



**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

**MALTY S ALKALICKY AKTIVOVANOU  
MATRICI**  
MORTAR WITH ALKALI-ACTIVATED MATRIX

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Hana Černá

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



# 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>	Hana Černá
<b>Název</b>	Malty s alkalicky aktivovanou maticí
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2016
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

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

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Drochytka, R. Trvanlivost stavebních materiálů, učební opora VUT Brno, FAST, 2008  
Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007  
Hela, R.: Technologie betonu II, učební opora VUT Brno, FAST, 2007  
Matoušová, L. Návrh a ověření vlastností alkalicky aktivovaného kompozitního materiálu s vláknovou výztuží. Diplomová práce, VUT Brno, FAST ÚTHD, 2010  
Kováčik, P. Návrh nehořlavé matrice pro kompozitní materiál s vláknovou výztuží. Diplomová práce, VUT Brno, FAST ÚTHD, 2007  
Panský, M.: Návrh geopolymerní matrice s využitím druhotných surovin. Diplomová práce, VUT Brno, FAST ÚTHD, 2008  
Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (r. 2012-2016)  
České a zahraniční normy.  
Internetové zdroje.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Alkalicky aktivované materiály nejsou ve stavebnictví běžně používány, svoje uplatnění mají především ve speciálních aplikacích v extrémních podmínkách a jako pojiva s rychlým nárůstem pevnosti. Přesto, že tyto materiály nejsou využívány ve velkých objemech jako např. cementové betony, představují perspektivní skupinu materiálů.

V teoretické části bakalářské práce popište principy přípravy vybraných alkalicky aktivovaných materiálů, materiály pro jejich přípravu a definujte požadavky na vstupní materiály. Vyhledejte příklady praktických aplikací alkalicky aktivovaných materiálů ve stavebnictví. Proveďte rešerši informací o odolnosti alkalicky aktivovaných materiálů v prostředí s působením mrazu a v agresivních prostředích.

V experimentální části bakalářské práce navrhnete složení alkalicky aktivovaného materiálu. Ověřte vlastnosti tohoto materiálu. Zaměřte se na sledování mrazuvzdornosti a na sledování odolnosti povrchu tohoto materiálu vůči působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Minimální rozsah bakalářské práce 45 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá alkalicky aktivovanými materiály a surovinami pro jejich výrobu. V teoretické části jsou popsány materiály pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů a jsou zde definovány požadavky na vstupní materiály. Dále se práce zabývá odolností alkalicky aktivovaných materiálů a jejich trvanlivostí. Konkrétně pak síranovou odolností, chloridovou odolností, odolností vůči kyselinám, mrazuvzdorností, porozitou, odolností vůči karbonatům, odolností vůči abrazi a odolností proti vysokým teplotám.

V experimentální části byly navrženy čtyři různé směsi alkalicky aktivovaných materiálů. V čerstvém stavu byla stanovena objemová hmotnost. V zatvrdlém stavu byla stanovena objemová hmotnost, pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, mrazuvzdornost, odolnost proti působení vody a chemicky rozmrazovacích látek a tvorba trhlin.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

alkalicky aktivovaný materiál, mrazuvzdornost, trvanlivost, pevnost, CHRL, abraze, odolnost

## **ABSTRACT**

The thesis addresses the issue of alkali-activated materials and their manufacturing components. In the theoretical part the description of such materials is provided and the requirements for source materials are defined. The theoretical part further addresses the resistance of alkali-activated materials and their lifespan - namely sulphate resistance, chloride resistance, acid resistance, frost resistance, porosity, carbonation, resistance, abrasion resistance and heat resistance.

The experimental part of the thesis focuses on compounding four different mixtures of alkali-activated materials. In the loosened stage, the weight was measured. In the hardened stage the weight was measured as well as the tensile strength when bending, the strength under pressure applied, heat resistance, water and defrosting chemicals resistance and formation of cracks.

## **KEYWORDS**

alkali-activated materials, heat resistance, lifespan, strength, freeze-thaw, abrasion, resistance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Hana Černá *Malty s alkalicky aktivovanou maticí*. Brno, 2017. 55 s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 26. 5. 2017

---

Hana Černá  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za trpělivost a cenné rady při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat ostatním zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, kteří mi byli při mé práci nápomocni.

V Brně dne 26. 5. 2017

---

Hana Černá  
autor práce

## OBSAH

I.	ÚVOD	11
II.	TEORETICKÁ ČÁST	12
1.	Alkalicky aktivované materiály	12
1.1	Suroviny pro alkalicky aktivované materiály	12
1.1.1	Aktivátory	12
1.1.2	Hlinitokřemičité práškové suroviny pro výrobu AAM	12
1.1.2.1	Popílký	13
1.1.2.1.1	Rozdíl mezi vysokoteplotními a fluidními popílký	13
1.1.2.2	Struska	13
1.1.2.3	Metakaolín	14
1.1.2.4	Mikrosilika	14
1.2	Požadavky na vstupní materiály	14
1.3	Příprava vybraných AAM	15
1.3.1	Alkalická aktivace vysokopeční strusky	15
1.3.2	Alkalická aktivace popílký	16
1.3.3	Alkalická aktivace metakaolínu	17
1.4	Vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů	17
1.5	Příklady aplikací AAM ve stavebnictví	18
1.5.1	Současné uplatnění AAM v ČR	19
1.6	Trvanlivost alkalicky aktivovaných materiálů	20
1.6.1	Síranová odolnost	20
1.6.2	Chloridová odolnost	21
1.6.3	Odolnost vůči kyselinám	21
1.6.4	Mrazuvzdornost	22
1.6.5	Porozita	23
1.6.6	Odolnost vůči karbonatům	24
1.6.7	Abraze	24
1.6.8	Odolnost proti vysokým teplotám a ohni	25



III. CÍL PRÁCE	26
IV. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
1. Metodika práce	27
2. Vstupní suroviny	28
2.1 Základní materiál	28
2.2 Aktivátor	28
2.3 Struska	28
2.4 Křemičitý písek	28
2.5 Vlákna	28
3. Receptury AAM	29
4. Příprava zkušebních vzorků	30
4.1 Míchání směsi	30
4.2 Zkušební tělesa	30
5. Popis prováděných zkoušek	31
5.1 Objemová hmotnost v čerstvém stavu	31
5.2 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu	31
5.3 Pevnost v tahu za ohybu	31
5.4 Pevnost v tlaku	32
5.5 Mrazuvzdornost	32
5.6 Stanovení odolnosti povrchu zkušebních vzorků proti působení vody a CHRL	33
5.7 Tvorba trhlin	33
6. Výsledky zkoušek	34
6.1 Objemové hmotnosti směsí	34
6.2 Pevnosti	34
6.3 Mrazuvzdornost	36
6.4 Stanovení odolnosti povrchu zkušebních těles proti působení vody a CHRL	37
6.5 Vznik trhlin	38
6.5.1 Vznik trhlin u směsi BL110F	38
6.5.2 Vznik trhlin u směsi BL110F po mrazuvzdornosti (100 cyklech)	38
6.5.3 Vznik trhlin u směsi BL85F	39
6.5.4 Vznik trhlin u směsi BL85F po mrazuvzdornosti (100 cyklech)	39

6.5.5 Vznik trhlin u směsi BL110FS	40
6.5.6 Vznik trhlin u směsi BL110FS po mrazuvzdornosti (100 cyklech)	40
6.5.7 Vznik trhlin u směsi BL85FS	41
6.5.8 Vznik trhlin u směsi BL85FS po mrazuvzdornosti (100 cyklech)	41
V. VÝSLEDKY A DISKUZE	42
VI. ZÁVĚR	44
VII. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
VIII. SEZNAM OBRÁZKŮ	49
IX. SEZNAM TABULEK	50
X. SEZNAM GRAFŮ	51
XI. SEZNAM ZKRATEK	52
XII. SEZNAM PŘÍLOH	53

## **I. ÚVOD**

Alkalicky aktivované materiály představují jedno z možných řešení pro snižování emisí CO<sub>2</sub> při výrobě stavebních materiálů. Při výrobě pojiv pro alkalicky aktivované materiály odpadá náročná výroba cementu. Při výrobě 1 tuny cementu unikne 1 tuna CO<sub>2</sub> do ovzduší a další oxid uhličitý vzniká v procesu hydratace cementu.[1]

V budoucnosti by mohla být menší cena těchto materiálů, protože pro přípravu AAM jsou používány odpadní materiály, jako je struska, popílký či křemičité úlety, které jsou oproti portlandskému cementu levnější. Velká variabilita vlastností AAM je dána užitím různých alkalických aktivátorů a různých vstupních surovin. AAM dosahují dobré odolnosti v agresivním prostředí.

## **II. TEORETICKÁ ČÁST**

### **1. Alkalicky aktivované materiály**

Alkalicky aktivované materiály (AAM) jsou označovány také jako geopolymery. Tyto materiály jsou připravovány polykondenzační reakcí hlinito - křemičitých materiálů v zásaditém prostředí. Tato reakce se označuje jako geopolymrace. AAM patří do skupiny anorganických pojiv. Pro výrobu těchto materiálů se používají odpadní materiály z různých průmyslových odvětví, jako jsou elektrárenské popílků, strusky a jiné anorganické odpady nebo přírodní materiály jako jsou jíly, kaolíny aj. Alkalicky aktivované materiály mají odlišnou technologii výroby oproti procesu hydratace běžných portlandských cementů. V současné době jsou AAM definovány jako alkalické aluminosilikáty bez vápenaté složky připravované alkalickou aktivací metakaolínu roztokem hydroxidu draselného či sodného. [2,3]

#### **1.1 Suroviny pro alkalicky aktivované materiály**

Pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů jsou potřeba dvě základní suroviny: alkalický aktivátor a (hlinito)křemičité práškové suroviny. Nečastěji používané jsou sodné či draselné hydroxidy a křemičitany. Pro přípravu AAM lze použít odpady z průmyslových výroby s výjimkou metakaolínu, který je připravován cíleně. Mezi nevýznamnější patří vysokopecní strusky a různé druhy popílků. [4]

##### **1.1.1 Aktivátory**

V praxi je vhodnější používat rozpustné křemičitany, protože na rozdíl od hydroxidů nejsou klasifikovány jako žíraviny. Do křemičitých aktivátorů patří vodní sklo.

