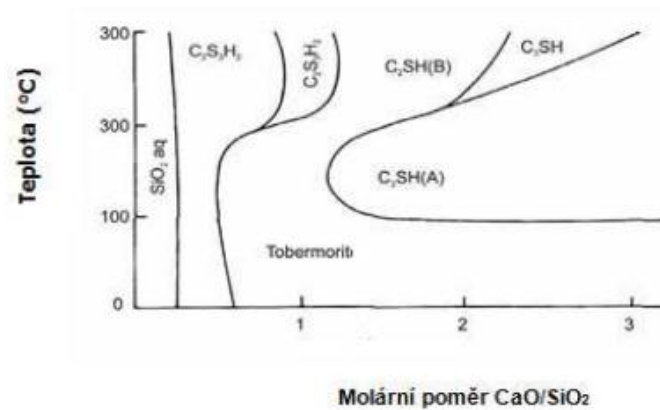
Ako najväčší vplyv na odolnosť voči vysokým teplotám je pri bežne používaných typoch cementu vplyv vzniku Portlanditu -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ktorý vzniká v priebehu hydratácie cementu. Vznik Portlanditu ovplyvňuje hlavne obsah portlandského slínku v danom použitom spojive. V prípade teplotného zaťažovania sa pri teplote približne  $500^\circ\text{C}$  rozkladá podľa nasledujúcej rovnice:



Vzniknutá voda sa vyparuje čo spôsobuje vzniknutie vnútorných tlakov vplyvom expanzie plynov.

Ako najmenej vhodné spojivo na báze slínok sa považuje čistý portlandský cement označenie CEM I. Pri použití tohto cementu dochádza vplyvom vysokých teplôt ku strate vlhkosti a vysokému zmršťovaniu.

Zahriatím cementového tmelu dochádza k odparovaniu viazanej vody, ktorá odchádza v podobe vodnej pary. Najskôr odchádza voda voľná, neskôr sa uvoľňuje aj chemicky viazaná voda. Vplyvom teploty môže dochádzať ku fázovým zmenám, ktoré ovplyvňujú najmä mineralogické zloženie cementu, pomer Ca a  $\text{SiO}_2$ . Podľa teórie Verbecka a Copelanda sa pri pomere Ca/ $\text{SiO}_2$  blízakom 1 nastávajú optimálne podmienky pre vznik Tobermorit gelu (pri teplote okolo  $150^\circ\text{C}$  a ďalej, pri zvyšujúcej sa teplote ku tvorbe Xonolit a Hillebranditu. [14]



**Obrázok 11** Vplyv teploty na CSH fázu a vznik minerálov [14]

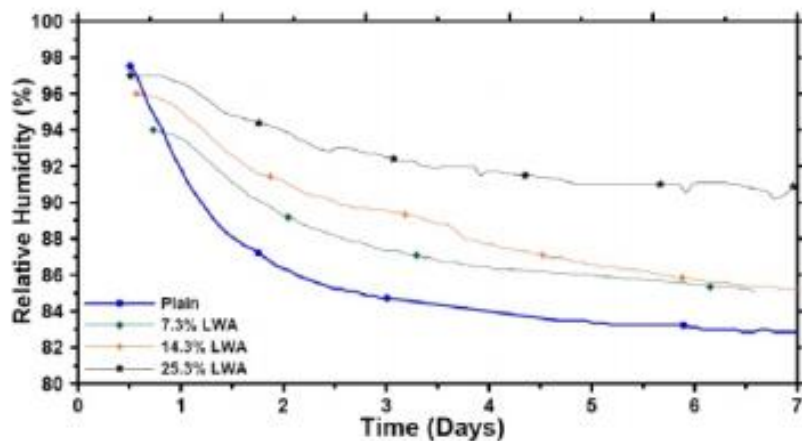
Najlepšie vlastnosti v odolnosti proti vysokým teplotám vykazuje hlinitanový cement. Hlinitanový cement obsahuje viac ako 35 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ktorý hydratáciou vytvára kalciumalumináty, teda vápenaté hlinitany. Základnou výrobou pre hlinitanový cement je zmes bauxitu a vápenca.

Tento cement sa vyznačuje rýchlim nárastom pevností, kedy za 24 hodín dokážeme dostať až 70% výslednej pevnosti, sprievodnými javmi tejto rýchlej reakcie je aj vývoj vysokého hydratačného tepla. Použitie tohto cementu sa vyznačuje aj značne vyššou dávkou zámesovej vody potrebnej k hydratácii. Ďalšou potrebnou znalosťou pri použití hlinitanových cementov je dôležitosť ošetrovania a predvlhčovania výsledného betónu pre zabránenie vzniku trhlin a pórov. [7]

Použitie tohto cementu pre konštrukčné účely je zakázané pre nevyhovujúce pevnostné vlastnosti z dlhodobého hľadiska. Dôvodom je premena metastabilných fáz  $\text{CAH}_{10}$  a  $\text{C}_2\text{AH}_{10}$  pri teplotách nad  $20^\circ\text{C}$  na stabilnú kubickú formu v podobe  $\text{C}_3\text{AH}_6$  a minerál Gibbsit. Tieto vzniknuté novotvary majú menší objem a sú pórovitejšie čo znižuje výsledné pevnosti betónu. [7]

### 3.4.2 VODA

Pri použití aglomerovaného kameniva musíme počítať s určitou nasiakavosťou, približne 30%. Táto vlastnosť by nám mohla značne ovplyvniť reologické vlastnosti čerstvého betónu a to hlavne na reologické vlastnosti a spracovateľnosť, ale aj na vlastnosti zatvrdnutého betónu ako je napríklad výsledná pevnosť. Použitím vhodného množstva technologickej vody na predvlhčenie kameniva vieme zabezpečiť aj dodatočné samoošetovanie betónu. Tento jav nám dokáže uchovávať zvýšené množstvo vody v priebehu hydratácie. [15] Na nasledujúcom grafe vidíme vplyv množstva použitého kameniva na vlhkosť v betóne v porovnaní s betónom, v ktorom bolo použité prírodné kamenivo. Zvýšená vlhkosť vplyvom aglomerovaného kameniva je značná aj v priebehu času a tento jav trvá až do ustálenia vlhkosti v štruktúre kameniva.



**Graf 1** Závislosť vlhkosti betónu v priebehu času na obsahu navlhčeného aglomerovaného kameniva

V prípade, že nepoužijeme technologickej vodu na predvlhčenie, tak aglomerované kamenivo so značnou nasiakavosťou zapríčiňuje stiahnutie zámesovej vody v čerstvom betóne a v zatvrdnutom betóne spôsobí takzvané samovákuovanie. S týmto efektom je potrebné uvažovať aj v prípade počítania vodného súčiniteľa a vplyvu vlhkosti kameniva. [7]

V prípade, že chceme proces navlhčenia kameniva urýchliť, je možné použiť technológiu vytvorenia podtlaku, ktorý dostane požadované množstvo vody do štruktúry kameniva. [7][8]

Pre zámesovú vodu platia rovnaké požiadavky na zloženie, čistotu a ostatné parametre podľa ČSN EN 1008 [39] tak, ako pre bežný betón podľa ČSN EN 206-1 + A1. [29]

Ošetrovacia voda má veľký vplyv na dodatočnú hydratáciu cementu a na ovplyvnenie objemových zmien. Pre túto vodu platí pravidlo aby sa jej teplota nevyšplhala na viac ako 20°C. Čo by v prípade použitia hlinitanového cementu mohlo spôsobiť nepriaznivé podmienky pri tuhnutí hlinitanovej cementovej matrice. [7]

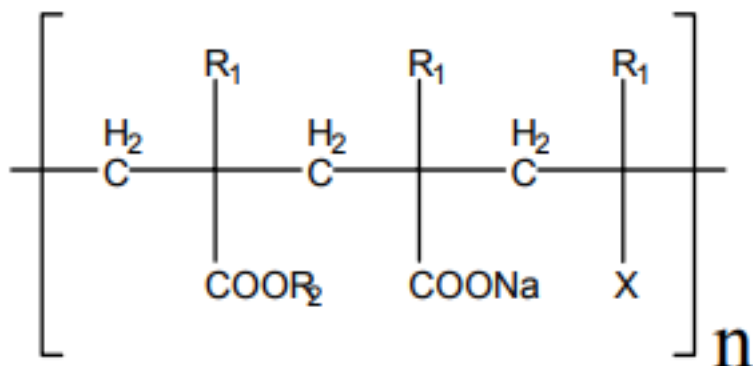
Voda potrebná na ošetrovanie betónu má za úlohu zabrániť samovysychaniu a vonkajšiemu vysychaniu. Podľa Ing. Briatku z TSÚS Bratislava pôsobia zrníčka jednotlivých pórovitých kamenív, ktoré sú obsiahnuté v cementovej matrici ako tzv. zásobníky vody, ktoré sú schopné zabrániť povrchovému vysychaniu vody v otvorenom systéme. Tento jav nespôsobí zmenšenie objemových zmien vplyvom vysychania, iba ich spomalí. [15]

### 3.4.3 PRÍSADY

V modernom betonárstve sa bez použitia prísad do betónu takmer nezaobídeme. Ich vplyv a výhody sú znateľné vo všetkých stránkach, či už technologických alebo ekonomických. Tento trend je čoraz výraznejší, použitím či už plastifikačných, retardačných prípadne hydrofobizačných prísad má veľký vplyv na výsledné vlastnosti v zaťažovaní vysokými teplotami

#### Superplastifikační přísady

Podstatou superplastifikačných prísad (SP) je umožnenie dispergácie cementových zrn, čo umožní znížiť množstvo zámesovej vody a súčasne predĺžiť dobu potrebnú na spracovanie a uloženie betónu. Použitie moderných SP na bázi polykarboxylátov sa oplatí aj z hľadiska znižovania množstva použitého cementu.



Obrázok 12 Chemická štruktúra molekuly polykarboxylátu [9]

Obecne by sa výhody SP pri ich použití do špecifickej receptúry s ohľadom na požadované parametre na zatvrdnutý betón dali zhrnúť v nasledujúcich vlastnostiach:

- Vyššia pevnosť
- Vyšší modul pružnosti
- Lepšia mrazuvzdornosť
- Zvýšená odolnosť voči priesaku vody
- Lepšia odolnosť voči chemickej korózii
- Lepšia prídržnosť ku výstuži

Použitie SP je však účinné len do určitého percenta. Toto percento závisí na type použitého SP, na výrobcovi a na požadovaných vlastnostiach. [9]

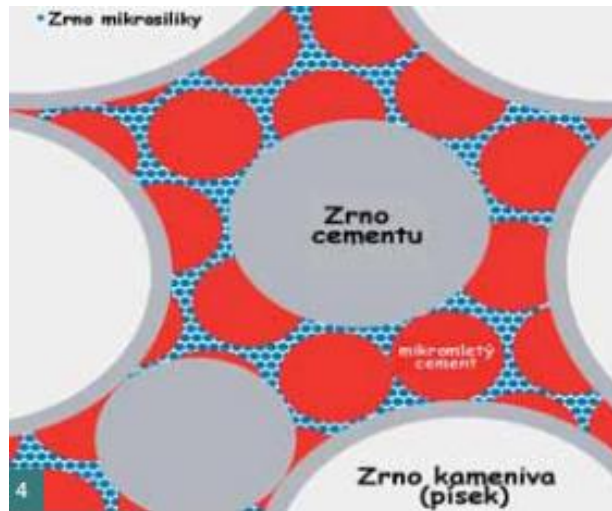
### 3.4.4 PRÍMESY

Prímiesy sú materiály, ktoré sa dávajú do betónu za účelom zlepšenia jeho vybraných vlastností a to jak v čerstvom tak v zatvrdnutom stave. Obecne sú prímiesy delené na aktívne a pasívne. Z tohto označenia je hneď jasný ich účinok, tzn. v betóne sa priamo či nepriamo podieľajú na hydratačnom procese alebo v betóne fungujú ako napríklad výplňový materiál dopĺňujúci krivku zrnitosti kameniva, redukujú objemové zmeny a iné. V nasledujúcej časti budú uvedené základné vlastnosti vybraných typov prímiesí použitých rámci experimentálnej časti práce

#### Mikrosilika

Mikrosilika alebo kremičité úlety, sú odpadné produkty, ktoré vznikajú pri výrobe ferozliatin alebo elementárneho kremíku. [16] Chemické zloženie mikrosiliky odpovedá jej pôvodnému materiálu. Prevažujú kremičité oxidy a to 90 %, zvyšné oxidy sú CaO, MgO a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [21]

Názov mikrosilika v podstate znamená kremičité úlety s veľkosťou zrna približne 0,1 μm. V porovnaní s veľkosťou cementového zrna sú približne stokrát menšie. Vďaka tejto vlastnosti dokáže mikrosilika vyplniť v matrici aj tie najmenšie dutiny (obrázok 13) a umožňuje dosiahnutie hutnejšej makroštruktúry, čo za určitých okolností môže spôsobiť zvýšenie pevnosti betónu. [16]



**Obrázok 13** Znáozornenie zaplnenia priesotru medzi zrnami cementu [21]

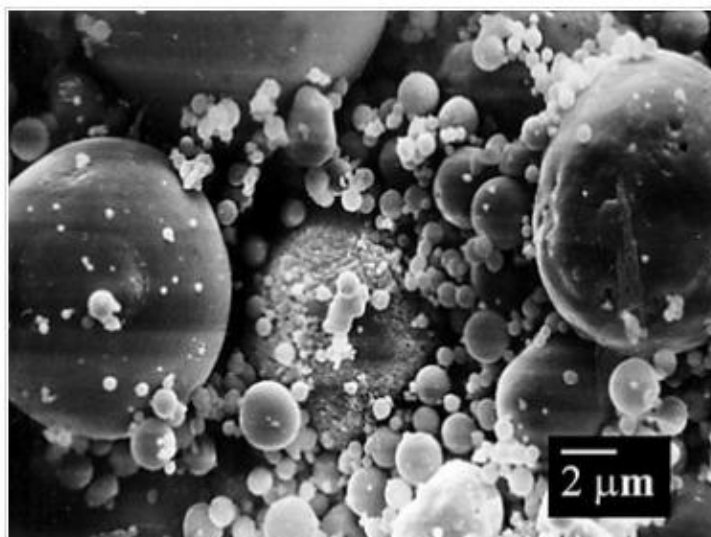
Mikrosilika sa dá vo svojej podstate brať ako mikrovýplň s vysokými pucolánovými vlastnosťami. Použitie mikrosiliky je v modernom betonárstve široké. V súčasnosti sa používajú najmä šedé mikrosiliky, ktoré sú lacnejšie ako biele avšak tento typ môže mať negatívne účinky na pohľadovosť betónu. Extrémna jemnosť mletia mikrosiliky spôsobí zlepšenie stability v čerstvom betóne a zvyšuje kohézne sily v plastickej hmote. V zatvrdnutom betóne následne vyplňa pórovitú štruktúru a tým zvyšuje hutnosť. [21]

### Popolček

Vznikajú ako priemyslové odpady zo spaľovania práškových fosilných palív. V závislosti na technológii spaľovania rozlišujeme rôzne typy popolčeku. Popolčeky môžu byť takisto klasifikované aj podľa typu odpadu, ktorý bol spaľovaný a to: komunálny odpad, tuhé uhlie, práškové uhlie, kukuričné alebo ryžové šupy prípadne iných typov odpadu. [11]

Takto vzniknutý popolček sa dá v určitých prípadoch použiť ako súčasť pucolánových cementov (CEM IV a CEM V). Podľa Yanga a kolektívu sa pri použití popolčeku ako náhradu cementu o viac ako 10% znižuje vývin hydratačného tepla. [27]

Chemické zloženie popolčeku sa líši v závislosti na dodávateľovi, lokalite a čase odberu. Pre príklad je uvedené chemické zloženie popolčeku z lokality Mostek, vznikajúci spaľovaním uhlia. Najväčšie zastúpenie má  $\text{SiO}_2$  a to 55% ďalej je zastúpený  $\text{Al}_2\text{O}_3$  25%, 10%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a podstatným faktorom je strata žiháním, ktorá v tomto prípade činí 3,5 %. [8]



**Obrázok 14** Snímka elektrónového mikroskopu vysokoteplotného popolčeku z lokality Ledvice, zväčšenie 1500x [22]

Pre všeobecné použitie popolčeku do betónov patrí medzi hlavné výhody zníženie ceny výsledného betónu, ktorý dokáže čiastočne nahradiť množstvo cementu. Tento jav sa udáva koeficientom účinnosti. Hlavnou nevýhodou použitia popolčeku je kolísavosť jeho vlastností v závislosti na lokalite, ale aj na čase.

Ako ďalšou nevýhodou sa ukazuje jav, kedy pri dlhom miešaní betónu napríklad v autodomiešavači vykazuje betón zhoršenie reologických vlastností a to spôsobuje potrebu pridania ďalšej zámesovej vody. Tento jav je spôsobený trením a narážaním sférických zrníčok popolčeku o zrná kameňa a ich deštrukciu, ktorá spôsobí zvýšenie merného povrchu a tým zväčšenie potreby zámesovej vody. [21]

### **Vlákná do betónu**

Rôzne typy vlákien fungujú v betóne ako pasívne prímеси, tzn. prímеси II. typu.

Použitím polypropylénových vlákien (PP) v receptúre dosiahneme zlepšenie určitých vlastností hlavne v zatvrdnutom betóne. Čo sa týka čerstvého betónu, majú vlákna skôr negatívny vplyv na reologické vlastnosti, znižujú tekutosť betónovej zmesi a mierne zvyšujú potrebu zámesovej vody pre veľký merný povrch vlákien. Zakomponovaním do betónovej zmesi dokážeme zmierniť účinky expanandovania vodnej pary predovšetkým pri hutných betónoch, kde vodná para nemá kam unikať. Približná teoretická teplota tavenia PP vlákien je 160°C. Pri tejto teplote dochádza k rozpusteniu vlákien, ktoré po sebe zanechajú tzv. tunelové cestičky a umožnia vzniku kapilárne otvorenej pórovitej štruktúry. Táto vlastnosť do značnej miery umožní unikanie pary a tým pádom znižuje vnútorný tlak, ktorý by inak expanziou plynov porušoval štruktúru betónu. [5]





**Obrázok 15** Jednotlivé typy PP vlákien

Vplyv vlákien je podľa výskumu na univerzite v Purdue rozličný s typom, tvarom, rozmermi a množstvom dispergovaných vlákien. Podľa Ing. Briatku a Ing. Ševčíka pri rovnakom vodnom súčiniteli 0,55 znateľný z nasledujúceho grafu. [28]



**Graf 2** Vplyv množstva a typu vlákien na konzistenciu [28]

### 3.4 VLASTNOSTI LWAC

Variácia rôznych typov kamenív a celkovo surovín umožňuje vyrábať širokú škálu betónov s rôznym účelom použitia. Vhodnosť použitia LWAC závisí na požadovaných vlastnostiach, objemovej hmotnosti, cene, schopnosti odolávať tlaku a iným nepriaznivým vplyvom. Schopnosti tepelnej izolácie môžu byť v prípade použitia masívnych konštrukcií skôr nepriaznivé, pretože dokážu spôsobiť vysoké teploty pri hydratačných reakciách v bednení a tým urýchľovať tuhnutie cementu.

Ostatné vlastnosti zabezpečujúce lepšiu spracovateľnosť, prepravu a kompaktnosť majú LWAC o niečo horšiu ako bežné betóny pretože vplyvom gravitácie sú menej priťahované k zemi ako bežné kamenivo, čo môže v krajných prípadoch spôsobovať segregáciu.

Pórovitá štruktúra jednotlivých aglomerovaných zrníčok kameniva spôsobuje vysokú nasiakavosť a schopnosť viazať vodu aj na povrch.

Optimálny obsah vzduchu stanovený v čerstvom betóne je stanovený pre jednotlivé zrná použité v receptúre nasledovne [19]:

$$d_{\max} = 20 \text{ mm, tak } V_{\text{air}} = 4-8 \%$$

$$d_{\max} = 10 \text{ mm, tak } V_{\text{air}} = 5-9 \%$$

Podľa doterajších výskumov je s každým percentom pridaného vzduchu v čerstvom betóne pevnosť v zatvrdnutom betóne menšia o 1MPa

Pri porovnávaní špecifických vlastností LWAC s normálnym betónom môžeme uvažovať s:

- Nižším modulom pružnosti o 25 až 50 % pri zachovaní rovnakej pevnosti v tlaku
- Odolnosť voči zmrazovacím cyklom je lepšia pre vysokú pórovitosť aglomerátov v prípade, že sme ich pred zakomponovaním do betónovej zmesi nevlhčili na 100 % kapacitu nasiakavosti
- Požiarna odolnosť je vyššia, pretože pórovité kamenivo nemá sklon ku odstreľovaniu vplyvom teploty, čo je dané jeho výrobnou technológiou
- Ľahké betóny sa dajú lepšie rezať, čo je výhoda pri tvorení dilatačných úsekov
- Pevnosť v strihu je menšia o 15 až 25 %
- Tepelno-izolačné vlastnosti sú približne 3 krát lepšie ako plná pálená tehla a o cca 6 krát lepšie ako bežný betón
- Zvuková izolačnosť LWAC je porovnateľná s veľmi hutným betónom [19]

## Objemová hmotnosť

Obecne sa Pre LWAC sa pohybuje objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu v medziach hodnôt od 300 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené jednotlivé triedy objemovej hmotnosti podľa ČSN EN 206 + A1. [29]

**Tab. 4** Triedy objemovej hmotnosti podľa ČSN EN 206 + A1 [29]

Trieda objemovej hmotnosti	LC 1,0	LC 1,2	LC 1,4	LC 1,6	LC 1,8	LC 2,1
[kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 800	> 1.000	> 1.200	> 1.400	> 1.600	> 1.800
	a	a	a	a	a	a
	≤ 1.000	≤ 1.200	≤ 1.400	≤ 1.600	≤ 1.800	≤ 2.000

## Pevnosť v tlaku

Bežne používané LWAC vykazujú pevnosti v tlaku približne do 40 MPa. V prípade použitia vysokého obsahu cementu sa dokážeme priblížiť k hodnotám 60 MPa pri objemovej hmotnosti 560kg/m<sup>3</sup>. [19] Nasledujúca tabuľka uvádza prehľad charakteristických pevností v tlaku a pevnostných tried ľahkých betónov špecifikovaných podľa ČSN EN 206 + A1. [29]

**Tab. 5** Triedy pevností v tlaku podľa ČSN EN 206 + A1 [29]

Pevnostná trieda v tlaku	Minimálna charakteristická válcová pevnosť $f_{ck,cyl}$ N/mm <sup>2</sup>	Minimálna charakteristická krychelná pevnosť <sup>a)</sup> $f_{ck,cube}$ N/mm <sup>2</sup>
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

<sup>a)</sup> Mohou se použiť jiné hodnoty, pokud je vztah mezi nimi a referenční válcovou pevností zjištěn s dostatečnou přesností a je dokumentován.

### 3.5 ODOLNOSŤ VOČI VYSOKÝM TEPLOTÁM

Triedy reakcie na oheň podľa ČSN EN13501-1 [2]

Od 1.1.2004 je zrušená norma ČSN 730862. Táto norma bola nahradená a výrobky sú posudzované na reakciu na oheň podľa súboru piatich európskych noriem:

- ČSN EN 13238 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Postupy kondicionování a obecná pravidla pro výběr podkladů;
- ČSN EN 13823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytín vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu;
- ČSN EN ISO 1182 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti;
- ČSN EN ISO 1716 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla;
- ČSN EN ISO 11925-2 Zkoušení reakce na oheň – Zápalnosť stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene;
- ČSN EN ISO 9239-1 Zkoušení reakce podlahových krytín na oheň – Část 1: Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla.