Volba aktivátoru je velmi důležitá, jelikož má vliv na průběh reakce a rozdělujeme je do šesti skupin : hydroxidy, soli slabých kyselin, křemičitany, hlinitany, hlinitokřemičitany a soli silných kyselin. Aktivátor musí obsahovat křemičitan nebo hlinitokřemičitan ve vysokoenergetické fázi. [5]

##### **1.1.2 Hlinitokřemičité práškové suroviny pro výrobu AAM**

Mezi tyto suroviny vhodných k alkalické aktivaci patří nejčastěji elektrárenské popílků, fluidní popílků, strusky z výroby neželezných kovů, zeolity, křemičité úlety a přírodní pucolány. Každá surovina má jiné vlastnosti, což má vliv na hydrataci a průběh reakce. [5]

### 1.1.2.1 Popílky

Popílky jsou jemné částice o velikosti < 150  $\mu\text{m}$ . Jsou to nespalitelné anorganické příměsi, zbylé po spalování uhlí. Čím je uhlí méně kvalitnější, tím více nespalitelných příměsí (popelovin) obsahují. Popílky jsou při spalování unášeny pomocí spalin z pece, kde se zachycují na odlučovačích. Vzniklé množství popílku je závislé na obsahu popelovin v uhlí, zrnitosti uhlí a také na způsobu spalování.

Podle spalování uhlí rozlišujeme dva základní druhy: spalování ve vrstvě se nazývá vysokoteplotní, a dále ve vznosu, což jsou takzvané fluidní popílky. [5]

Vysokoteplotní spalování probíhá při teplotách 1200 – 1700  $^{\circ}\text{C}$ . Spaluje se černé i hnědé uhlí nebo lignin. Při spalování jsou spaliny unášeny a odsiřovány vápnem nebo vápencem. Tomuto popílku říkáme úletový. [6]

U fluidního spalování se palivo spaluje společně s mletým vápencem. Spalování probíhá při teplotě 850  $^{\circ}\text{C}$ . při tomto procesu vzniká ložový popel. [6]

#### 1.1.2.1.1 Rozdíl mezi vysokoteplotními a fluidními popílkami

Zásadní rozdíl mezi těmito popílkami je především ve vyšším podílu oxidu sírového  $\text{SO}_3$ , dále množství reaktivního  $\text{CaO}$  a hodnot při ztrátě žháním. Vysokoteplotní popílky mají pucolánovou vlastnost, zatímco fluidní popílky tuhnou a tvrdnou při smísení s vodou bez přísad a příměsí. [7]

### 1.1.2.2 Struska

Strusky jsou nekovové výrobky hutní výroby, které vznikají roztavením hlušiny rudy a dalších pomocných látek jako jsou například: struskotvorné látky nebo podíly pevných paliv. Strusky vznikají při teplotách nad 1100  $^{\circ}\text{C}$ . [8]

**Tabulka 1** - Běžné složení vysokopevnostních strusek [8]

složení oxidů	obsah v % (rozmezí)	obsah v % (průměrně)
$\text{SiO}_2$	21-40	38
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5 - 14.5	10
$\text{FeO}$	0.2 - 2.8	1
$\text{MnO}$	0.2 - 10.5	2
$\text{CaO}$	29-48	42
$\text{MgO}$	1- 15	6
$\text{F}_2\text{O}_5$	stopy - 1	stopy
$\text{S}^{2-}$	0.5 - 3.8	1

Nejčastěji používaná struska do betonu je granulovaná vysokopecní struska. Z chemického složení je velmi proměnlivá a obsah složek je následující: 30 – 50 % CaO, 28 – 40 % SiO<sub>2</sub>, 8 – 24 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 1 – 18 % MgO. [8]

Z hlediska mineralogického obsahuje křemičitany, hlinitokřemičitany, hlinitany a železitany. Při vypouštění z pece se musí prudce ochladit, aby zgranulovala.

Zásadním kritériem pro kvalitu strusky je modul zásaditosti  $M_z$ : [8]

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Struska se používá nejčastěji jako složka do směsných cementů, nebo jako příměs do betonu. [8]

### 1.1.2.3 Metakaolín

Metakaolín je materiál vyráběný z kaolinitických jílu, který se získává tepelnou úpravou v rozmezí teplot 650 – 800 °C. Dalším zdrojem mohou být i kaly z recyklace papíru. Hlavními složkami jsou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>. Metakaolín má i pucolánové vlastnosti, což znamená, že získává vlastnosti reakcí Ca(OH)<sub>2</sub> s vlhkostí za vzniku kalciumsilikátů a aluminátů. Metakaolín na sebe váže alkálie a vykazuje velkou mechanickou a chemickou odolnost a také zvyšuje odolnost povrchu proti působení vody a agresivnímu prostředí.

Metakaolín se používá jako náhrada za část cementu. Další použití je do omítek, malt či betonových směsí, ale také se používá do alkalicky aktivovaných materiálů. [9]

### 1.1.2.4 Mikrosilika

Mikrosilika neboli křemičitý úlet je ceněná druhotná surovina. Vzniká jako odpad z výroby křemíků nebo slitiny ferosilicia (FeSi) a nebo může být záměrně vyráběna. Má velmi malá zrna o velikosti 0,2 – 2 um, které díky elektrickému náboji tvoří shluky o velikosti až 50 um. Má kulovitý tvar, proto má pozitivní vliv na reologii čerstvého betonu. Mikrosilika se používá do betonu i do AAM, protože přispívá ke zlepšení vodotěsnosti a pevnosti. [10,11]

## 1.2 Požadavky na vstupní materiály

Výchozí suroviny mají největší vliv na vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů. Dále je to způsob a podmínky za jakých jsou tyto látky připravovány. [12]

Kritéria, která nejvíce ovlivňují vstupní materiály AAM jsou:

- Složení aluminosilikátového prekurzoru, což je charakterizováno poměrem Si:Al. Se zvyšujícím poměrem těchto prvků se zvyšuje pevnost v tlaku, ale doba tuhnutí

materiálů se prodlužuje. Při určitém zvýšení poměru Si:Al začne pevnost opět klesat. Hodnota poměru se pohybuje mezi 1,7 -2,0. [12]

- Jemnost mletí materiálů
- Použitý druh alkalického aktivátoru, dávka a koncentrace. [12]

### 1.3 Příprava vybraných AAM

Alkalickou aktivací vznikají alkalicky aktivované materiály s půcolánovými vlastnostmi. Tato reakce aluminosilikátových materiálů probíhá ve vodném prostředí, kdy Ph musí být větší než 12. Jsou to materiály na rozhraní mezi anorganickými pojivy, skelnými a keramickými materiály. [13,14]

Alkalická aktivace probíhá vždy ve třech krocích. Kroky mohou postupovat různými způsoby, které vedou k rozdílným výsledným. Formování geopolymery je rychlé a všechny kroky probíhají téměř najednou. V prvním kroku je aluminosilikátové sklo rozpuštěno silným alkalickým roztokem, který podporuje vznik zeolitických prekurzorů z rozpuštěných částic (nuklidů). Volné ionty se přeorientovávají a následně vytvářejí shluky. Poté, co nuklidy dosáhnou hraniční velikosti, začínají růst krystaly. Tyto molekuly v roztoku se mohou spojovat a vytvářet velké molekuly. Molekuly jsou ve formě amorfního gelu. Vzniklý geopolymer má obecný vzorec  $M_n [-(Si-O)_z - Al-O]_n \cdot wH_2O$ . Krystalický růst ze zeolitických nuklidů probíhá velmi pomalu. [14]

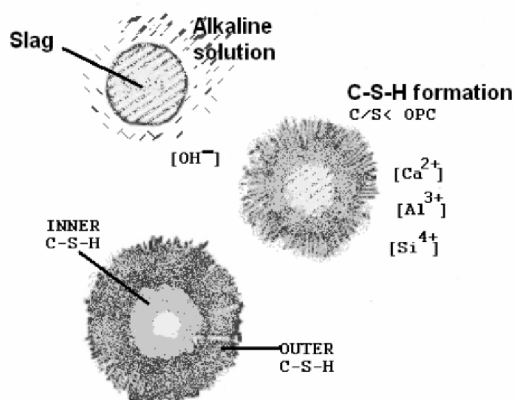
#### 1.3.1 Alkalická aktivace vysokopecní strusky

Výzkum a vývoj AAM na bázi strusky vyvinul Glukhovskij a následně Krivenko. Vysokopecní struska je často aktivována NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> nebo i sodným či vodním sklem. Do této aktivace se často přidávají i další materiály, které ovlivňují vlastnosti konečného produktu. Patří jsem hlavně mletý vápenec, popílký a mikrosilika. Hlavním důvodem přidání mikrosiliky je potlačení výkvětů a zlepšení chemické odolnosti. Dávka aktivátoru u strusky je kolem 2 – 7 hm. %. [15]

V prvním kroku je začlenění Ca<sup>2+</sup> iontů do dané struktury. Při průběhu této reakce se alkalické kationty formují na konečnou strukturu. Vše je velmi rychlé. Do jedné hodiny se zhydratuje jedna třetina strusky při pokojové teplotě. [15]

Struska obsahuje vnitřní produkty jako jsou KOH nebo NaOH a CSH fáze. Struktura vytváří kruhový charakter (obrázek1) složený s CSH gelu, který je strukturálně podobný

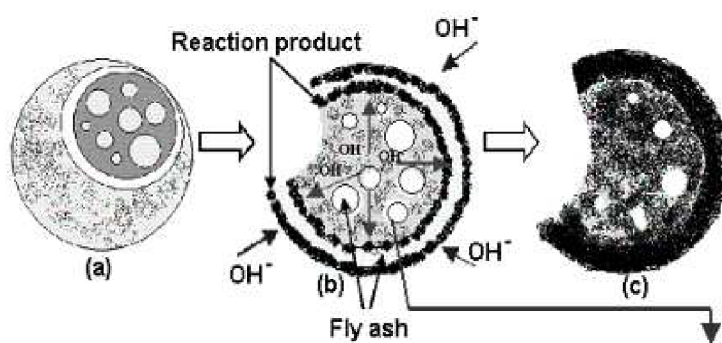
tobermoritu. Hlavním produktem AAS je tedy CSH fáze, která se liší od hydratačních produktů cementu s nižší hodnotou poměru C/S. Poměr C/S je též ovlivněný pH, kdy klesá s jeho zvyšující se hodnotou a zvoleným typem alkalického aktivátoru. [16]



**Obrázek 1** – Teoretický model aktivované strusky [15]

### 1.3.2 Alkalická aktivace popílku

Alkalická aktivace popílku je založena na principu syntézy zeolitů. V prvním kroku probíhá nukleace, při které dochází k rozpuštění aluminosilikátů, které vytvoří iontové komplexy. Následně nuklid dosáhne dané velikosti a začne růst. Výsledným produktem této aktivace je amorfni matrice alkalického aluminosilikátového gelu (N(K)ASH gel). Tento gel lze nazvat jako zeolitický prekurzor. [15]



**Obrázek 2** - Teoretický modul alkalicky aktivovaného popílku [15]

U obrázku (a) dochází ke vzniku díry. Díra byla vytvořena chemickým působením alkalického aktivátoru na popílek a následním pronikáním aktivátoru do zrna popílku (b). Všechny konečné produkty vznikají současně a to jak uvnitř tak i venku částice. Obrázek (c) nám ukazuje zrníčko popílku, které je téměř celé zreagované. [15]