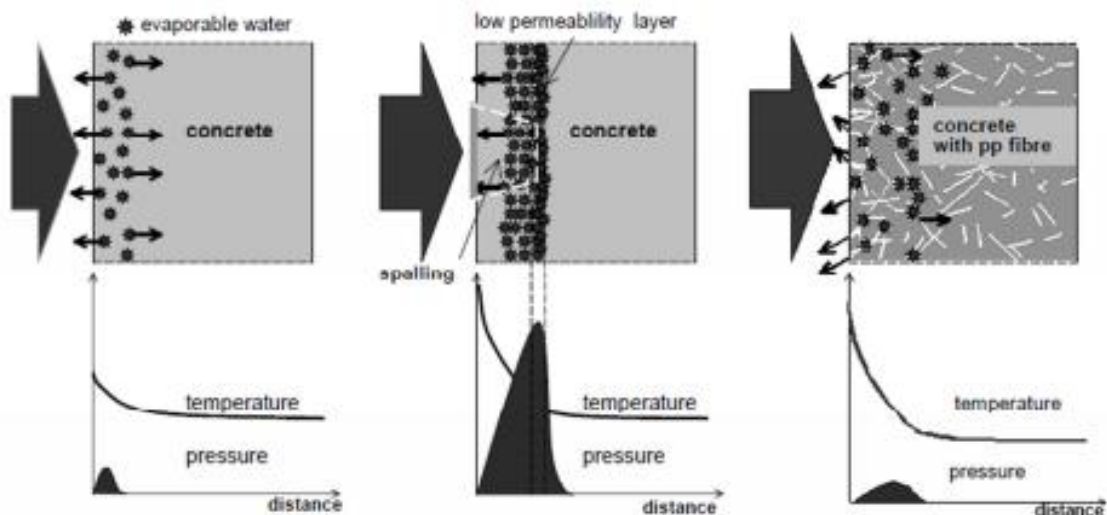
Zatriedenie stavebných výrobkov podľa reakcie na oheň sa prevádza podľa európskej normy ČSN EN 13501-1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb- část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň.

Pri hodnotení splnenia požiadaviek na triedu reakcie na oheň u stavebných výrobkov je rozdelenie nasledovné:

- **Trieda A1:** Výrobky triedy A1 nebudú prispievať k požiaru v žiadnom jeho štádiu; z toho dôvodu sú automaticky považované za vyhovujúce všetkým požiadavkám pre nižšie triedy.
- **Trieda A2:** Výrobky síce vyhovujú rovnakým kritériám podľa EN 13823 ako pre triedu B, ale navyše nebudú za podmienok plne rozvinutého požiaru významne prispievať ko kalorickému zaťaženiu, a tým ani k ďalším rastom požiaru.
- **Trieda B:** Ako u triedy C, ale s prísnejšími požiadavkami.
- **Trieda C:** Ako u triedy D, ale navyše pri tepelnom pôsobení jednotlivého horiaceho predmetu vykazujú obmedzené rozšírenie plameňa.
- **Trieda D:** Výrobky vyhovujúce kritériám pre triedu E a sú schopné odolávať pôsobeniu malého plameňa po dlhší časový interval bez jeho významného rozšírenia. Okrem toho sú tiež schopné odolávať pôsobeniu tepla od jednotlivého horiaceho predmetu za podstatného oneskorenia a obmedzenia uvoľňovania tepla.
- **Trieda E:** Výrobky sú schopné odolávať pôsobeniu malého plameňa po krátky časový interval bez významného rozšírenia plameňa.
- **Trieda F:** Výrobky, ktoré sa nedajú zaradiť do žiadnej z predošlých tried. [2]

## Explozívne odstreľovanie

Vplyvom vysokej teploty dochádza k premene vody na paru, ktorá zväčšuje svoj objem. Koncentrácia určitého množstva pary vo vzduchových medzerách spôsobuje vznik napätia, ktoré je schopné porušiť mikroštruktúru a následné odstreľovanie povrchových vrstiev.



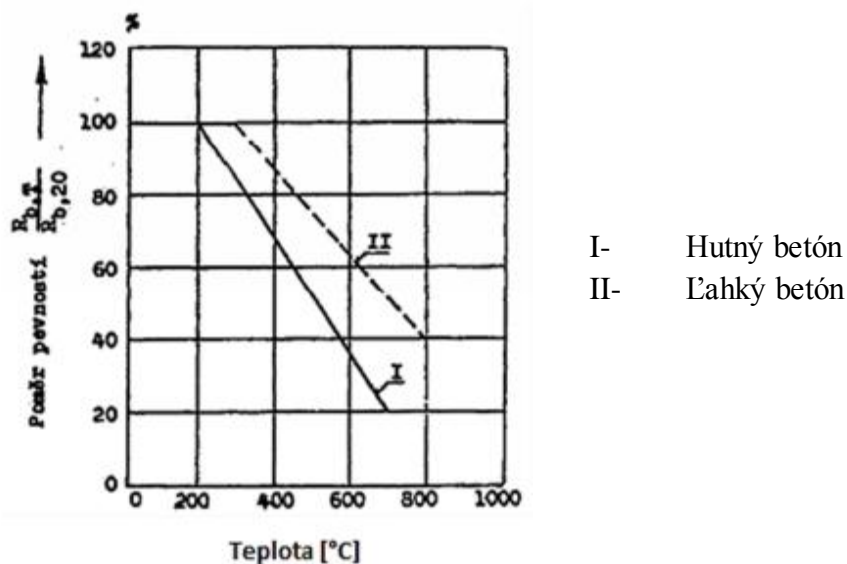
**Obrázok 16** Explozívne odstreľovanie v dôsledku zvýšeného vnútorného tlaku a porovnanie s betónom, kde boli použité PP vlákna [5]

Veľkosť explozívneho odstreľovania úzko súvisí s vlhkosťou betónu a mikroštruktúrou, ktorá ovplyvňuje hlavne transportné deje. Transportné deje vodnej pary medzi jednotlivými fázami v betóne a jeho povrchom ovplyvňuje aj množstvo vlhkosti obsiahnutej v betóne. Pri vlhkosti do 3 % k odstreľovaniu nedochádza. Tento efekt sa dá značne eliminovať použitím polypropylénových vlákien prípadne konštrukčnými riešeniami ako je vhodný tvar prierezu alebo vylúčenie veľkých zmien hrúbky prierezu. Podľa Bošnjaka (2013) vzniká veľké riziko odstreľovania povrchových vrstiev vo vlhkom prostredí s relatívnou vlhkosťou nad 70 % aj pri dávke 1 kg vlákien na  $m^3$  betónu. [26]

## Strata pevnosti v tlaku

Zmena pevnosti v tlaku podľa Kuplíka a kolektívu platí pre závislosť pevnosti v tlaku na teplote pre nevstužené betóny: [3]

- Zaťažené vzorky vykazujú menší úbytok pevnosti ako vzorky nezaťažené
- Strata pevnosti pri betónoch s nízkym obsahom cementu je menšia než u betónov s vyšším obsahom
- Pomer cementu a kameniva má výraznejší vplyv na stratu pevnosti ako vodný súčiniteľ
- Strata pevnosti je u ľahkých betónov menšia ako pri hutných betónoch



**Graf 4** Strata pevnosti betónu v tlaku v závislosti na teplote [4]

### Zmena farby betónu

Vplyvom zvyšovania teploty dochádza v betóne k rôznym reakciám, ktoré ovplyvňujú farbu ako povrchu tak aj vnútra betónu. Tieto zmeny prebiehajú od povrchu smerom do vnútra prierezu. Na základe tejto vlastnosti vieme. Podľa Gosaina a kolektívu sú zmeny nasledovné: [26]

**Tab. 6** Zmeny farby betónu pri určitej teplote [26]

Teplota [°C]	Farebné zmeny	Zmeny v konštrukcii	Stav betónu
0-290	-	bez poškodenia	bez poškodenia
290-590	rúžová-červená	povrchové trhliny pri 300 °C hĺbkové trhliny pri 550 °C	znižovanie pevnosti
590-950	šedobiela	odstreľovanie povrchu pri 800 °C	neúnosný a drobný
Viac ako 950	žltohnedá	rozsiahle odstreľovanie	neúnosný a drobný

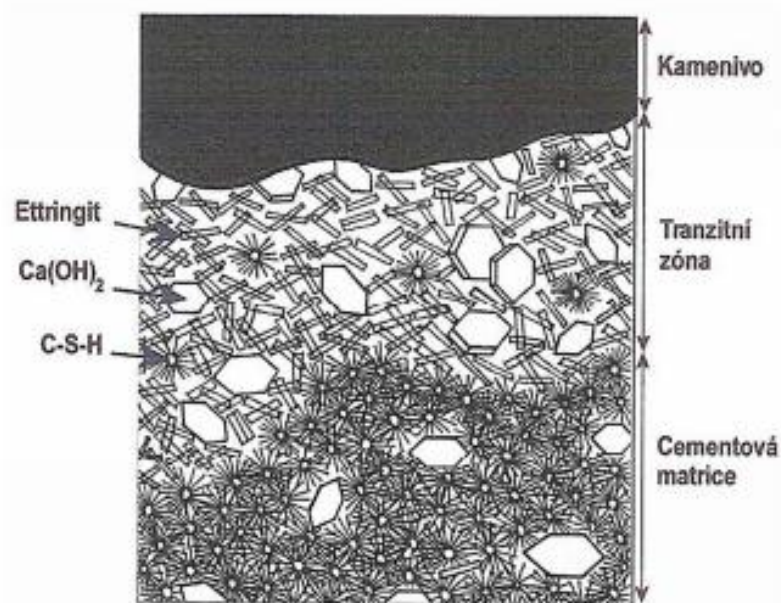
## Zmeny v mikroštruktúre

Behom teplotného zaťaženia dochádza v mikroštruktúre betónu ku mnohým zmenám v závislosti na pôsobiacej teplote. Jednotlivé štádia sú doprevádzané javmi, hlavne z pohľadu dehydratácie, ktoré spôsobujú fázové premeny až po celkovú deštrukciu betónu, vid' Tab. 7.

Porušenie mikroštruktúry môže nastať v týchto prípadoch:

- Cez zrno aglomerovaného kameniva
- Cez cementovú matricu
- Cez tranzitnú zónu

Tranzitná zóna medzi cementovou matricou a povrchom kameniva býva v betóne najslabším článkom. Na povrchu kameniva je naviazané určité množstvo vody, čo vedie ku zvýšeniu pórovitosti cementovej matrice. Dôsledkom toho je lokálne zväčšenie vlhkosti a tým aj vodného súčiniteľa, ktorý spôsobí tvorbu kryštalických produktov ako Portlandit alebo vláknitý Ettringit. [6]



**Obrázok 12** Schematické znázornenie tranzitnej zóny [6]

**Tab. 7** Prehľad zmien, ku ktorým dochádza v mikroštruktúre betónu pri zvyšovaní teploty [5]

rozsah teplot	změny v mikrostruktuře betonu
20 – 200 °C	Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. 80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu 150 °C – 170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Počátek dehydratace CSH gelu. Ztráta fyzikálně vázané vody.
300 – 400 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody.
400 – 500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
500 – 600 °C	Přeměna křemene z fáze $\beta$ na $\alpha$ (573 °C) v kamenivu a písku.
600 – 800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$ .
800 – 1 000 °C	840 °C – rozklad dolomitického vápence 930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, doprovázeno uvolňováním oxidu uhličitého.
1 000 – 1 200 °C	Tvorba Wollastonitu $\beta$ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). 1 050 °C – tavení čediče
1 300 °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.

## 4. ODPORÚČANIE K DOSIANUTIU VYSOKEJ ODOLNOSTI VOČI TEPELNÉMU ZAŤAŽOVANIU

### Spojivo

Pre dosiahnutie dobrej tepelnej odolnosti je vhodné použiť hlinitanový cement, avšak tento cement nespĺňa požiadavky pre konštrukčné betóny a dnes sa bežne nepoužíva. Najmenej vhodným sa javí použitie čistého portlandského cementu, ktorý sa rozpadáva pri strate vlhkosti. Ako vhodné riešenie sa ukazuje použitie zmesného cementu na bázy portlandského slinku avšak so zvýšením podielom popolčeku a strusky.



**Tab. 8** Teploty rozkladu jednotlivých minerálov v zatvrdnutej cementovej paste [23]

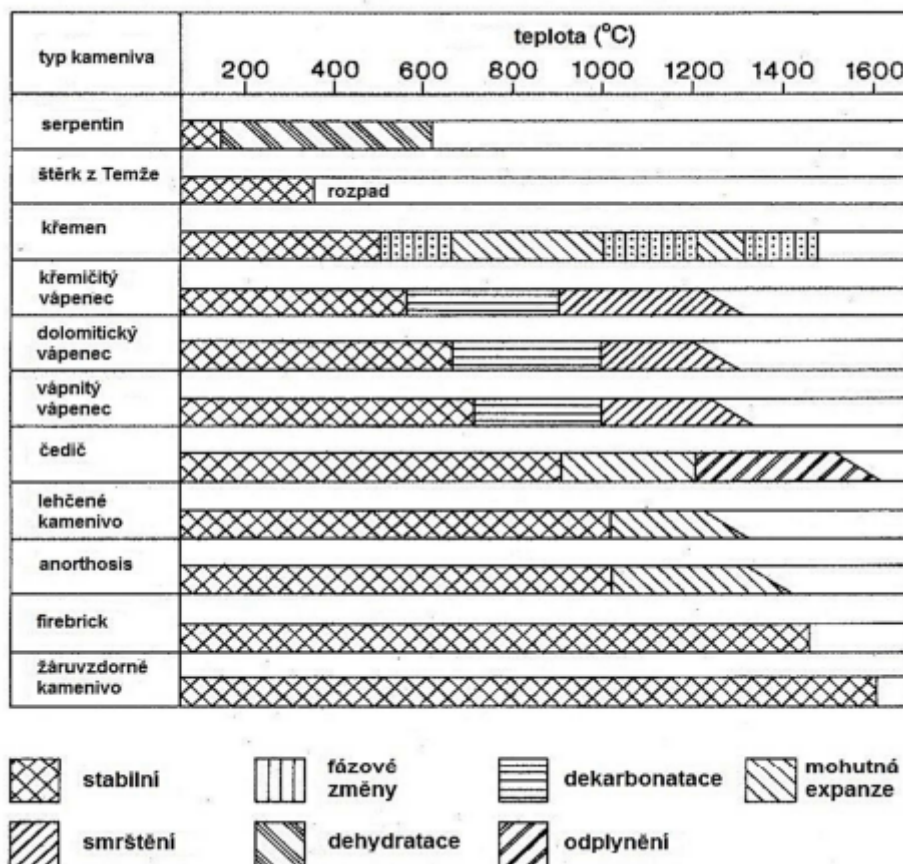
složka	vzorec	teplotní rozmezí rozkladu [°C]
kalciumsilikáthydráty	CSH typ 1 a 2	95 – 120
ettringit	C <sub>4</sub> ASH <sub>12</sub>	125 – 135
monosulfát	C <sub>6</sub> ASH <sub>32</sub>	185 – 195
portlandit	CH	495 – 550
uhličitan vápenatý	CaCO <sub>3</sub>	850 – 1000
sádrovec	SCH <sub>2</sub>	160 – 185
kalciumalumináthydráty	CAH <sub>10</sub>	110 – 130
	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>	175 – 185
	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	280 – 320

### Plnivo

V prípade použitia bežného, prírodného kameniva je treba brať v úvahu teplotu tavenia jednotlivých typov kamenív. V prípade, že použijeme kamenivá ťažké kamenivá ako napríklad čadič, amfibolit a iné, tak si výrazne zvyšujeme objemovú hmotnosť betónu. Pri pôsobení teploty nad 700°C sa odporúča používať umelé kameniva, ktoré vznikli technológiou vypaľovania. Tieto typy kameniva nemajú tendenciu zmršťovania, ktorá by mohla narušiť mikroštruktúru vznikom trhlin na tranzitnej zóne. Nevhodne zvoleným kamenivom ako je napríklad kremenné kamenivo alebo žula, kde dochádza ku zmršťovaniu a ku praskaniu povrchových vrstiev jednotlivých zrn. Pri kombinácii viacerých typov kamenív je optimálne použiť kamenivá s rovnakou tepelnou rozťažnosťou a rovnakou tepelnou vodivosťou. [14]

Obecne dochádza vplyvom teploty k nadobudnutiu objemu kameniva. Prírodné kamenivo pri teplotách okolo 700-1000°C uvoľňuje oxid uhličitý z kalcitu, takže mineralogické zloženie kameniva má vplyv na charakter chovania kameniva pri tepelnom zaťažovaní. Vápencové kamenivo vykazuje priaznivejšie správanie pretože spotrebuje viac tepla na endotermický rozklad ako kremičité kamenivo. Kremičité kamenivo je zase ovplyvňované modifikačnými premenami kremeňa sprevádzané objemovými zmenami a tým dochádza ku vzniku pnutia v tranzitných zónach kameniva. [26]

**Tab. 9** Prehľad odolnosti rôznych typov kameniva voči pôsobeniu teploty a reakcie na teplotné zaťaženie [25]



## Výstuž

Pri teplote blízkej 500°C oceľ začína rekryštalizovať. Táto teplota sa nazýva kritickou teplotou, pretože vzniká riziko kolapsu konštrukcie. Na zamedzenie dosiahnutia tejto teploty vo výstuži sa odporúča použiť kryciu vrstvu  $d = 20$  mm v prípade, že je požiadavka aby konštrukcia odolala teplote 500°C približne 50-70 minút. Pri použití krycej vrstvy  $d = 50$  mm dokážeme túto hranicu posunúť až na 180-240 minút. [3]

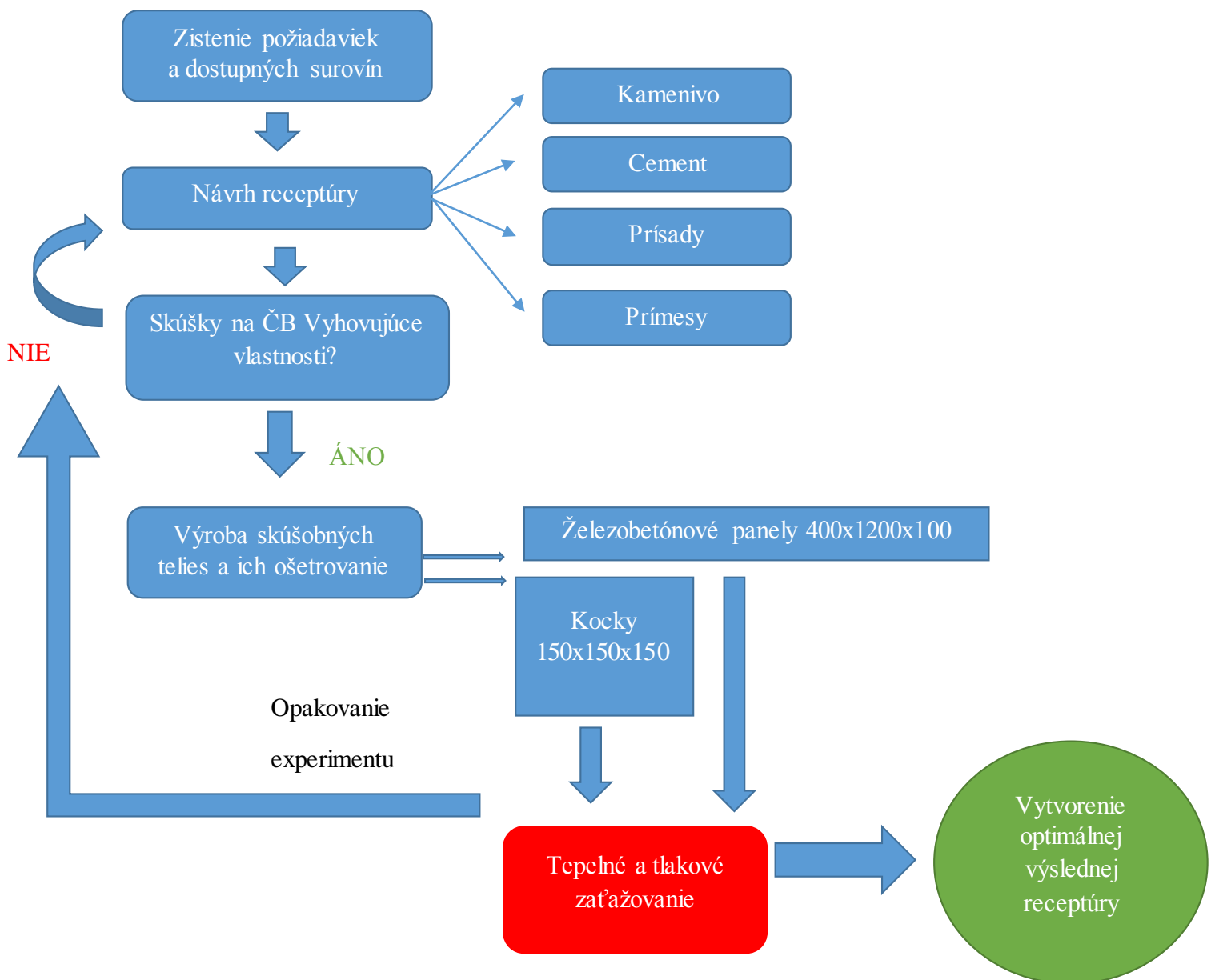
## Vlákna

Použitím polypropylénových vlákien dokážeme do značnej miere zastaviť negatívne mu vplyvu pôsobenia tepelného zaťaženia a to tzv. odstreľovaniu. Vlákna pôsobia v betóne ako rozptýlená výstuž, zvyšujú pevnosť v ťahu a tlaku. Pri pôsobení teploty dokážu tieto vlákna v mikroštruktúre vyhoriť a tým vytvoriť priestor pre unikajúcu vodnú paru a plyny, ktoré svojím rozpínaním dokážu značne deštruovať betón a narušovať jeho povrch. Podľa PhD. Hagera je optimálne použitie vlákien, ktoré majú väčší šťahlostný pomer, teda sú tenšie a dlhšie. [5]

## 5. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť bakalárskej práce je rozdelená do piatich dielčích etáp. Prvá časť je zameraná na predstavenie základného metodického postupu, ktorý vedie až k samotnej výrobe skúšobných vzoriek z LWAC. Experimenty boli prevedené na súbore štyroch receptúr betónu. Jednotlivé etapy sú volené s ohľadom na nadväznosť medzi jednotlivými prevádzanými činnosťami. Prevádzané skúšky boli prevedené na základe špecifikácie normových predpisov a doterajších skúseností. Výstupom experimentálnej časti bude špecifikovanie receptúry LWAC betónu odolného voči krátkodobému vystaveniu vysokým teplotám.

Nasledujúce etapy experimentálnej časti sa dajú zhrnúť do metodického grafu návrhu výslednej receptúry:



## 5.1. ETAPA 1

Prvá etapa sa vyznačovala návrhom samotného konceptu výroby LWAC. Boli zhrnuté základné požiadavky na výsledný betón a požadované vlastnosti čerstvého a zatvrdnutého betónu. Na základe odborných rešeršii a odborných konzultácií boli vybrané jednotlivé vstupné suroviny. Vzhľadom ku spolupráci v experimentálnej časti práce tejto bakalárskej práce, so spoločnosťou Svoboda a syn, s.r.o., boli vybrané dostupné suroviny, ktoré mali už známe špecifikácie a vlastnosti. V nadväznosti na túto časť pokračujeme k etape 2, ktorá bola zameraná na návrh receptúr.

## 5.2. ETAPA 2

V rámci druhej etapy bol prevedený prvotný návrh jednotlivých receptúr pre zistenie vlastností na čerstvom betóne a následná úprava receptúr, pomerov jednotlivých zložiek, prípadná zmena alebo úplné vylúčenie jednotlivých zložiek. Zistenie kompatibility jednotlivých prísad.

Boli zostavené štyri receptúry betónu so snahou vyrobiť ľahký betón s aglomerovaným kamenivom LWAC, tzn. vyrobiť taký betón aby vyhovoval špecifikácií ľahkého betónu podľa normy ČSN EN 206 + A1 [29]. Pre vzájomnú porovnateľnosť bola zvolená referenčná receptúra **REF 0**, ktorá sa vyznačovala použitím čisto prírodného kameniva s maximálnym zrnom 8 mm. Zvyšné tri receptúry **REC 1**, **REC 2** a **REC 3** boli naopak navrhnuté jak s obsahom prírodného tak s obsahom umelo vyrobeného kameniva Agloporitu s taktiež maximálnou veľkosťou zrna 8 mm. Pre dosiahnutie podobných vlastností čerstvého betónu boli všetky ostatné suroviny ako spojivo, prímеси, prísady, voda a drobné kamenivo stále rovnaké, tzn. tieto uvedené vstupné suroviny boli dávkované v konštantnej dávke a menili sa tak len pomer medzi hrubou frakciou prírodného hutného a umelého ľahkého kameniva. V závislosti na pomere kamenív bol taktiež upravený pomer technologickej vody potrebnej k predvlhčeniu ľahkého kameniva - Agloporitu.