### 1.3.3 Alkalická aktivace metakaolínu

Metakaolin se v alkalickém prostředí zcela nerozpustí a jeho část může způsobovat výkvěty. Poměr  $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$  ve struktuře kopolymerů můžeme upravovat vodním sklem o vyšším modulu nebo přidávkem mikrosiliky . Tento poměr se může pohybovat v rozmezí 2 - 4. [16]

Mikrosilika může obsahovat velmi malé množství jemných kovových složek, které se rozpouští v alkalickém prostředí za vývoje vodíku. Toto rozpouštění může způsobovat bobtnání tuhacímho kompozitu. Pokud se alkalickou aktivací metakaolinu připravují geopolymery bez vápenaté složky jejich objemová hmotnost je v rozmezí 1300 – 1900  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [16]

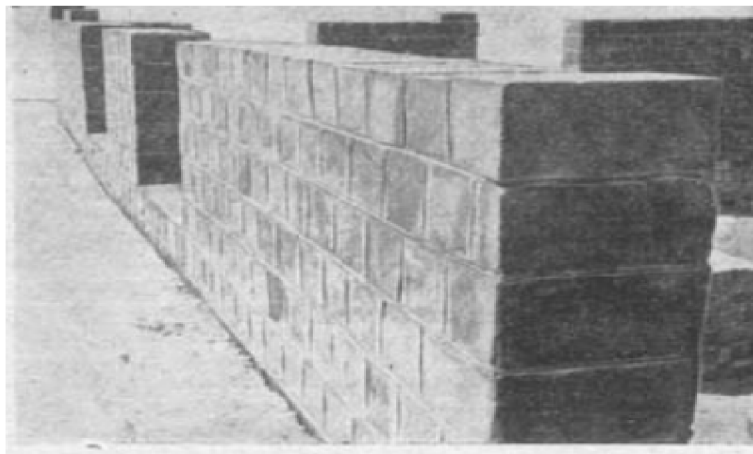
### 1.4 Vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů

AAM jsou materiály s amorfni strukturou. Za vyšších teplot přechází v mikrokrytalickou strukturu. Tyto materiály závisí na různých faktorech, jako jsou například: výchozí materiál, chemické složení aktivátoru a podmínky vytvrzování. [3,17,]

Základní vlastnosti těchto materiálů je nepropustnost, proto je můžeme zařadit mezi hydraulická pojiva, nehořlavost, tepelná odolnost do 1000°C, netvoří spodiny, jsou velice pevné, mají nízkou tepelnou vodivost, vykazují dobrou odolnost proti vlivu zředěných kyselin a zásad. AAM z popílku mají vysokou pevnost v tlaku během prvních několika hodin a to po 24 hodinách 20-40 MPa. Po 28 dnech nabývají 50-80 MPa a po uplynutí této doby už pevnosti narůstají velmi pomalu nebo se úplně zastaví. Největší předností AAM směsi je, že ji uvažujeme jako náhradu za běžné betony z portlandského cementu. Vlastnosti jako poróznost a pevnost jsou ovlivněny poměrem pojiva a plniva. Tyto AAM materiály mají hodně kladných vlastností, proto se můžou použít ve stavebnictví, strojírenství, protipožární technice či leteckém průmyslu. [3,17,18]

### 1.5 Příklady aplikací AAM ve stavebnictví

První použití alkalicky aktivovaných materiálů ve stavebnictví je známo z 60. let 20. století. Podle profesora Gluchovského byla postavena stavba z granulossilikátových bloků na Ukrajině v 60. letech. [2]



**Obrázek 3** - Stavba z granulossilikátových bloků [2]

Největší rozvoj staveb z AAM byl v 60 letech, kde byly stavěny kanalizační systémy, komunikace a vlnolamy ze struskoalkalických betonů a to hlavně v Rusku, Finsku, USA, Polsku, Kanadě a také u nás, ve Španělsku, Německu a dalších státech. [2]



**Obrázek 4** - Vodovodní systém [19]

Dalším významným rokem byl rok 1983, kdy byl v USA vyvinut vysokopevnostní geopolymerní cement Pyrament. Byl vyroben z portlandského cementu, mleté strusky, uhličitanu draselného, popílku a metakaolínu. Tento cement se využíval na opravy letištních ploch, včetně letištní plochy v Los Angeles. Ze struskoalkalického betonu bez

použití portlandského cementu byl v ruském městě Lipeck postaven 20 poschodový dům. Stavba proběhla v letech 1987 – 1989. [2]



**Obrázek 5** - Poschodový dům ve městě Lipeck [2]

Alkalicky aktivované materiály byly použity jako vyrovnávací vrstva silnic. V roce 2005 ve městě Mariuplo na Ukrajině. [2]



**Obrázek 6** - AAM jako vyrovnávací vrstva silnic [2]

### **1.5.1 Současné uplatnění AAM v ČR**

Na území České republiky jsou vyráběny AAM i suroviny pro jejich výrobu. Příkladem je geopolymerní pojivo Baucis produkované Českými lupkovými závody a. s. Tato surovina je na bázi kaolinitu. Vyrábí se tepelným zpracováním kaolínů a lupků. Po smíchání pojiva, vody a alkalicky rozpustného křemičitanu vznikne materiál, který je velmi podobný přírodní hornině. Materiál vyniká velmi rychlým tvrdnutím a vysokými konečnými pevnostmi. Je vhodný do žáruvzdorných výrobků, kde může být vystaven teplotám až 1200°C. Dalším příkladem využití AAM v praxi je pojivo GEOPOL. Tato technologie je

určena pro výrobu forem určených pro odlévání železných i neželezných kovů. Výhodou této technologie je minimální mechanický otěr a dobrá zpracovatelnost. [2]



**Obrázek 7** - Forma pro výrobu bronzových odlitků [2]

## **1.6 Trvanlivost alkalicky aktivovaných materiálů**

Trvanlivostí se rozumí schopnost betonu odolávat korozivním procesům a zachovávat si svoje vlastnosti. Abychom mohli alkalicky aktivované materiály používat, musejí vykazovat ve stejných agresivních podmínkách podobnou odolnost jako betony na bázi portlandského cementu. Pokud by byla krátká trvanlivost těchto materiálů, byly by ekonomicky nevýhodné. Tyto materiály mají vysokou pevnost, odolnost proti ohni, kyselinám a bakteriím a proto je možné je využít v agresivních prostředích.

### **1.6.1 Síranová odolnost**

Obecně rozlišujeme dva druhy síranové koroze a to vnitřní a vnější. Vnitřní, ve které hraje roli vysoký obsah síranů v pojivu a vnější, která probíhá při kontaktu betonu s mořskou, podzemní či odpadní vodou obsahující vyšší množství rozpuštěných síranů. Vnitřní síranové korozi je běžně zabráněno vhodnou volbou surovin jako je například kamenivo s nízkým obsahem síranů, a proto je důležitější síranová koroze vnější. [5]

Pokud vystavíme beton na bázi portlandského cementu síranům, dochází k reakci s produkty obsahující vápník (C-S-H gely a portlandit), které způsobují tvorbu sádrovce a sekundárního etringitu. Tyto produkty způsobují objemovou expanzi betonu a má to za

následek vznik trhlin a oprýskání a také způsobují to, že pevnost materiálů nejdříve roste a potom začne klesat. [20]

U alkalicky aktivovaných materiálů, které jsou na bázi struska- popílek bylo dospěno k závěru, že síran sodný nezpůsobuje žádnou degradaci pojiv. Pokud bychom měli alkalicky aktivované materiály na bázi struska - popílek, tak síran hořečnatý působí agresivněji na materiály a dochází zde k dekalifikaci hydratačními produkty za vzniku sádrovce, který následně zhoršuje pevnost. [20]

Největší roli hraje při síranové korozi přítomný kation. Bylo zjištěno, že koroze betonů s různými sírany a pojivy narůstala podle daného kationtu dle následující řady:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ . Ve všech případech daného kationtu měli alkalicky aktivované materiály lepší odolnost než materiál na bázi portlandského cementu. [21]

### **1.6.2 Chloridová odolnost**

Chloridy jsou obsaženy v dešťových i ve splaškových vodách. Chloridy v dešťových vodách jsou proměnlivé, protože jsou obsaženy zejména v posypových solích, které se používají k zajištění sjízdnosti veřejných komunikací v zimním období. Chloridy jsou spojeny spíše spojeny s korozi ocelové výztuže v betonu. V betonových výrobcích, které jsou nevyztužené, není chlorid sodný považován za agresivní látku, která by způsobovala poškození výrobků. [22]

Chloridy procházející dovnitř struktury cementového kamene jsou nebezpečné pro výztuž betonu, která následně podléhá korozi. Korodující výztuž působí na okolní beton, protože rez, který vzniká na povrchu, zvyšuje až 6 krát svůj objem a to má za následek jeho porušení. [23]

Chloridy nezpůsobují žádnou destrukci struktury betonů a to jak na bázi portlandského cementu tak i u alkalicky aktivovaných materiálů. [10]

### **1.6.3 Odolnost vůči kyselinám**

Nejčastěji přichází beton do kontaktu s kyselinami v odpadním potrubí, kde vzniká kyselina sírová vznikající oxidací  $\text{H}_2\text{S}$ .

Při korozi kyselinou sírovou vznikají na povrchu betonu korózní produkty zahrnující zejména sádrovec, který je v odpadním potrubí průběžně odnášen proudem pryč. V laboratorních podmínkách pokrývá povrch vzorku a zpomaluje další korozi, proto se z tohoto důvodu v experimentech kyselina sírová nahrazuje kyselinou chlorovodíkovou nebo kyselinou octovou. [5]

Pokud na vápenaté složky betonu působí kyselina octová, vzniká octan vápenatý, který je velice rozpustný. Rozpouštějí se vrstvy betonu a vzniká koroze. Proto jsou vhodnější betony s nižším množstvím volného vápna, protože mají vyšší účinnost v kyselém prostředí. Čím méně je vápenatých složek obsaženo, tím hustší gel vzniká, který následně tvoří ochranou vrstvu. Proto mají alkalicky aktivované materiály vysokou chemickou odolnost, protože neobsahují takové množství vápenatých složek jako běžné betony z portlandského cementu. [24]

Na základě experimentů bylo zjištěno, že betony z portlandského cementu mají předpokládanou životnost pouze 50 let, protože po 80 cyklech vložených do kyseliny sírové ztratil 25 % hmotnosti. Zatímco alkalicky aktivovaný materiál vydržel 1400 cyklů při stejném úbytku hmotnosti, což znamená předpokládanou životnost 900 let. Tato ztráta hmotností také závisí na druhu použité kyseliny. [24]

#### **1.6.4 Mrazuvzdornost**

Při rozmrazování a zmrazování betonů může docházet k degradaci materiálu. Pokud je beton nasycen vodou v pórech, objem vznikajícího ledu přesáhne objem pórů a způsobí v materiálu tahové napětí. Nejdůležitější roli při odolávání mrazu je porozita materiálu. Nejvíce nebezpečné jsou kapilární póry s průměrem menším než 0,1  $\mu\text{m}$ . Pokud snížíme obsah kapilárních pórů, zvýšíme mrazuvzdornost betonu. [5]