Na základe štúdií zdrojov a dostupných surovín boli navrhnuté nasledujúce receptúry, ktoré slúžia na porovnanie vplyvu pórovitého kameniva na tepelnú odolnosť.

**Tab. 10** Navrhované skúšobné receptúry

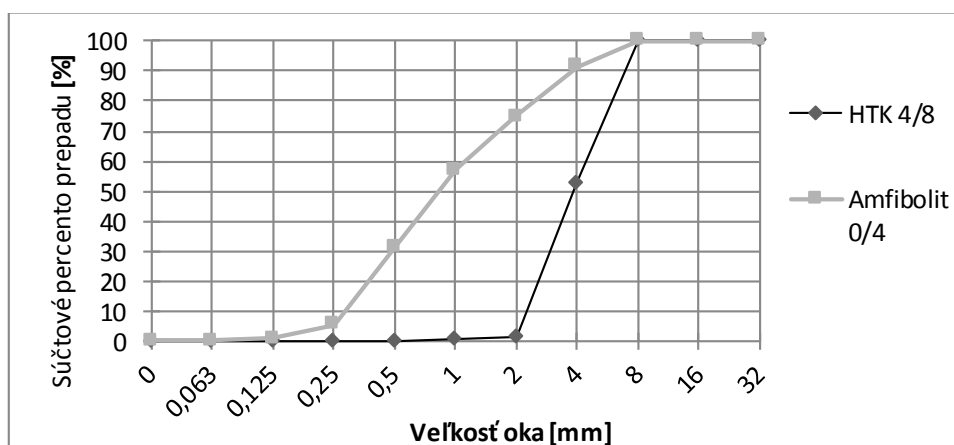
Surovina		Množstvo v kg na 1 m <sup>3</sup> betónu			
		REF 0	REC 1	REC 2	REC 3
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R		375,0			
Mikrosilika		42,0			
Amfibolit 0/4		964,0			
HTK 4/8		686,0	515,0	343,0	171,0
Agloporit 4/8		0,0	114,0	229,0	343,0
Superplastifikačná prísada		3,3			
PP vlákna		1,0			
Voda	zámesová	207,0			
	technologická	0,0	21,7	43,5	65,2

Tu sú uvedené základné špecifiká použitých surovín pre výrobu betónov **REC 0**, **REC 1**, **REC 2** a **REC 3**.

### Kamenivo

Prírodné kamenivo bolo odobraté z voľne uloženej, nekrytej skládky. Na kamenive boli prevedené skúšky stanovenia vlhkosti podľa ČSN EN 1097-5 [31], sitový rozbor podľa ČSN EN 933-1 [32] a stanovenie objemovej hmotnosti pyknometricky podľa ČSN EN 1097-6 [33]. Následne sa kamenivo hmotnostne navažovalo s presnosťou na 1 g.

Umelé kamenivo bolo odobrané z úložných vriec typu Big bag. Bola stanovená vlhkosť a objemová hmotnosť pre prepočítanie hmotnosti kameniva Agloporitu ako náhradu určitej časti objemu prírodného kameniva. Navažovanie s presnosťou na 1 g prebiehalo v nádobe a následne sa k nemu pridala technologická voda na predmáčanie Agloporitu.



**Graf 5** Sitový rozbor použitého kameniva v receptúrach použitých v experimente

## Cement

Cement bol odberaný zo sila pre uskladnenie sypkých materiálov v betonárke. Pre kontrolu vstupných parametrov sme vykonali stanovenie mernej hmotnosti cementu pyknometricky podľa ČSN 72 2113. [38]

**Tab. 11** Stanovenie mernej hmotnosti cementu použitého v experimente

Meranie č.	Merná hmotnosť [g/cm <sup>3</sup> ]	
1	3,0142	3,0688
2	3,0856	
3	3,1067	

## Voda

Zdrojom bola studňová upravovaná voda, ktorá spĺňa požadované parametre. Bola navažovaná hmotnostne a pridávaná do miešania v určitých fázach.

## Prísady a prímеси

Tekuté chemické prísady a prímеси boli dávkované objemovo v odmerných valcoch.

Mikrosilika bola dávkovaná hmotnostne a pridaná do cyklu miešania súčasne s cementom.

## Vlákná

Polypropylénové vlákna boli navažované na digitálnych váhach s presnosťou na 0,1 g a pridávané do miešačky ešte pred pridaním vody pre dobré rozptýlenie jednotlivých vlákien.

## 5.3. ETAPA 3

Táto etapa sa týkala samotnej výroby ľahkého betónu s umelým ľahkým kamenivom Agloporit. Na základe zostavených receptúr zloženia jednotlivých betónov z etapy 2, boli tieto betóny vyrobené a následne podrobené základným skúškam čerstvého betónu a boli zhotovené skúšobné telesá. Z každej receptúry bolo vyrobených 12 ks kociek s hranou 150 mm a taktiež ku každej receptúre jeden betónový panel o rozmeroch 400x1200x100 mm.

## Výroba LWAC

Výroba betónu s použitím ľahkého aglomerovaného kameniva sa svojou podstatou nijak neodlišuje od výroby betónu s prírodným kamenivom. Výroba môže prebiehať či už lokálne v malých miešačkách alebo vo väčších množstvách aj v betonárkach so špecializovanými silami na uskladnenie a predvlhčenie Agloporitu.

Miešanie prebiehalo strojne pomocou laboratórnej miešačky s núteným obehom HMB – 150 Brio spol s.r.o Hranice.

Pre miešanie betónu bol použitý nasledovný osvedčený postup:

1. Hrubé kamenivo 4/8 + Jemné kamenivo 0/4 + Agloporit 4/8
2. Cement+Mikrosilika
3. PP Vlákná
4. 2/3 Zámesovej vody
5. Superplastifikačná prísada rozmiešaná v 1/3 zámesovej vody

### 5.3.1. PREVEDENIE SKÚŠIEK NA ČERSTVOM BETÓNE

Na čerstvom betóne všetkých receptúr **REC 0** až **REC 3** bolo prevedené overenie konzistencie čerstvého betónu a zistená objemová hmotnosť čerstvého betónu prevedenej podľa normovej špecifikácie. Každá receptúra bola miešaná v jednej zámesy v miešačke pre čo najlepšie zaručenie homogenity všetkých výrobných telies. Všetky štyri receptúry a všetky skúšobné telesá boli vyrobené v jeden deň, aby boli zaručené zhodné podmienky.

#### Stanovenie konzistencie čerstvého betónu

Stanovenie miery spracovateľnosti a určenie vhodnej metódy ku stanovení konzistencie. V našom prípade sme použili skúšku sadnutím teda Zkoušku sednutím pomocou Abramsového kužeľu podľa ČSN EN 12350 – 2. [35]



**Obrázok 13** Stanovenie konzistencie pomocou skúšky sadnutia na receptúre **REC 2**. Výška sadnutia bola 60 mm čo odpovedá triede S2

## Objemová hmotnosť čerstvého betónu

Pre zistenie objemovej hmotnosti čerstvého betónu sme použili nádobu o známom objeme a váhu. Postupovali sme podľa ČSN EN 12350 – 6. [35]

Čerstvý betón bol uložený do normovaných silno stenných foriem pre výrobu skúšobných vzoriek pre skúšky v tlaku. Plnenie prebiehalo dvojstupňovo s hutnením pomocou vibrácie. Následne bol zahladený povrch vzorky.

Objemová hmotnosť čerstvého betónu **REC 0** bola stanovená na hodnotu 2270 kg/m<sup>3</sup>, pri **REC 1** 2190 kg/m<sup>3</sup>., **REC 2** 2100 kg/m<sup>3</sup> a 2010 kg/m<sup>3</sup> pre **REC 3**.



Obrázok 14 Výroba skúšobných vzoriek

## 5.4. ETAPA 4

Štvrtá etapa bola zameraná na testovanie skúšobných vzoriek. Pre prevedenie skúšok a možnosť porovnania výsledkov jednotlivých receptúr je potrebné, aby všetky skúšobné telesá mali po celú dobu zrania zhodné podmienky. Taktiež je dôležitým faktorom, hlavne u ľahkých betónoch, samotné ošetrovanie zatvrdnutého betónu. Všetky skúšobné telesá (kocky) mali zaručené zhodné podmienky, tj. boli uložené v nádrži s vodou po dobu 7 dní a následne vytiahnuté a vysušené v laboratórnych podmienkach. Podstatná časť tejto etapy spočívala v stanovení základných fyzikálne mechanických vlastností na zatvrdnutom betóne. Jednalo sa o stanovenie objemovej hmotnosti zatvrdnutého betónu a pevnosti betónu v tlaku po 28 dňoch.



## Ošetrovanie

Po miernom zatuhnutí povrchu boli vzorky prikryté nepriepustnou fóliou. Po odformovaní boli vzorky uložené do vodnej lázne s teplotou vody 20°C.

## Vysušenie

Pred tepelným zaťažovaním je potrebné aby boli vzorky vysušené. V našom experimente sme sa rozhodli simulovať prirodzený stav betónu za normálnych atmosférických podmienok, preto sme vzorky sušili na vzduchu po dobu 21 dní. Podľa [26] je potrebné dostať vlhkosť v betóne pod 3 % hmotnosti aby sa zabránilo teplotnému odstreľovaniu.



**Obrázok 15** Uloženie vo vode a následné vysušenie na vzduchu pri laboratórnej teplote

## Fyzikálne - mechanické vlastnosti zatvrdnutého betónu

Séria skúšobných telies bola podrobená stanoveniu objemovej hmotnosti podľa ČSN EN 12350 – 7 [35] a stanovenie pevnosti v tlaku podľa ČSN EN 12390 – 3 [36].

**Tab. 12** Vyhodnotenie objemovej hmotnosti a pevnosti v tlaku po 28 dňoch pre vzorky bez tepelného zaťažovania

Označenie receptúry	Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]		Pevnosť v tlaku $f_c$ [MPa]	
<b>REF 0</b>	2300	2290	53,5	53,4
	2290		53,2	
	2290		53,6	
<b>REC 1</b>	2160	2170	50,8	50,8
	2170		51,0	
	2180		50,5	
<b>REC 2</b>	2050	2060	45,9	46,2
	2060		45,8	
	2060		46,9	
<b>REC 3</b>	1970	1970	42,2	41,6
	1960		40,8	
	1980		41,8	

Na základe dosiahnutých výsledkov je viditeľné, že len v prípadoch **REC 2** a **REC 3**, bolo dosiahnutých objemových hmotností zatvrdnutého betónu, ktoré sa dajú považovať za ľahký betón na základe normovej špecifikácie triedy ľahkých betónov. Objemové hmotnosti **REC 0**, resp. **REC 1** až **REC 3** odpovedajú hodnotám v rozmedzí 2290 kg/m<sup>3</sup> až 1970 kg/m<sup>3</sup>.

Avšak, dosiahnuté hodnoty odpovedajú navrhnutým receptúram. Viditeľný je najmä pokles objemových hmotností so zvyšujúcou sa dávkou ľahkého umelého kameniva Agloporit na úkor prírodného hutného kameniva. Obdobný trend je zreteľný aj v prípade pevnosti betónu v tlaku, kde sa hodnoty pevnosti znižujú priamo úmerne s navyšujúcou sa dávkou ľahkého kameniva Agloporit. Získané pevnosti sa tak pohybujú v rozmedzí 41,6 až 53,4 MPa.