Při mrazu v pórech vzniká led, který zvětšuje objem oproti vodě o 9% a to má za následek praskání betonu. Díky kapilárnímu efektu voda v kapilárách zamrzá při nižší teplotě, než je voda. Tato nižší teplota zamrznutí vody v pórech u alkalicky aktivovaných materiálů je dána menší velikostí pórů než je u portlandského cementu. Zamrznutí vody v kapilárních pórech u alkalicky aktivovaných materiálů je závislé na aktivátoru, který byl použit. Udává se, že pokud se použije aktivátor uhličitan draselný, tak bod zmrznutí směsi je  $-36^{\circ}\text{C}$ , zatímco při použití uhličitanu sodného je bod zmrznutí  $-2,1^{\circ}\text{C}$ . [19]

Rozdíl struktury u alkalicky aktivovaných materiálů a portlandských cementů je v pórech struktury. Bylo také zjištěno, že alkalicky aktivované materiály jsou odolnější oproti portlandským cementovým betonům, pokud jsou neprovdušněné. [19]

Při výzkumu bylo zjištěno, že alkalicky aktivované materiály na bázi strusky i na bázi popílku vykazovali lepší mrazuvzdornost než beton na bázi portlandského cementu. Dále je zjištěno, že pokud se struska aktivuje vodním sklem, bude vykazovat lepší mrazuvzdornost, než při aktivaci hydroxidem sodným. [5]

### 1.6.5 Porozita

Póry v cementovém kameni mnohdy vypovídají o vlastnostech látky. Většinou nám dávají informace o deformacích, napětí a o technologických důsledcích pórovité látky (pevnost, mrazuvzdornost, smrštění...). Tvar póru je závislý na průchodu kapaliny prostředím. Póry můžeme rozdělit na otevřené průchodné – odpovídající nasákavosti při 20 °C, otevřené neprůchodné – při vyplnění kapalinou vyžadují tlak kapaliny a uzavřené-nezaplavitelné kapalinou. [25]

Póry podle velikosti rozlišujeme na:

- Makropóry- větší než 50  $\mu\text{m}$
- Mezopóry – 50-2  $\mu\text{m}$
- Mikropóry – menší než 2  $\mu\text{m}$

Dále póry rozdělujeme podle vzniku: [26]

- Kapilární – mezi částicemi hydraulických surovin o velikosti 0,1-10  $\mu\text{m}$
- Hydratační – vznikají při hydrataci betonu o velikosti 8-20  $\mu\text{m}$
- Gelové – vyskytují se ve vnitř pevných hydrátů o velikosti 1-10  $\mu\text{m}$
- Provdzdušňovací- pro zlepšení mrazuvzdornosti o velikosti 50-300  $\mu\text{m}$
- Technologické- při špatném zhutňování

Při porovnání portlandského cementového betonu s alkalicky aktivovanými materiály na bázi strusek a popílků bylo zjištěno, že u alkalicky aktivovaných materiálů je menší podíl pórů. Dále se zjistilo, že kapilární póry v alkalicky aktivovaných materiálech nejsou, spíše obsahují jemné póry, zatímco v portlandském cementovém betonu jsou. Zjistilo se, že alkalicky aktivované materiály tvrdnou v celém svém objemu. Portlandské cementové betony tvrdnou od povrchu materiálu dovnitř. [25]

Pro měření porozity se používá rtuťová pozimetrie. Touto metodou se měří makropóry, mikropóry měřit nejdou. Je to metoda destruktivní a po měření zůstává v pórech malé množství rtuti. Metoda je založena na zvyšování tlaku nesmáčivé kapaliny a postupném zaplňování pórů od největších po nejmenší. [25]

### 1.6.6 Odolnost vůči karbonataci

Oxid uhličitý způsobuje nevratné změny v betonu na bázi portlandského cementu, což vede ke snížení mechanických vlastností a následně vzniká karbonatace. [5]Karbonatace je přirozený proces, který způsobuje poměrně velké škody. Vlivem karbonatace výztuž přestává být chráněna a začíná korodovat. Jelikož při působení koroze ocel nabývá 2,5 násobku objemu, dochází tím k působení velkého tlaku na okolní beton a tím mohou vznikat praskliny, nebo se může beton odlupovat. Při působení tohoto procesu beton ztrácí pevnost a rozpadá se. [27]

V bezporuchovém stavu má beton  $\text{pH} = 12,5$  a výztuž v něm je uložena krytím betonu v zásaditém prostředí a tím je výztuž chráněna proti působení vnějších vlivů a následné korozi. Pokud je beton příliš pórovitý, tak má tendenci vzdušnou vlhkost, která je v okolním prostředí absorbovat do své vnitřní struktury. S vlhkostí, která vniká do struktury, proniká také  $\text{CO}_2$  a způsobují karbonataci. [27]

Vznik karbonatace je chemickou reakcí kdy vzniká uhličitán vápenatý. Aby vznikl, musí být v betonu obsažena voda, oxid uhličitý a vápník. Uhlík se do struktury dostává z okolního prostředí, vápník je v betonu obsažen a voda je v pórech. Nejdříve dojde k reakci uhlíku s vodou. Vzniká kyselina uhličitá, která reaguje s vápníkem a vznikne hydroxid vápenatý. Potom se z CSH uvolní oxid vápenatý, který má za následek karbonataci. Změní se  $\text{pH}$  betonu z  $\text{pH} = 12,5$  na  $\text{pH} = 9$  a to zasáhne pasivní vrstvu na výztuži a to vede k procesu koroze. [8]

Výzkumy se doposud věnovali karbonataci alkalicky aktivovaných materiálů. Zjistilo se, že alkalicky aktivovaná struska vykazovala vyšší hodnotu karbonatace, než materiály na bázi portlandského cementu. Důsledkem byla rozdílná mikrostruktura. Dále byly zkoumány alkalické aktivované materiály na bázi popílku. Popílek byl použit jako mikroplnivo. Zjistilo se, že tyto alkalicky aktivované materiály vykazovali vyšší odolnost proti karbonataci než betony na bázi portlandského cementu. [8]

Byly provedeny testy betonových konstrukcí na bázi alkalicky aktivovaných materiálů ve stáří 12-40 let. Byly postaveny v Polsku, Rusku a Ukrajině. Vykazovali dobrou odolnost vůči karbonataci, protože hloubka karbonatace byla menší než 0,5 mm za rok. [5]

### 1.6.7 Abraze

Odolnost proti otěru betonu souvisí přímo s jeho pevností. Zvýšení odolnosti proti otěru můžeme zvýšit obsahem cementu, zmenšením obsahu vody, na tvrdosti kameniva které se použije a také na ošetřování betonu při tunutí a tvrdnutí.



Nejdůležitější odolnost proti otěru je při použití betonu na vodní díla. Na této odolnosti bude záviset životnost těchto děl. Největší problém je při použití betonu na mostní pilíře nebo na kanalizace, kde kamínky, písky a v zimním období i led odírají povrch betonu a tím nám zkracují životnost betonu. [8]

Na otěr se dělali zkoušky pro alkalicky aktivované materiály na bázi metakaolínu s roztokem NaOH a i pro betony na bázi portlandské cementu. Zkoušky byly provedeny na brousícím zařízení. Zjištěný obrus byl u alkalicky aktivovaných materiálů menší než u betonů na bázi portlandského cementu. Znamená to, že alkalicky aktivované materiály mají lepší odolnost vůči abrazi než materiály na bázi portlandského cementu. Tato odolnost je také závislá na vhodně zvoleném plnivu. [28]

### **1.6.8 Odolnost proti vysokým teplotám a ohni**

Beton je nehořlavý materiál, který v malé míře odolává vyšším teplotám. V dnešní době se nechají vytvořit betony proti odolnosti vysokým teplotám, které se nazývají žárobetony. Tyto betony by měly vydržet vysokou teplotu až do 1580°C, což většina těchto materiálů nevydrží. Jsou to betony spíše odolné proti vyšším teplotám. Za vyšší teplotu se považuje teplota nad 200°C. [29]

Když beton vystavíme vysokým teplotám tak dochází ke zmenšení jeho pevnosti i výztuže, která je v betonu v místech tahového napětí. Dochází také k fyzikálním i chemickým změnám. Proto musíme volit takové složky které podléhají degradaci betonu co nejméně. Pevnost tohoto materiálu při vyšších teplotách je také závislá na kvalitě použitých materiálů. [29]

U betonů na bázi portlandského cementu je dokázáno, že mají malou teplotní odolnost. Tyto betony se při 300°C začnou rozpadat. Zatímco alkalicky aktivované materiály vykazují odolnost proti vyšším teplotám až do 1000°C. Z toho vyplývá, že alkalicky aktivované materiály jsou odolnější proti vyšším teplotám než betony na bázi portlandského cementu. [29]

Další studie se zabývala alkalicky aktivovanými materiály na bázi metakaolínu. Tyto materiály vykazovaly při zkoušce teploty odolnost až 1000°C, v některých případech až 1200°C. Zde to bylo dáno poměrem složek Si/Al. To znamená, že alkalicky aktivované materiály mají poměrně vysokou odolnost proti vyšším teplotám, a proto jsou vhodné na stavby s vysokým nebezpečím požáru. [29]

## **II. CÍL PRÁCE**

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout složení AAM a ověřit vlastnosti toho material.

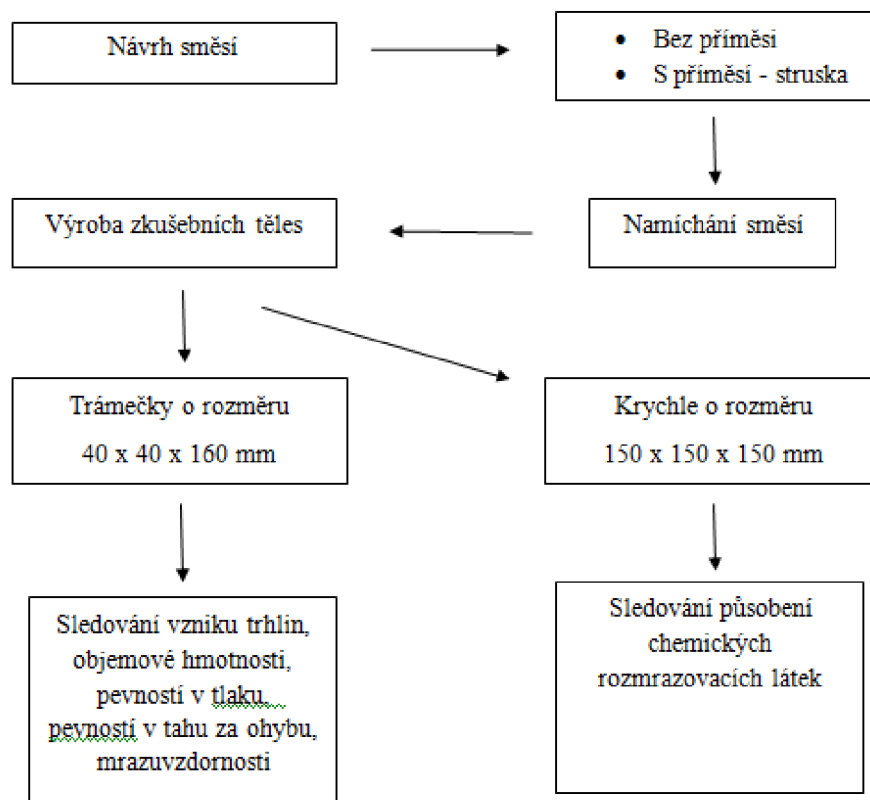
Důležité bylo zaměřit se na sledování mrazuvzdornosti a sledování odolnosti povrchu toho material vůči působení vody a CHRL.

Byla sledována tvorba trhlin, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku a take objemové hmotnosti v čertsvém i ztvrdlém stavu.

### III. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 1. Metodika práce

Celkově byly namíchány čtyři různé směsi AAM, označení BL110F, BL85F, BL110FS a BL85FS. První směs BL110F byla bez příměsí, obsahovala hlavní pojivou složku dvousložkového geopolymerního pojiva na bázi metakaolínu Baucis L 110 a sodný aktivátor Baucis L 110. Druhá směs BL85F byla také bez příměsí, obsahovala hlavní pojivou složku dvousložkového geopolymerního pojiva na bázi metakaolínu Baucis LD 85 a draselný aktivátor Baucis LD 85. Třetí směs BL110FS obsahovala příměs - granulovanou vysokopecní strusku, hlavní pojivou složkou bylo dvousložkové geopolymerní pojivo na bázi metakaolínu Baucis L 110 a sodný aktivátor Baucis L 110. Poslední směs BL85FS také obsahovala příměs – granulovanou vysokopecní strusku, jako hlavní pojivovou složkou bylo dvousložkové geopolymerní pojivo na bázi metakaolínu Baucis LD 85 a draselný aktivátor Baucis LD 85. Každá směs obsahovala polypropylenová vlákna.



Obrázek 7 – Schéma prováděných zkoušek

## 2. Vstupní suroviny

### 2.1 Základní materiál

- Baucis L 110 (složka A) - geopolymerní pojivo na bázi metakaolínu světle šedé barvy, od společnosti České lupkové závody, a.s.

Vlastnosti: počáteční doba tuhnutí (20 °C) cca 110 min

počáteční doba tuhnutí (20 °C) cca 110 min

pevnost v tlaku > 80 MPa za 28 dní

pevnost v ohybu 10-12 MPa za 28 dní

- Baucis LD 85 (složka A) - geopolymerní pojivo na bázi metakaolínu světle šedé barvy, od společnosti České lupkové závody, a.s.

Vlastnosti: počáteční doba tuhnutí (20 °C) cca 85 min

počáteční doba tuhnutí (20 °C) cca 105 min

pevnost v tlaku > 70 MPa za 28 dní, > 80 MPa za 180 dní

pevnost v ohybu > 10 MPa za 28 dní, 12 MPa za 180 dní

### 2.2 Aktivátor

- Baucis L 110 (složka B) – sodný aktivátor od společnosti České lupkové závody, a.s.
- Baucis LD 85 (složka A) - draselný aktivátor od společnosti České lupkové závody, a.s.

### 2.3 Struska

- Granulovaná vysokopecní struska, velmi jemně mletá,, od společnosti Dětmárovice s.r.o

Vlastnosti: nízká měrná hmotnost

nízký bod tavení

nízké povrchové napětí

minimální rozpustnost mezi kovy a struskou [8,30]

### 2.4 Křemičitý písek

- Jemný písek, zrnitost 0 – 4 mm, sypná hmotnost 985 kg.m<sup>-3</sup>, lokalita Žabčice

### 2.5 Vlákna

- Propylenová vlákna Fibrin 615 od společnosti KrampeHarex

Vlákna se používají do betonu, kvůli zamezení trhlin při smršťování. Jejich dávka se pohybuje 0,8 – 1,1 kg/m<sup>3</sup>. Zvyšují adhezi čerstvého betonu, čím zlepšují jeho modul pružnosti. [30]

### 3. Receptury AAM

**Tabulka 2** - Složení receptur AAM na 1 m<sup>3</sup>/ kg :

	BL110F	BL85F	BL110FS	BL85FS
Baucis L 110 (složka A)	700	--	400	--
Baucis L 110 (složka B)	560	--	560	--
Baucis L 85 (složka A)	--	700	--	400
Baucis L 85 (složka B)	--	630	--	630
Křemičitý písek	900	900	900	900
Struska	--	--	300	300
Voda	100	90	100	90
Vlákna	2	2	2	2

## **4. Příprava zkušebních vzorů**

### **4.1 Míchání směsi**

Všechny směsi byly míchány v plastové nádobě pomocí ručního elektrického míchadla. Nejdříve se zamíchalo geopolymerní pojivou Baucis – složka A s příměsí. Následně se přidala voda s aktivátorem Baucis - složka B. Nakonec se přidal křemičitý písek a vlákna. Tato směs byla dále důkladně promíchána několik minut, aby byla vlákna rozprostřena v celé směsi.

### **4.2 Zkušební tělesa**

Byly vyrobeny krychle 150 x 150 x 150 mm a trámečky 40 x 40 x 160 mm. Zkušební tělesa tvrdla při laboratorní teplotě po dobu 24 hodin a následně byla odformována. Zkušební tělesa byla po odformování uložena ve dvou typech uložení – první část těles byla zabalena do průhledné fólie a uložena v laboratoři, druhá část těles byla uložena do vody. Všechna tělesa byla po dobu 28 dní kontrolována na vznik trhlin.

## 5. Popis prováděných zkoušek

### 5.1 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Podstatou této zkoušky je zjistit objemovou hmotnost v čerstvém stavu. Nejprve si stanovíme objem nádoby, kterou budeme pro tuto zkoušku používat. Následně si nádobu zvážíme prázdnou. Nádobu naplníme vytvořenou směsí. Plnou nádobu opět zvážíme. Z těchto naměřených hodnot spočítáme objemovou hmotnost v čerstvém stavu podle vztahu:

$$D_{\check{c}} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

V...objem nádoby [ $\text{m}^3$ ]

$m_1$ ...hmotnost prázdné nádoby [kg]

$m_2$ ...hmotnost plné nádoby [kg]

### 5.2 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu

Podstatou této zkoušky je zjistit objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu. Nejprve si zkušební těleso zvážíme. Následně si zkušební těleso změříme, abychom zjistily jeho objem. Z těchto naměřených hodnot se následně spočítá objemová hmotnost v zatvrdlém stavu podle vztahu:

$$D_z = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

V...objem nádoby [ $\text{m}^3$ ]

m...hmotnost zkušebního tělesa[kg]

### 5.3 Pevnost v tahu za ohybu

Tato pevnost byla stanovena podle normy ČSN EN 196 – 1 – Metody zkoušení cementu Část 1: Stanovení pevnosti. Zkouška probíhá na zkušebních tělesech o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Zkušební těleso se uloží do zkušebního stroje kolmo na směr hutnění na dvě dolní válcové podpory vzdálené od sebe 100 mm. Horní váleček působí uprostřed podpor na zkušební těleso. Zatěžuje se rovnoměrnou rychlostí, až dojde k porušení. Síla při porušení zkušebního tělesa se zaznamená. Následně se vypočte pevnost v tahu za ohybu podle vztahu:

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

$F_f$ ... síla při zlomení tělesa [N]

$l$ ... vzdálenost mezi podporami [mm]

$b$ ... šířka zkušební tělesa [mm]

$h$ ... výška zkušební tělesa [mm]

#### 5.4 Pevnost v tlaku

Tato pevnost byla stanovena podle normy ČSN EN 196 – 1 – Metody zkoušení cementu Část 1: Stanovení pevnosti. Zkouška probíhá na polovičkách zkušebních těles po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Zkušební těleso se dá do zkušební lisu kolmo na směr hutnění. Tlačná plocha je 1600 mm<sup>2</sup>. Zatěžování probíhá plynule a zvyšuje se až do porušení. Síla zatížení při porušení se zaznamená a vypočte se pevnost v tlaku podle vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]}$$

$F_c$ ... síla při porušení [N]

$A$ ... tlačná plocha zkušební zařízení 1600 mm<sup>2</sup>.

#### 5.5 Mrazuvzdornost

Tato zkouška byla stanovena podle normy na beton ČSN 73 1322 – Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Základem zkoušky je střídání zmrazování a rozmrazování vodou na zkušebních tělesech. Zkoušené vzorky byly rozměrů 40 x 40 x 160 mm. Tento rozměr se lišil od normových požadavků. Všechny zkušební tělesa byla zabalena po dobu 28 dní ve fólii a následně 24 hodin ve vodě. Po nasáknutí ve vodě byly tělesa dány do zkušební zařízení pro stanovení mrazuvzdornosti. Jeden cyklus se skládal ze 4 hodin zmrazování při teplotě -20 °C a 2 hodin rozmrazování ve vodní lázni o teplotě 20 °C. Po 100 cyklech mrazuvzdornosti se tělesa vyndala a byla na nich provedena pevnost v tahu za ohybu. Pevnosti byly také stanoveny na zkušebních tělesech referenčních. Z těchto hodnot se stanovil součinitel mrazuvzdornosti. Tento součinitel se vypočítá jako poměr pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaného zkušební tělesa k pevnosti v tahu za ohybu referenčního tělesa.



## 5.6 Stanovení odolnosti povrchu zkušebních vzorků proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Zkouška odolnosti povrchu zkušebních vzorků proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla stanovena automatickým cyklováním zkušebních těles ponořených do misek s roztokem 3 % NaCl v takovém množství, aby těleso bylo ponořeno na výšku (5+1) mm. Ve zkušebním přístroji se vzorky podrobily zmrazování a rozmrazování. Jeden cyklus se skládá z chlazení na teplotu -15 °C a ohřátí na 20 °C. Obě teploty se udržují po dobu 15 minut. Zkoušená tělesa byla o rozměru 150 x 150 x 150 mm a byla opatřena vodonepropustným materiálem, aby se voda a CHRL dostalo pouze na zkoušenou plochu.

Výsledek zkoušky proti působení vody a CHRL je dána hmotnostním odpadem a vypočte se podle vztahu:

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A} \text{ [g/m}^2\text{]}$$

$\rho_a$  ... hmotnostní odpad ze zkoušeného vzorku [g/m<sup>2</sup>]

$\sum m$  ... součet všech hmotnostních odpadů [g]

A ... plocha zkoušeného tělesa [m<sup>2</sup>]

## 5.7 Tvorba trhlin

Zkouška byla prováděna pouze vizuálně na zkušebních tělesech 40 x 40 x 160 mm po dobu zrání 28 dní. Byla udělána fotodokumentace a popis stavu těles.