## 5.5. ETAPA 5

Posledná piata etapa je najrozsiahlejšou časťou experimentálnej časti bakalárskej práce. Táto časť sa venovala predovšetkým teplotnému zaťažovaniu vyrobených skúšobných telies. Vzhľadom k tomu, že všetky skúšobné telesá boli vyrobené v jeden deň, rovnako tak v prípade testovania bol zvolený čo najtesnejší časový postup jednotlivých testovaní. Série vzoriek boli vždy po zhodnom počte 3 kusov vystavené teplotám 600, 800 resp. 1000°C. Po každom teplotnom zaťažovaní boli skúšobné telesá najskôr vizuálne posúdené z pohľadu možných farebných zmien povrchu, porušenia povrchu, prípadne či nenastalo explozívne odstreľovanie. Po vychladnutí skúšobných telies boli telesá vždy zvážené pre zistenie hmotnostného úbytku, resp. overenie zmeny objemovej hmotnosti zatvrdnutého betónu. Následne bola prevedená pevnosť betónu v tlaku v skúšobnom lise.

Finálna časť tejto etapy spočíva vo výbere resp. v zostavení receptúry LWAC, ktorá sa javí ako optimálna pro výrobu LWAC s vysokou odolnosťou voči krátkodobému zaťaženiu vysokou teplotou.

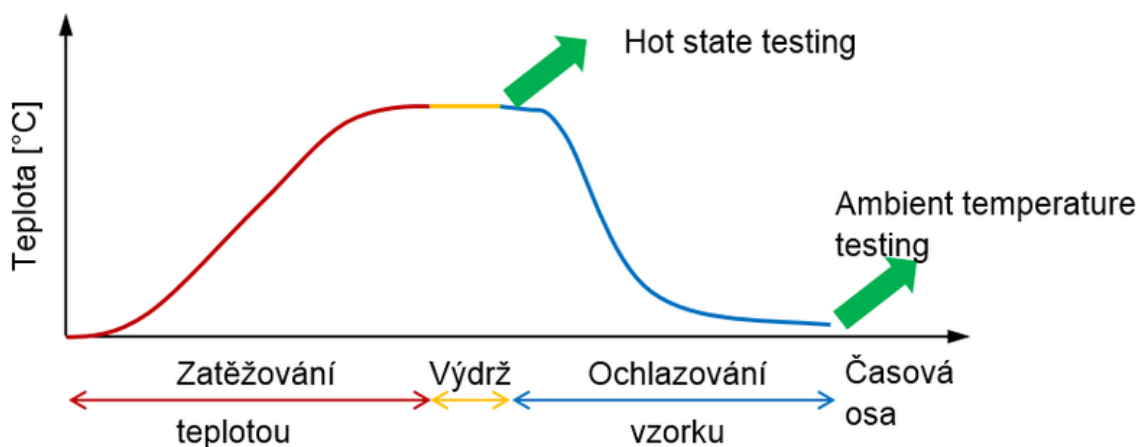
Pevnosť v tlaku bola prevádzaná klasicky na kockách o rozmeroch 150x150x150 mm. Skúšanie bude prebiehať podľa normy ČSN EN 12390-3. [36] Vyhodnotenie tejto skúšky v závislosti na narušení cementovej matrice vplyvom tepelného zaťaženia bude potrebné starostlivo vyhodnotiť [18].

### 5.5.1. TEPLOTNÉ ZATAŽOVÁNIE BETÓNU

V súčasnosti sú známe predovšetkým dve skúšobné metódy teplotného zaťažovania betónu. Je potreba poznamenať, že každé skúšobné centrum má svoje osvedčené postupy a nie vždy majú k dispozícii skúšobné pece, ktoré riadia celý skúšobný proces teplotného zaťažovania. Preto sa v odbornej verejnosti stretávame s radou skúšobných postupov, kedy sú telesá teplotne zaťažované len v menších, predovšetkým v keramických a žihacích peciach až po akreditované skúšobné ústavy disponujúce najmodernejším skúšobným zariadením.

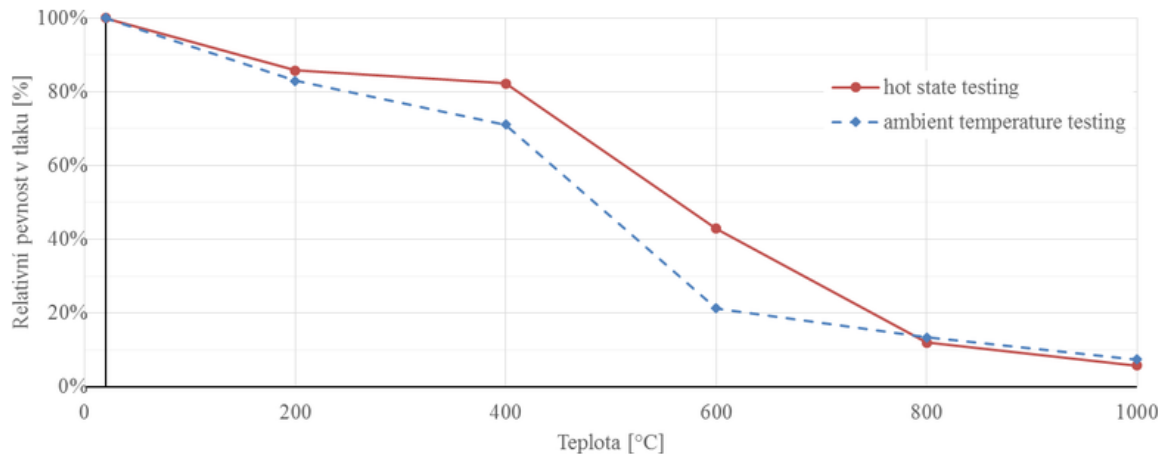
Skúške teplotného zaťažovania betónu je treba venovať špeciálnu pozornosť keďže sa jedná o konštrukčné betóny, ktoré sú vystavené kombinácií viacerých zaťažení v priebehu času. Vlastnosti týchto betónov, treba zohľadniť aj v konštrukčnom návrhu. Pre skúšanie žiaruvzdorných materiálov sa používa viacero typov skúšok. Podľa p. Rydvala a Šimúnka [17] sa dajú tieto skúšky rozdeliť do dvoch základných kategórií:

- a. **Hot state testing** – testovanie počas teplotného zaťaženie. Táto skúška má najväčšiu výpovednú hodnotu keďže sa jedná o kombináciu tlaku a tepelného zaťažovania
- b. **Ambient temperature testing** – testovanie po vychladení na laboratórnu teplotu. Výhodou tohto typu testovania je použitie bežných laboratórnych pomôcok.



Graf 6 Ukážka jednotlivých typov testovania [17]

Podľa Kloknerovho výskumného ústavu v Prahe sa jednotlivé odchýlky v rozdielnosti testovania líšia podľa uvedeného grafu č. 7. [17] Podľa normy EN 1994-1-2 [37] sa dá do výpočtov uviesť súčiniteľ  $K_{c,\theta}$ , ktorý slúži na zohľadnenie teploty pri testovaní pevností, avšak táto norma nedefinuje použitie pre ľahké betóny a tento koeficient je použiteľný len do určitej miery.



**Graf 7** Porovnanie výsledkov zaťažovania tlakom počas teplotného zaťaženia a po ňom pre referenčný betón C 30/37 bez vlákien [3]

## 5.5.2. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE ODOLNOSTI VOČI TEPLOTNÉMU ZATAŽOVANIU

Po vyrobení skúšobných vzoriek boli telesá prevedené na výskumné centrum AdMaS, kde prebiehali skúšky tepelným zaťažovaním. Celý skúšobný proces teplotného zaťažovania bol prevedený v troch nasledujúcich dňoch. Tento postup bol zvolený tak, aby jednotlivé skúšobné telesá boli skúšané v čo najviac zhodnom starí betónu a bolo možné reálne porovnať hodnoty medzi referenčnou receptúrou **REC 0** a receptúrou **REC 1** až **REC 3** LWAC. V prvom štádiu boli vzorky podrobené teplotnému zaťažovaniu s maximálnou teplotou 600°C. Do pece boli vždy umiestnené 3 kusy skúšobných telies od každej receptúry, spolu teda 12 kusov kociek. Jednotlivé skúšobné telesá boli v peci rovnomerne uložené tak, aby každá z receptúr mala rovnakú pozíciu a neboli ovplyvňované – napríklad všetky skúšobné telesá z jednej receptúry blízkosti horáku a podobne. Týmto spôsobom tak bol zabezpečený aj tok tepla okolo všetkých kociek a zároveň aby pôsobil na všetky povrchy skúšobných telies. Homogenitu tepla v skúšobnej peci zabezpečovali dva horáky a teplotu snímali viaceré teplotné snímače umiestnené mimo skúšobných vzoriek v peci. Po tepelnom zaťažovaní sa vzorky nechali prirodzene – bez tepelného šoku vychladíť po dobu približne 24 hodín a nasledovalo váženie pre vyhodnotenie hmotnostných zmien a tlakové zaťažovanie.



**Obrázok 16** Uloženie skúšobných vzoriek do pece

Následne bol rovnaký postup použitý aj pre teplotné zaťaženie betónov na 800°C. Poslednou fázou bolo prevedenie teplotného zaťaženia vzoriek teplotou 1000°C. Tato fáza sa navyše oproti predošlým vyznačovala testovaním nielen skúšobných kociek, ale taktiež vyrobených betónových panelov. Počas výroby boli do panelov osadené montážne oká, ktoré umožňujú ľahšiu manipuláciu pri osadení na skúšobnú pec. Panely tak slúžili ako záklop pece. Rovnako tak behom výroby panelov boli osadené termočlánky, pre následné zistenie teploty počas zahrievania betónu. Tento postup bol zvolený vzhľadom na prebiehajúci výskum, aby bolo behom jedného merania dosiahnutá čo najširšia škála výsledkov. Avšak táto práca obsahuje len vybranú časť získaných dát, ktoré sú úmerné rozsahu a požiadaviek na spracovanie bakalárskej práce.



**Obrázok 17** Pohľad na pecnú zostavu so zaklopením pomocou vyrobených skúšobných betónových panelov, **Obrázok 18** Pohľad do pece pri teplotnom zaťažovaní 1000°C

### 5.5.3. VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV LWAC VOČI TEPLOTNÉMU ZAŤAŽENIU

Táto časť obsahuje vyhodnotenie všetkých výsledkov, ktoré boli dosiahnuté behom teplotného zaťažovania, kde boli podrobené teplotám 600, 800 a 1000°C.

#### Porovnanie zmien farby vplyvom teplotného zaťažovania

Prvotným javom, ktorý je viditeľný aj voľným okom je farebná zmena povrchu betónu, ktorý je vystavený vysokým teplotám. Farebné spektrum povrchu betónu odpovedalo obecným špecifikáciám vid' Tab. 6 v kapitole 3.5.

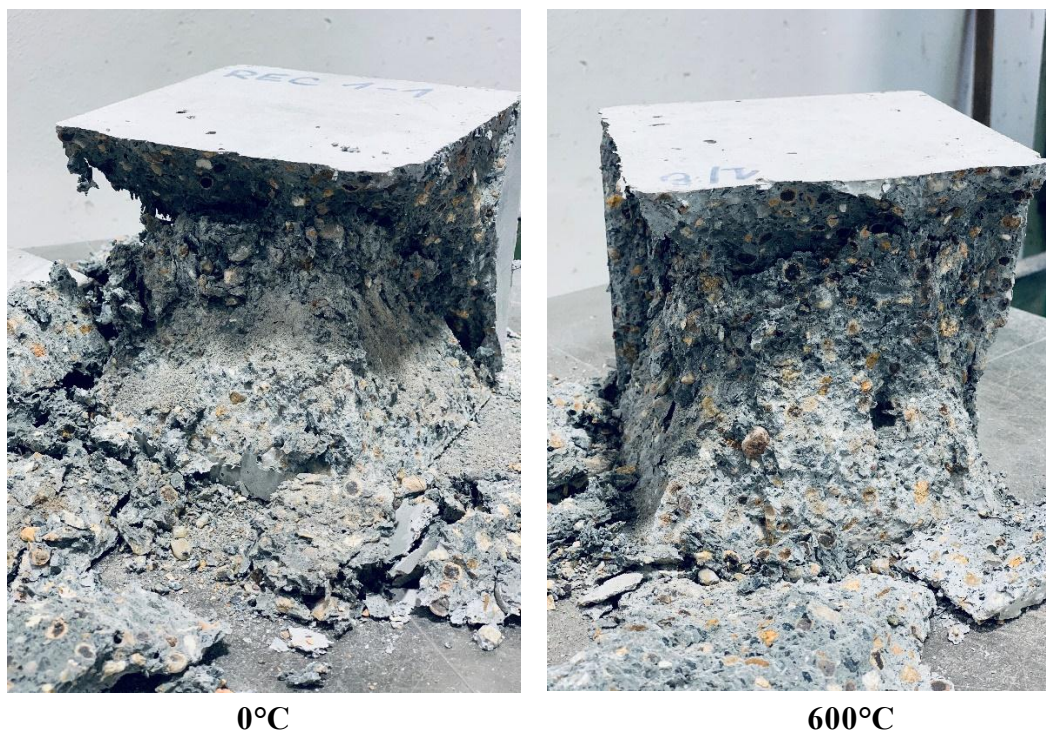
#### Povrchové zmeny betónu vplyvom tepelného zaťažovania