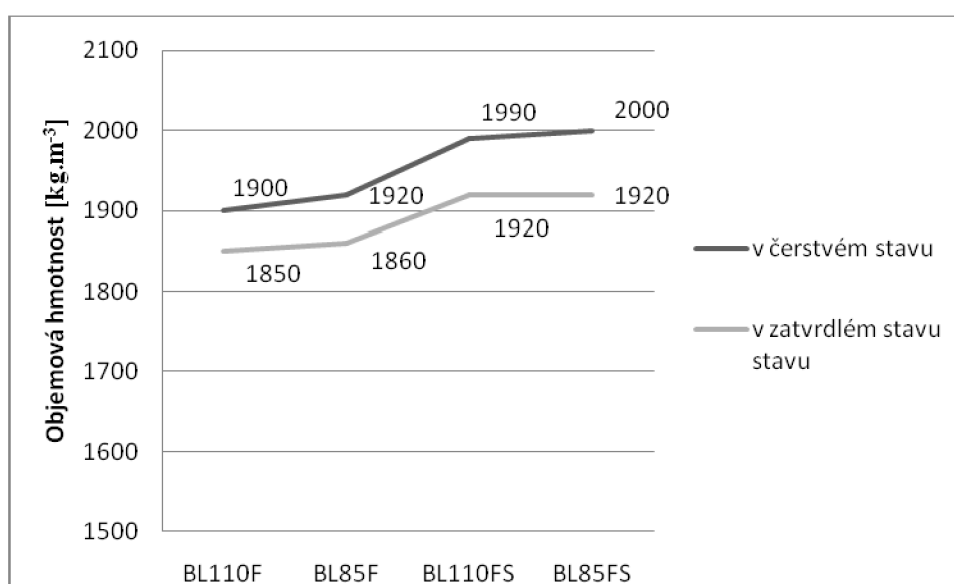
## 6. Výsledky zkoušek

### 6.1 Objemové hmotnosti směsí

**Tabulka 3** - Vypočtené hodnoty objemových hmotností

Druh směsi	Objemová hmotnost v čerstvém stavu $D_c$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu $D_z$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
BL110F	1900	1850
BL85F	1920	1860
BL110FS	1990	1920
BL85FS	2000	1920

**Graf 1** - Objemová hmotnost v čerstvém a zatvrdlém stavu

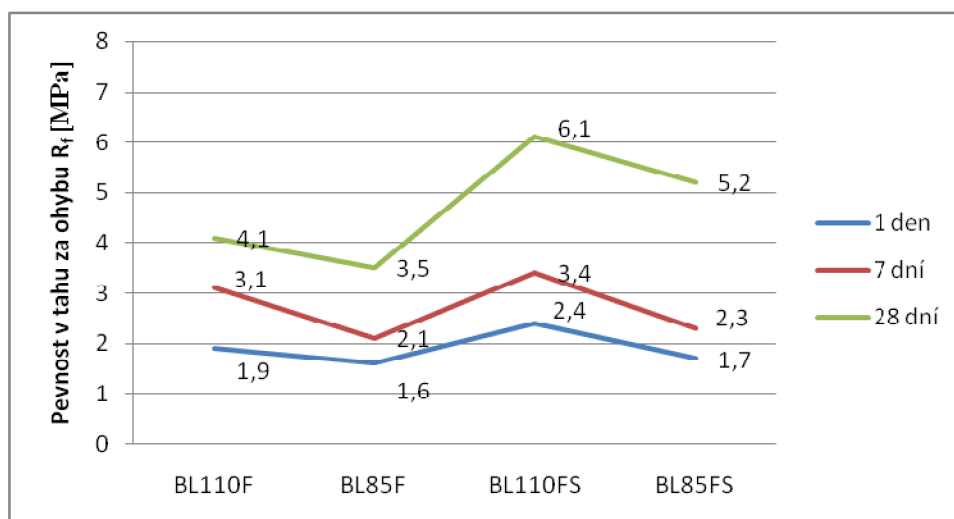


### 6.2 Pevnosti

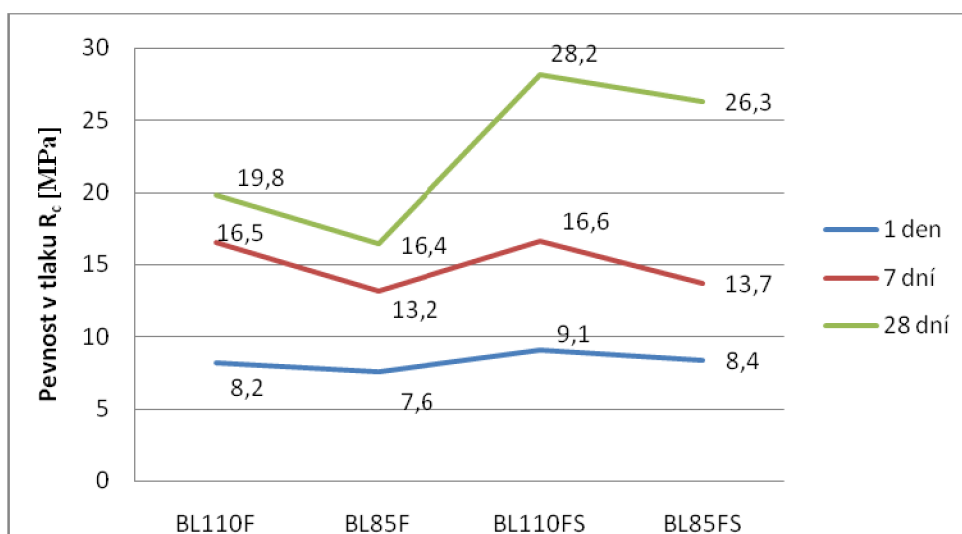
**Tabulka 4** - Vypočtené hodnoty pevností

Druh směsi	Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ [MPa]			Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]		
	1	7	28	1	7	28
Počet dnů	1	7	28	1	7	28
BL110F	1,9	3,1	4,1	8,2	16,5	19,8
BL85F	1,6	2,1	3,5	7,6	13,2	16,4
BL110FS	2,4	3,4	6,1	9,1	16,6	28,2
BL85FS	1,7	2,3	5,2	8,4	13,7	26,3

**Graf 2 - Pevnost v tahu za ohybu**



**Graf 3 - Pevnost v tlaku**

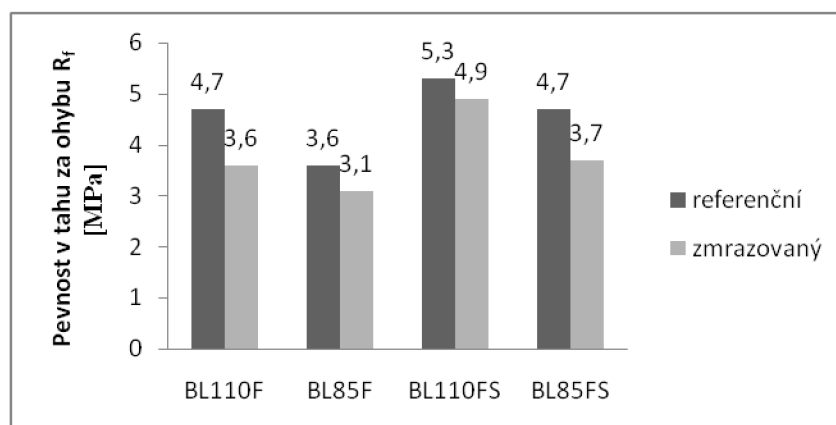


### 6.3 Mrazuvzdornost

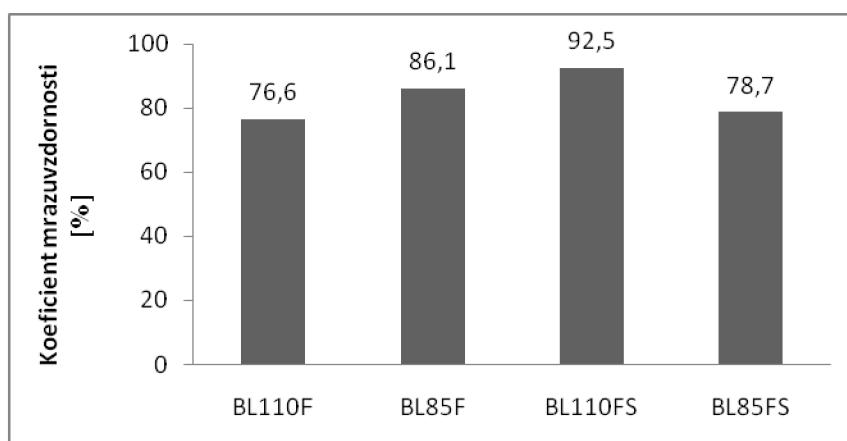
**Tabulka 5** – Vypočítané hodnoty koeficientu mrazuvzdornosti a pevností

Druh směsi	Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ [MPa]	Stav vzorku	Koeficient mrazuvzdornosti [%]
BL110F	3,6	zmrazovaný	76,6
	4,7	referenční	
BL85F	3,1	zmrazovaný	86,1
	3,6	referenční	
BL110FS	4,9	zmrazovaný	92,5
	5,3	referenční	
BL85FS	3,7	zmrazovaný	78,7
	4,7	referenční	

**Graf 4** – Pevnost v tahu referenčních a zmrazovaných zkušebních těles



**Graf 5** – Koeficient mrazuvzdornosti



## 6.4 Stanovení odolnosti povrchu zkušebních těles proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

**Tabulka 6** – Naměřené hodnoty ze zkoušky CHRL na tělesech 150 × 150 x 150 mm

Druh směsi	vzorek	Odpad plochy $\rho_a$ [g/m <sup>2</sup> ]				průměr
		25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	
BL110F	1	15,20	19,51	30,43	41,97	48,14
	2	19,44	29,89	44,42	52,91	
	3	16,28	27,59	41,14	49,54	
BL85F	1	17,09	29,28	40,34	45,36	48,23
	2	17,85	27,21	37,60	45,72	
	3	18,40	31,02	44,81	53,60	
BL110FS	1	134,07	rozpad	-	-	rozpad
	2	125,42	rozpad	-	-	
	3	32,70	74,96	rozpad	-	
BL85FS	1	11,90	19,39	25,77	31,09	25,43
	2	11,96	19,71	24,39	27,67	
	3	7,84	11,46	14,57	17,53	

Směs BL110F, BL85F, BL85FS podle stupně porušení jsou zatříděny jako nenarušený.

Směs BL110 FS nemůžeme zatřídit, protože došlo k rozpadu po 25 cyklech.

Foto vzorků po chrl- po 100 cyklech:



**Obrázek 9** - Směs BL110F, 100 cyklů



**Obrázek 10** - Směs BL85F, 100 cyklů



**Obrázek 11** - Směs BL85FS, 100 cyklů

## 6.5 Vznik trhlin

### 6.5.1 Vznik trhlin u směsi BL110F



**Obrázek 12** – BL110F, ve stáří 1 den ,  
uložení v laboratoři



**Obrázek 13** – BL110F, ve stáří  
uložení ve fólii v laboratoři 28 dní

Po 1 dni od zamíchání, se na zkušebním trámečku u směsi 1 neobjevili žádné trhliny (obrázek 12). Po 28 dnech se u směsi 1 objevili pouze vlasové trhlinky, které nebyly nijak propojeny (obrázek 13).

### 6.5.2 Vznik trhlin u směsi BL110F po mrazuvzdornosti (100 cyklech)



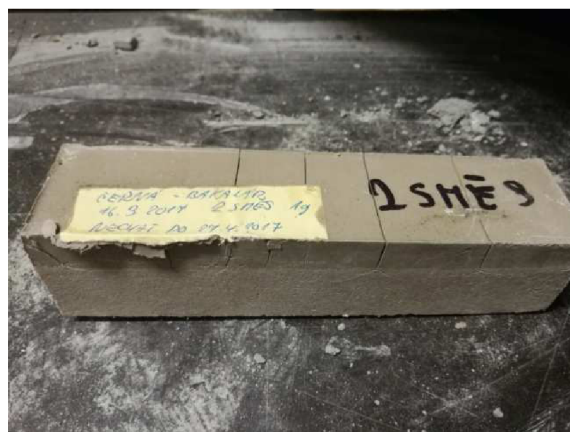
**Obrázek 14** – Směs BL110F, po 100 cyklech mrazuvzdornosti

Na zkušebním trámečku se po 100 cyklech mrazuvzdornosti objevily výrazné trhliny, které byly po celém trámečku. Trhliny byly mezi sebou propojeny a jejich šířka dosahovala až 1,5 mm.

### 6.5.3 Vznik trhlin u směsi BL85F



**Obrázek 15** – BL85F, ve stáří 1 den, uložení v laboratoři



**Obrázek 16** – BL85F, ve stáří 28 dní uložení ve fólii v laboratoři

Po 1 dni od zamíchání se na zkušebním trámečku u směsi 2 objevili viditelné trhlinky, které nebyly nijak propojeny a byly vždy přes celou horní část trámečku. Byly do hloubky maximálně 3 mm (obrázek 15). Po 28 dnech se trhliny nijak výrazně nezvětšily, ani se nijak nepropojily. Změnila se pouze hloubka trhlin, která byla maximálně do 5 mm (obrázek 16).

### 6.5.4 Vznik trhlin u směsi BL85F po mrazuvzdornosti (100 cyklech)



**Obrázek 17** – Směs BL85F, po 100 cyklech mrazuvzdornosti

Na zkušebním trámečku se po 100 cyklech mrazuvzdornosti objevily vlasové trhlinky, které byly na horní ploše trámečku. Trhliny byly mezi sebou propojeny.

### 6.5.5 Vznik trhlin u směsi BL110FS



**Obrázek 18** – BL110FS, ve stáří 1 den, uložení v laboratoři



**Obrázek 19** – BL110FS, ve stáří 28 uložení ve fólii v laboratoři dní

Po 1 dnu od zamíchání se na zkušebním trámečku u směsi 3 neobjevila žádná trhlinka, která by byla viditelná pouhým okem (obrázek 18). Po 28 dnech, nevznikla žádná trhlinka, která by byla viditelná (obrázek 19).

### 6.5.6 Vznik trhlin u směsi BL110FS po mrazuvzdornosti (100 cyklech)



**Obrázek 20** – Směs BL110FS, po 100 cyklech mrazuvzdornosti

Na zkušebním trámečku se po 100 cyklech mrazuvzdornosti objevily výrazné trhlinky, které byly po celém povrchu trámečku. Trhlinky byly mezi sebou propojeny.



### 6.5.7 Vznik trhlin u směsi BL85FS



**Obrázek 21** – BL85FS, ve stáří 1 den, uložení v laboratoři



**Obrázek 22** – BL85FS, ve stáří 28 dní uložení ve fólii v laboratoři

Po 1 dni od zamíchání směsi 4 se na zkušebním trámečku objevili viditelné trhliny, které nebyly nijak propojeny. Trhliny vznikly vždy přes celou horní plochu trámečku a dosahovaly hloubky do 3 mm (obrázek 21). Po 28 dnech se trhliny nezvětšovali, ani se nijak nepropojily, ale jejich hloubka dosahovala až 6 mm (obrázek 22).

### 6.5.8 Vznik trhlin u směsi BL85FS po mrazuvzdornosti (100 cyklech)



**Obrázek 23** – Směs BL85FS, po 100 cyklech mrazuvzdornosti

Na zkušebním trámečku se po 100 cyklech mrazuvzdornosti objevily výrazné trhliny, které byly po celém povrchu trámečku. Trhliny byly mezi sebou propojeny.

## V. VÝSLEDKY A DISKUZE

Byly zkoumány 4 směsi AAM. Základní složkou bylo geopolymerní pojivo na bázi lupku Baucis L110 (složka A) a sodný alkalický aktivátor Baucis L110 (složka B). Další základní složkou bylo geopolymerní pojivo na bázi lupku Baucis L85 (složka A) a draselný alkalický aktivátor Baucis L85 (složka B).

První a druhá směs neobsahovaly žádnou příměs. Druhá a třetí směs obsahovaly jednu aktivní příměs – vysokopecní granulovanou strusku.

Na zkušebních tělesech byly provedeny následující zkoušky a měření: objemová hmotnost v čerstvém stavu, po 1 dni byly provedeny pevnosti tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a vznik trhlin. Po 7 dnech byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Po 28 dnech byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, vznik trhlin a také mrazuvzdornost a odolnost povrchu zkušebních těles proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.

Rozměry zkušebních těles na stanovení pevností, mrazuvzdorností, vzniku trhlin a objemových hmotností byly vyrobeny v trojformě s velikostí trámečku  $40 \times 40 \times 160$  mm a nebyly hutněny. Na zkoušku CHRL byly vyrobeny tělesa o velikosti  $150 \times 150 \times 150$  mm.

Objemové hmotnosti byly u směsi BL110 FS a BL85FS vyšší jak v čerstvém, tak i v ztvrdlém stavu. První pevnosti byly stanoveny po prvním dni. Zkušební tělesa, která obsahovala strusku vykazovala vyšší pevnosti v tahu za ohybu i pevnost v tlaku. Nejnižší hodnota pevnosti v tlaku byla u směsi BL85F – 1,6 MPa a nejvyšší hodnota byla u směsi BL110FS – 2,4 MPa. Hodnoty v tlaku vyšly nejméně u směsi BL85F – 7,6 MPa a nejvyšší u směsi BL110FS – 9,1 MPa. Dále byly pevnosti měřeny po 7 dnech. Hodnoty pevností v tahu za ohybu vycházely nejméně u směsi BL85F – 2,1 MPa. U směsi BL110FS vycházela pevnost nejvyšší – 3,4 MPa. U pevnosti v tlaku po 7 dnech vycházela nejvyšší hodnota pevnosti u směsi BL110FS – 16,6 MPa a nejnižší u směsi BL85F – 13,2 MPa. Po 28 dnech hodnoty pevnosti v tahu za ohybu nejvíce vycházely opět u směsi BL110FS – 6,1 MPa a nejnižší u směsi BL85F – 3,5 MPa. V tlaku byly pevnosti nejvyšší u směsi BL110FS – 28,2 MPa a nejnižší u BL85F – 16,4 MPa. Zkušební tělesa, která obsahovala strusku měla vždy vyšší pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku. Z toho lze uvažovat, že po přidání strusky jsou AAM pevnější.

U zkoušky mrazuvzdornosti po 100 zmrazovacích cyklech pevnosti mírně poklesly. U zkušebních těles bez strusky i u těles, které obsahovaly strusku vyšel koeficient mrazuvzdornosti vždy vyšší než 75 %. To znamená, že všechna tělesa při zkoušce mrazuvzdornosti obstála.

Zkouška odolnosti proti působení vody a CHRL byla důležitým ukazatelem pro stanovení množství odpadu. Kromě směsi BL110FS všechny směsi vydržely 100 předepsaných cyklů. Byla zhotovena fotodokumentace.

Při vzniku trhlin byly vždy posuzovány 2 zkušební tělesa. Jedno těleso po 1 dnu uloženo v laboratoři a 2 těleso uloženo ve fólii 28 dní. U směsi BL110F, BL110FS nevznikly žádné trhliny. U směsi BL85F a BL85FS vznikly viditelné trhliny. Směsi obsahující draselný aktivátor způsobovaly na tělesech výrazné trhliny.

## VI. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala odolností a trvanlivostí AAM. Cílem bylo navrhnout složení několika AAM a ověřit jejich vlastnosti se zaměřením zejména na sledování působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Zkouška CHRL se ukázala jako kritická, protože tělesa vykazovala nejvyšší pevnosti po 28 dnech, ale při zkoušce CHRL došlo k rozpadu po 25 cyklech. Na konečné vlastnosti materiálů má vliv i použitý aktivátor. Přestože u těles se struskou došlo k rozpadu po zkoušce CHRL a působení vody, mají alkalicky aktivované materiály perspektivní vlastnosti, které byly popsány v teoretické části.

Rozšíření AAM je do budoucnosti žádoucí, neboť při jejich výrobě jsou využívány odpadní materiály. Použití alkalicky aktivovaných materiálů bude vhodné i vzhledem k životnímu prostředí, neboť při výrobě AAM vzniká šeskrát méně  $\text{CO}_2$ , než při výrobě cementu a tím by došlo ke snížení produkce skleníkových plynů.

## VII. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOBROVOLNÝ, Petr. *Možnosti redukce emisí CO<sub>2</sub> redukovanych při výrobě portlandských cementů*. Brno, 2013. [cit. 2017-05-23] Bakalářská Práce. Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Karel Dvořák Ph.D
- [2] BOHÁČOVÁ, Jana, Stanislav STANĚK and Martin VAVRO. *MOŽNOSTI APLIKACE ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMŮ VE STAVEBNICTVÍ*. - Technické univerzity Ostrava číslo 2 , 2012, [cit. 2017-04-25] ročník XII, řada stavební. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské.
- [3] SOLÍK, Jaroslav. *STUDIUM MOŽNOSTÍ PŘÍPRAVY SYNTETICKÝCH PÍSKOVců*. BRNO,2010. [cit. 2017-02-15] BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLU. Vedoucí práce Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.
- [4] SADÍLEK, Jakub. 2011. *MODERNÍ ANORGANICKÉ STAVEBNÍ MATERIÁLY BEZ OBSAHU PORTLANDSKÉHO CEMENTU*. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. [cit. 2017-01-12] FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. Vedoucí práce Ing. MARTIN ZMRZLÝ, Ph.D.
- [5] ŠAFÁŘ, Bc.Martin. *TRVANLIVOST ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMŮ*. BRNO 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. Vedoucí práce Ing. LUKÁŠ KALINA, Ph.D.
- [6] WEIGLOVÁ, Bc. Jana. *MOŽNOSTI VYUŽITÍ ENERGOsÁDROVCŮ A DRUHOTNÝCH SUROVIN OBSAHUJÍCÍCH SIŘIČITANY PRO PŘÍPRAVU KOMPOZITŮ* [online]. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. BRNO, 2010, Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D  
Dostupné:[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=25476](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25476)
- [7] BAYER, Petr. 2012. *VLIV POPÍLKU NA VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH MALT*. [cit. 2017-03-25] BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. Vedoucí práce Ing. PAVEL ŠILER, Ph.D.