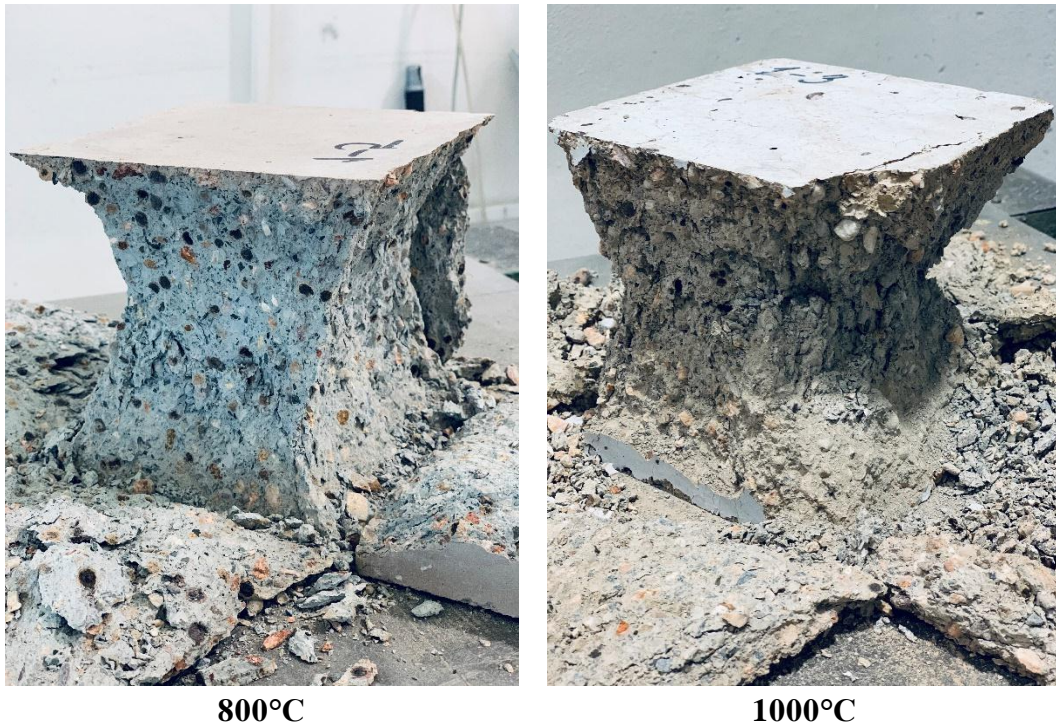
Zmeny na povrchu betónu sú sprievodným javom behom zahrievania betónu. Skúšobné telesá zaťažované teplotou 600°C nevykazovali výrazné vznik trhlín. Naopak pri zvýšení teploty na 800°C dochádzalo k prvým prejavom, vid' nasledujúci obrázok. Najvýraznejší efekt bol sledovaný pri teplote 1000°C, kde došlo k pomerne rozsiahlemu poškodeniu povrchu betónu, u všetkých receptúr **REC 0** až **REC 3**, s výraznými trhlinami v celej ploche skúšobného

vzorku a to ako na kockách, tak na spodnej strane betónových panelov, ktoré boli vystavené pôsobeniu vysokej teploty.



**Obrázok 19** Povrchové zmeny betonu, vzoriek receptúry s označením **REC 1**. Vzorka 1-11 zaťažovaná 800°C so šedou farbou povrchu a viditeľnými trhlinami. Vzorka 1-3 so značne bledšou farbou a mierne rúžovým/oranžovým nádychom so značne porušeným povrchom.





**Obrázok 20** Porušenia skúšobného vzorku **REC 1** vo všetkých sledovaných teplotách

Po skúške pevnosti betónu v tlaku boli skúšobné vzorky zaťažované až do úplného porušenia z dôvodu odberu vzoriek a taktiež k umožneniu sledovania štruktúry betónu. Z obrázku je jasne viditeľný efekt PP vlákien u vzoriek bez teplotného zaťažovania. Naopak pri teplotnom zaťažovaní 600°C až 1000°C došlo k potvrdeniu obecného faktu, že sa PP vlákna behom zahrievania roztaví v štruktúre betónu. So zvyšujúcou sa teplotou bola zreteľná aj farebná zmena štruktúry betónu, čo má pravdepodobne za následok odparovanie vody, či už technologickej alebo zámesovej. U vzoriek, ktoré boli vystavené teplote 1000°C bola viditeľná najväčšia zmena v štruktúre. Domnievame sa, že pri tejto teplote prišlo k oslabeniu tranzitnej zóny, preto lomová línia viedla mimo zŕn Agloporitu, ktoré nie sú pri odhalenej štruktúre po zaťažovaní na 1000°C a následnom tlakovom zaťažovaní vidieť v podobe odhalených čiernych jadier. Porušenie nastalo v cementovej matrici, ktorá mala viditeľne zmenenú farbu a oslabenú súdržnosť.

### **Zmena objemovej hmotnosti betónu vplyvom tepelného zaťažovania**

So zmenou vlhkosti, resp. stratou vody behom zahrievania betónu dochádza aj ku zmene objemovej hmotnosti zatvrdnutého LWAC. V prípade LWAC je táto zmena ešte výraznejšia, pretože betón obsahuje nielen zámesovú vodu, ale taktiež technologicкую vodu na ošetrenie umelého kameniva. Z nasledujúcej tabuľky je jasne viditeľný takmer konštantný trend poklesu objemových hmotností u všetkých receptúr betónu a to bez ohľadu, či sa jedná o referenčnú receptúru **REC 0** obsahujúcu len prírodné kamenivo alebo LWAC receptúry **REC 1** až **REC 3**.



**Tab. 13** Vyhodnotenie objemovej hmotnosti pre jednotlivé zaťažovacie teploty

Označenie receptúr	Objemová hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]					
	600°C		800°C		1000°C	
<b>REF 0</b>	2190	2170	2090	2080	2030	2030
	2160		2070		2040	
	2170		2080		2020	
<b>REC 1</b>	2110	2110	1980	1980	1900	1900
	2120		1980		1900	
	2100		1970		1900	
<b>REC 2</b>	1990	1990	1860	1840	1800	1810
	2010		1820		1810	
	1980		1850		1830	
<b>REC 3</b>	1890	1870	1720	1730	1720	1710
	1860		1710		1710	
	1870		1750		1700	

V prípade referenčnej **REC 0** došlo k celkovému poklesu objemovej hmotnosti, medzi 0 a 1000°C, o 12,8 %. U receptúr obsahujúcich Agloporit bol zistený mierne vyšší pokles objemových hmotností na hodnotu približne 15 %.

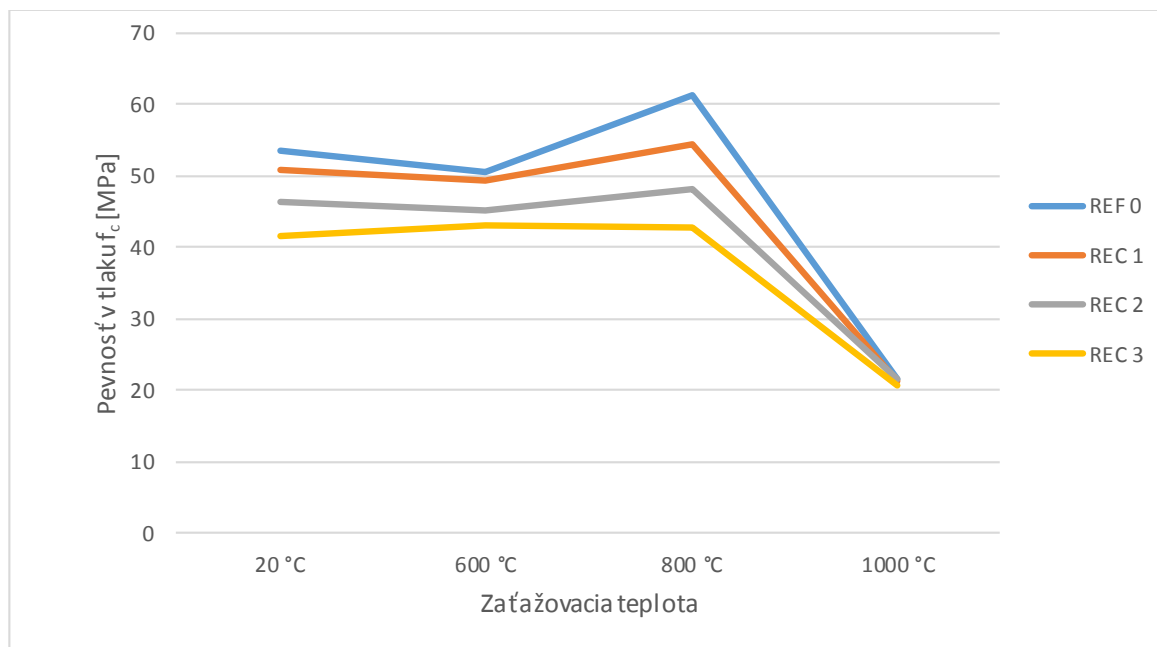
### **Zmena pevnosti v tlaku betónu vplyvom tepelného zaťažovania**

Pri stanovení pevnosti betónu v tlaku sa očakával obecný predpoklad, ktorý sa vyskytuje vo väčšine odborných publikácií sa touto problematikou bez ohľadu na to, či sa jedná o tradičný alebo ľahký betón. V priebehu zahrievanie betónu, s navyšujúcou sa teplotou, dochádza v rôznych štádiách prebývajúcej teploty k modifikačným premenám v mikroštruktúre betónu, čo vo výsledku vedie ku zníženiu pevnosti betónu v tlaku. Na základe použitého spôsobu teplotného zaťažovania a následného zisťovania pevnosti betónu v tlaku bola zistená tzv. reziduálna pevnosť. [3]

**Tab. 14** Vyhodnotenie pevnosti v tlaku pre jednotlivé zaťažovacie teploty

Označenie receptúr	Pevnosť v tlaku [MPa]					
	600°C		800°C		1000°C	
<b>REC 0</b>	50,3	50,6	61,9	61,1	23,6	21,6
	53,9		64,6		20,5	
	47,7		56,9		20,8	
<b>REC 1</b>	50,9	49,3	56,2	54,5	21,2	21,3
	49,9		55,0		21,8	
	47,1		52,3		20,8	
<b>REC 2</b>	45,4	45,0	49,8	48,2	20,6	21,6
	45,3		47,4		22,4	
	44,2		47,3		21,9	
<b>REC 3</b>	43,6	43,1	42,9	42,6	21,6	20,7
	43,6		x		20,0	
	42,1		42,3		20,4	

Dosiahnuté výsledky pevností v tlaku jasne ukazujú pokles hodnoty u **REC 0** medzi 0 a 600°C. U receptúr **REC 1** a **REC 2** došlo v tomto štádiu k získaniu takmer rovnakých pevností, u **REC 3** naopak k miernemu nárastu pevnosti. Na základe odborných rešerší a získaných znalostí, je možné tento trend pripísať uvoľnenej vode behom modifikačných premien, čo mohlo krátkodobo viesť k dodatočnej hydratácii a tým pádom k navýšeniu pevností v tlaku. Najzaujímavejších výsledkov sme dosiahli pri teplote 800°C. V tomto štádiu bol očakávaný pokles pevností, avšak naopak pri receptúrach **REC 0**, **REC 1**, **REC 2** nastal nárast pevností. Toto tvrdenie je viditeľné na grafe 8. Dostupné zdroje výskumu [40], [26] vysvetľujú tento trend premenou hydraulickéj väzby v betóne na väzbu keramickú. V tomto prípade, tak dochádza k čiastočnému slinutiu, ktoré vedie práve ku zvýšeniu pevností betónu v tlaku. Nad rámec tejto bakalárskej práce budú prevedené ďalšie analýzy, ktoré napomôžu vysvetliť aké premeny sa v mikroštruktúre betónu odohrali. Poslednou fázou bolo zahriatie kociek a betónových panelov na teplotu 1000°C. Teplota v peci tuto hodnotu mierne prekročila a dosiahla maximum pri 1019°C. Pri tejto teplote bol zistený jasný pokles pevností v tlaku a to vo všetkých skúmaných receptúrach bez ohľadu na zloženie. U **REC 0** prišlo z pôvodných 53,4 MPa k poklesu na 21,6 MPa. **REC 1** z 50,8 MPa na 21,3 MPa, **REC 2**, **REC 3** v zastúpení 46,2 MPa na 21,6 MPa resp., pokles z 41,6 MPa na konečných 20,7 MPa. V priemere ide o pokles o cca 60 % oproti pôvodnej hodnote pevnosti betónu v tlaku.



**Graf 8** Grafické vyhodnotenie pevnosti v tlaku pre jednotlivé zaťažovacie teploty

#### 5.5.4. NÁVRH RECEPTURY LWAC S ODOLNOSTÍ VŮČI VYSOKÝM TEPLOTÁM

Na základe výsledkov experimentu s prihliadnutím na ekonomické hľadisko bola zostavená receptúra, ktorá by mohla byť schopná splňať všetky požiadavky a zároveň čo najviac znížiť objemovú hmotnosť.

Navrhnutá receptúra LWAC betónu bola zostavená na základe získaných výsledkov fyzikálne mechanických vlastností, spolu s výsledkami a správaním sa počas zaťažovania teplotou, z receptúry s označením **REC 2**. Obecne LWAC dosahovali pomerne vysokých pevnostných tried LC betónov, avšak objemová hmotnosť sa pohybovala skôr na hranici bežných betónov. Preto bol zvolený iný pomer medzi množstvom prírodného a aglomerovaného kameniva, aby bol dosiahnutý predpoklad objemových hmotností pod hranicou 2000 kg/m<sup>3</sup>. Percentuálna náhrada prírodného kameniva aglomerovaným kamenivom je 60 %. Pri zvýšení obsahu aglomerovaného kameniva bolo potrebné zvýšiť aj potrebu technologickej vody pre navlhčenie Agloporitu. Naopak v oblasti spojiva bolo ponechané pôvodné množstvo portlandského zmesného cementu, avšak množstvo mikrosiliky bolo znížené. Pre overenie navrhutej receptúry by bolo nutné použiť rovnaké vstupné suroviny z rovnakých výrobných šarží a vyrobiť betón za rovnakých podmienok ako v prípade reálne odskúšaných receptúr **REC 0** až **REC 3**.

**Tab. 17** Navrhovaná receptúra LWAC

Surovina		Množstvo v kg na 1 m <sup>3</sup> betónu
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R		375,0
Mikrosilika		21,0
Amfibolit 0/4		915,0
HTK 4/8		280,0
Agloporit 4/8		270,0
Superplastifikačná prísada		3,3
PP vlákna		1,0
Voda	zámesová	207,0
	technologická	51,0

## 6. ZÁVER

Bakalárska práca sa zaoberala témou odolnosti ľahkých betónov s aglomerovaným kamenivom pri krátkodobom vystavení vysokým teplotám.

Teoretická časť práce je zameraná na získanie obecných znalostí o výrobe kameniva Agloporit. Uvedené sú taktiež základné vstupné suroviny, ktoré sú používané pre výrobu týchto betónov. Zo získaných odborných poznatkov bolo prístupné ku spracovaniu experimentálnej časti. Laboratórne boli overené štyri receptúry betónu a stanovené základné fyzikálne - mechanické vlastnosti vrátane odolnosti voči vysokej teplote. V experimente bolo rozhodnuté pre skúšanie po tepelnom zaťažovaní, kedy sa vzorky nechajú prirodzene vychladiť na laboratórnu teplotu a následne sa zaťažujú tlakom. Tento typ skúšania je oproti skúšaniam na "horúcich" vzorkách jednoduchší na prevedenie skúšok a navyše udáva hodnoty pre pevnosti v tlaku na bezpečnú stranu, takže dostávame prísnejšie kritéria pre vyhodnotenie. Napriek použitiu aglomerovaného kameniva sa podarilo dosiahnuť kritériám pre LWAC len v prípade receptúry **REC 3** avšak zvyšné dve receptúry sa pohybovali v spodných hraniciach bežného betónu. Tento fyzikálny parameter bol zapríčinený použitím amfibolitického kameniva s dobrou tepelnou odolnosťou a vhodnou dostupnosťou v rámci lokality výroby betónu a ťažby kameniva, ktorý má vysokú objemovú hmotnosť. Priemerná hodnota poklesu objemovej hmotnosti po tepelnom zaťažovaní na 1000 °C je 300 kg/m<sup>3</sup> čo je približne 14 %. Podľa očakávaní mal vyrobený betón výborné vlastnosti čo sa týka pevnosti v tlaku po tepelnom zaťažovaní kde by sa **REC 3** dala zaradiť do pevnostnej triedy LC 35/38. Vzhľadom k dosiahnutej objemovej hmotnosti spadá **REC 1** do pevnostnej triedy bežných betónov C 40/50 a **REC 2** triedy C 35/45. Pri vyhodnotení krivky pevnosti v závislosti na teplotnom zaťažovaní bolo dosiahnutý približne rovnaký trend vývoja pevnosti pri teplotách do 600°C. Pri teplotách okolo 800°C bolo dosiahnutých nečakaných nárastov pevností pri vzorkách referenčných **REC 0** a **REC 1** a **REC 2**. Toto výrazné zvýšenie pevnosti v tlaku mohlo byť zapríčinené vznikom nových fáz v štruktúre cementového tmelu s pridaním mikrosiliky a ostatných zložiek. Toto tvrdenie bude nutné overiť pomocou RTG

analýzy, prípadne inými metódami. V receptúre **REC 3** k tomuto javu nedošlo, predpokladáme, že nárast bol obmedzovaný obsahom Agloporitu dosahujúci náhrady prírodného kameniva až 75 %, teda najviac zo všetkých študovaných receptúr. Pri teplotách okolo 1000°C nastal u všetkých vzoriek rapidný pokles pevností, avšak betón bol stále kompaktný aj napriek výraznej zmene farby betónu a viditeľným prasklinám na povrchu. Pri tejto teplote a získanej objemovej hmotnosti by sa dali všetky receptúry betónu zaradiť do pevnostnej triedy LC 16/18.

Podľa vyhodnotených získaných výsledkov a poznatkov je zrejmé, že je možné vyrobiť kvalitný ľahký betón s použitím aglomerovaného kameniva na báze vysokoteplotných popolčiek, ktorý bude schopný odolávať vysokým teplotám

## 7. POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] ROUFAEL, G., BEAUCOUR, A., ESLAMI, J., HOXHA, D., NOUMOWÉ, A., Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures, 2020
- [2] ČSN EN 13501-1, Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 48 s.
- [3] KUPILÍK, V., Stavební konstrukce z požárního hlediska, 1. vydání, Grada Publishing, Praha, 2006, p. 0-272, ISBN 80-247-1329-2.
- [4] REICHEL, V., Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí, VÚPS, Praha, 1971
- [5] HAGER, I., Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties, PhD thesis (in french), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, november 2004, 182 p.
- [6] COLLEPARDI, M., Moderní beton, Betonové stavitelství, Praha, 2009, p. 0-342, ISBN 978-80- 87093-75-7
- [7] SVOBODA, L., Stavební hmoty, 1. vyd., Bratislava: Jaga, 2004, 471 s, ISBN 80-807-6007-1
- [8] Svoboda a syn s.r.o, výzkum a vývoj – Spékaná kameniva a Agloporit. Dostupné na: <https://sasbrno-vyzkum.cz/sluzby/spekana-kameniva-a-agloporit/agloporit/>
- [9] AITICIN, P.-C., Vysokohodnotný beton, Praha, ČKAIT, 2005, ISBN 80- 86769-9-93
- [10] [https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP\\_Documents/FireSafety\\_CZ.pdf](https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/FireSafety_CZ.pdf)
- [11] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P., Lehké stavební látky. 1. vyd. učební opory VUT FAST Brno, 2006
- [12] TZB Info. Vývoj a základní vlastnosti ultralehkého betonu [online]. Praha: Topinfo. [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-maltyomitky/10785-vyvoj-a-zakladni-vlastnosti-ultralehkeho-betonu>
- [13] JAŠŠO, MOLNÁR, I., MOLNÁR, A. - Základy aglomerácie jemnozrnných materiálov a priemyselné metódy granulácie a briketovania založené na lisovaní suchých práškov medzi valcami. Praha: Procesní inženýrství, 1994
- [14] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications, 1. vydání Košice, červen 2008, 156 str., ISBN 978-80-553-0040-5
- [15] HENKENSIEFKEN, R., NANTUNG, T., WEISS, W.J.: Reducing Restrained Shrinkage in Concrete: Examining the Behavior of Self-Curing Concrete Made using Different Volumes

of Saturated Lightweight Aggregate, proceedings of Concrete Bridge Conference held in May 2008 in St. Louis, USA, 2008

[16] KRÁTKÝ, J., Vliv přísad na vlastnosti anorganicko organických kompozitů., Disertační práce, 2004, Brno

[17] RYDVAL, M., ŠIMŮNEK, I. Unikátní zkušební pec. In: Pražská technika (5/2015). ISSN 1213-5348

[18] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 1. Praha: ČNMZ, 2009

[19] J. DURGA CHAITANYA KUMAR, E. ARUNAKANTHI - The Use of Light Weight Aggregates for Precast Concrete Structural Members online at: [https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n10\\_70.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n10_70.pdf)

[20] BRIATKA, P., - VNÚTORNÉ OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU LAHKÝM KAMENIVOM Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta

[21] TERZIJSKI, I., TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY VÝVOJE A APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY – ČÁST I. ÚVOD A SLOŽKY VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU

[22] SOKOLÁŘ, R., SMETANOVÁ, L. . Dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body: Influence of fly ash granulometry and pentasodium triphosphate addition. Ceramics International [online]. 2010, 36(1), 215-221 [cit. 2018-03-23]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2009.07.009

[23] ELLIS, P. R., Analysis of mortars by differential thermal analysis, Historic Mortars: Characteristics and Test, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications s.a.r.l, France, 2000, p. 133-142, ISBN: 2-912143-15-2

[24] Granulace [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: [Http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt3/6%20Granulace.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/6%20Granulace.pdf). Učební texty. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem

[25] FIB - Federation internationale du béton, Fire design of concrete structure - materials, structures and modelling, 2007, Lausanne, Switzerland: Case Postale, 2007, 106 s, ISBN 978-2-88394-078-9

[26] SUCHÁNEK, V., - Experimentální analýza speciálních betonů vystavených extrémním teplotním namáháním

[27] YANG, K-H. a kol.: Properties of cementless mortars activated by sodium silicate, Construction and Building Materials 22 (2008), s. 1981 – 1989.

[28] BRIATKA, P, ŠEVČÍK, I., ASSESSMENT OF INFLUENCE OF SPREAD REINFORCEMENT ON CONCRETE PROPERTIES

[29] ČSN EN 206+A1 (732403) Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

[30] <https://www.liapor.cz/produkty/kamenivo/pro-stavebni-ucely/>

- [31] ČSN EN 1097-5 (721194) Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně
- [32] ČSN EN 933-1 (721193) Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor
- [33] ČSN EN 1097-6 (721194) Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti
- [34] ČSN EN 12390-7 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
- [35] ČSN EN 12350 (731301) Zkoušení čerstvého betonu
- [36] ČSN EN 12390-3 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [37] EN 1994-1-2 (2005) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC
- [38] ČSN 72 2113 (722113) Stanovení měrné hmotnosti cementu
- [39] ČSN EN 1008 (732028) Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu
- [40] GRATCLOVÁ, K.,- Možnost substituce plniva a pojiva požárně odolných správkových malt alternativními surovinami (2014), 70 s.