[8] DROCHYTKA, Rostislav, MATULOVÁ, Pavla, LEHKÉ STAVEBNÍ LÁTKY, BRNO:VUT 2006, STUJNÍ OPORY

[9] ŠRÁMKOVÁ, BcA. Eva. *PŘÍPRAVA HISTORICKÝCH GEOPOLYMERŮ* [online]. BRNO 2008. [cit. 2017-05-16] Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/30295511.pdf>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROMÍR HAVLICA, CSc.

[10] ZOUREK, Milan. *SLEDOVÁNÍ TRVANLIVOS TI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ*. BRNO 2016. [cit. 2017-03-05] BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, FAKULTA STAVEBNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ. Vedoucí práce Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph. D.

[11] ONDRÁČEK, Ing. Michal. *VÝVOJ VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ DEFINOVANÝCH VLASTNOSTÍ S VYUŽITÍM DRUHOTNÝCH SUROVIN*. BRNO 2013. [cit. 2017-04-22] DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE. FAKULTA STAVEBNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ. Vedoucí práce Ing. MICHAL ONDRÁČEK.

[12] PLUSKALOVÁ, Barbora. *UMĚLÝ KÁMEN - METODY PŘÍPRAVY A VLASTNOSTI*. BRNO 2013. [cit. 2017-04-21] BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. FAKULTA STAVEBNÍ, ÚSTAV CHEMIE. Vedoucí práce Doc. RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

[13] *CHEMAGAZÍN: KONTROLA A OCHRANA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ* [online]. Available at: [http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin2010/file/PDF\\_full/CHEMAGAZ%C3%8DN%206-2014.pdf](http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin2010/file/PDF_full/CHEMAGAZ%C3%8DN%206-2014.pdf)

[14] *Geopolymerý: Od pyramid k raketoplánu*

[15] KALINA, Lukáš. *Syntéza aluminátosilikátových systémů na bázi geopolymerů orientovaná na využívání sekundárních surovin* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2011 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/9601>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Centrum materiálového výzkumu. Vedoucí práce Jaromír Havlica.

- [16] BARTOŇOVÁ, Bc. Pavla. *PŘÍPRAVA A VLASTNOSTI RYZÍCH GEOPOLYMERŮ*. BRNO 2009. [cit. 2017-04-03]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA CHEMICKÁ, ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROMÍR HAVLICA, DrSc.
- [17] SRNSKÝ, Bc. Radim. *Alkalická aktivace popílků a strusek za zvýšené teploty*. Olomouc, 2013. [online] Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Petr Sulovský, Ph.D.  
Dostupné z :[http://theses.cz/id/1wwbbj/Srnsk\\_Diplomov\\_prce.pdf](http://theses.cz/id/1wwbbj/Srnsk_Diplomov_prce.pdf)
- [18] SEDLAŘÍK, Bc. Pavel. *Fyzikálně -chemické vlastnosti geopolymérů*. Zlín, 2006. Diplomová práce 2006. Univerzita Tomáše Baťi, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Vratislav Bednařík, Ph.D.  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1371/sedla%C5%99%C3%ADk\\_2006\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1371/sedla%C5%99%C3%ADk_2006_dp.pdf?sequence=1)
- [19] KRIVENKO, Pavel V. *STATUS AND PROSPECTS OF RESEARCH AND APPLICATION OF ALKALI-ACTIVATED MATERIALS*. Kiev, 2010.
- [20] ISMAIL, Idawati, Susan A. BERNAL, John L. PROVIS, Rachel SAN NICOLAS, Sinin HAMDAN a Jannie S.J. VAN DEVENTER. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*[online]. 2014, vol. 45, s. 125-135 [cit. 2017-04-22].  
DOI:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006.  
Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513001340>
- [21] SHI, C., P. V. KRIVENKO a D. ROY. *Alkali-activated cements and concretes* London: Taylor, 2006, ix, 376 s. ISBN 04-157-0004-3
- [22] *VLIV POSYPOVÝCH SOLÍ NA BETONOVÉ VÝROBKY* [online]. 2015. Available at:<https://www.mct.cz/soubor/pusobeni-posypovych-soli-pdf/>
- [23] ŤAŽKÝ, Martin. 2014. *Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílkami*. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vedoucí práce Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

- [24] F. Pacheco-Torgal , Z. Abdollahnejad, A.F. Camões, M. Jamshidi, Y. Ding, Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven isme [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat)
- [25]<https://translate.google.cz/translate?hl=cs&sl=en&u=http://www.ccanz.org.nz/page/abrasion-resistance.aspx&prev=search>
- [26]<https://translate.google.cz/translate?hl=cs&sl=en&u=http://www.nchu.edu.tw/~add/budget/student%2520abroad/inter-meeting-94/T94-4-03.pdf&prev=search>
- [27] HELA „Doc.Ing. Rudolf. Technologie Betonu I. Brno : VUT,2007, Studijní opory
- [28] SHUGANG, Hu and Wang HONGI. 2008. [cit. 2017-03-26] *Cement and Concrete Composites: Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag.*
- [29] ŽÁROBETON (BETON ODOLNÝ VYSOKÉ TEPLITĚ), [online] dostupný z : <https://www.mct.cz/soubor/zarobeton/>
- [30] HELA „Doc.Ing. Rudolf. Technologie Betonu II. Brno : VUT,2007, Studijní opory



## VIII. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Teoretický model aktivované strusky [16]	16
Obrázek 2 – Teoretický modul alkalicky aktivovaného popílku [16]	16
Obrázek 3 – Stavba z gruntosilikátových bloků [2]	18
Obrázek 4 – Vodovodní systém [19]	18
Obrázek 5 – Poschodový dům ve městě Lipeck [2]	19
Obrázek 6 – AAM jako vyrovnávací vrstva silnic[2]	19
Obrázek 7 – Forma pro výrobu bronzových odlitků[2]	20
Obrázek 8 – Schéma prováděných zkoušek	27
Obrázek 9 – Směs BL110F, 100 cyklů	37
Obrázek 10 – Směs BL85F, 100 cyklů	37
Obrázek 11 – Směs BL85FS, 100 cyklů	37
Obrázek 12 – Směs BL110F, ve stáří 1 den	38
Obrázek 13 – Směs BL110F, ve stáří 28 dní	38
Obrázek 14 – Směs BL110F, po 100 cyklech mrazuvzdornosti	38
Obrázek 15 – Směs BL85F, ve stáří 1 den	39
Obrázek 16 – Směs BL85F, ve stáří 28 dní	39
Obrázek 17 – Směs BL85F, po 100 cyklech mrazuvzdornosti	39
Obrázek 18 – Směs BL110F, ve stáří 1 den	40
Obrázek 19 – Směs BL110FS, ve stáří 28 dní	40
Obrázek 20 – Směs BL110FS, po 100 cyklech mrazuvzdornosti	40
Obrázek 21 – Směs BL85FS, ve stáří 1 den	41
Obrázek 22 – Směs BL85FS, ve stáří 28 dní	41
Obrázek 23 – Směs BL85FS, po 100 cyklech mrazuvzdornosti	41

## **IX. SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 – Běžné složení vysokopevnostních strusek [8]	13
Tabulka 2 – Složení receptur AAM na 1 m <sup>3</sup> /kg	29
Tabulka 3 – Vypočtené hodnoty objemových hmotností	34
Tabulka 4 – Vypočtené hodnoty pevnosti	34
Tabulka 5 – Vypočítané hodnoty koeficientu mrazuvzdornosti a pevnosti	36
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty ze zkoušky CHRL na tělesech 150 x 150 x 150 mm	37

## **X. SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1 – Objemová hmotnost v čerstvém a zatvrdlém stavu	34
Graf 2 – Pevnost v tahu za ohybu	35
Graf 3 – Pevnost v tlaku	35
Graf 4 – Pevnost v tahu referenčních a zmrazovaných zkušebních těles	36
Graf 5 – Koeficient mrazuvzdornosti	36

## XI. SEZNAM ZKRATEK

AAM – Alkalicky aktivované materiály

CHRL – Chemické rozmrazovací látky

CO<sub>2</sub> – Oxid uhličitý

Ca(OH)<sub>2</sub> – hydroxid vápenatý

AAS – Alkalická aktivace strusky

(N(K)ASH gel) – Amorfnní matrice alkalického aluminisilikátového gelu

FeSi – Ferosilicium

CaO – Oxid vápenatý

SO<sub>3</sub> – Oxid sírový

SiO – Oxid křemnatý

Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> - Oxid hlinitý

FeO – Oxid železnatý

MnO – Oxid manganatý

MgO – Oxid hořečnatý

F<sub>2</sub> O<sub>5</sub> – Oxid florečný

Si – křemík

Al – hliník

Mn – mangan

S - síra

O – kyslík

H<sub>2</sub>O – voda

SiO<sub>2</sub> – oxid křemičitý

NaOH – hydroxid sodný

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – kyselina sodná

## **XII. SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1- Baucis L1100

Příloha 2- Baucis LD85



ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s.  
271 01 Nové Strašecí, Pecínov č. p. 1171

Telefon: +420 313 572 218  
Telefax: +420 313 572 131  
E-mail: info@cluz.cz

## GEOPOLYMER

# BAUCIS L110

Anorganické, dvousložkové, hlinitokřemičité pojivo na bázi metakaolinu (část A) aktivované alkalickým aktivátorem (část B). Směs společně s vhodně zvoleným plnivem vytváří mikroporézní strukturu.

**Základní surovina:**

**metakaolín**

ČSN 721300: Mefisto L05 (České lupkové závody, a.s.)  
světle šedá barva

**alkalický aktivátor**

**Typické vlastnosti:**

- |                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| • počáteční doba tuhnutí (20°C) | cca 110 min         |
| • konečná doba tuhnutí (20°C)   | cca 160 min         |
| • pevnost v tlaku               | > 80 MPa za 28 dní  |
| • pevnost v ohybu               | 10-12 MPa za 28 dní |

**Geopolymerní cement**

- výborná adheze k původnímu povrchu (beton, kámen, kov)
- s doporučeným ostřivem použití až do 1200 °C
- chemická odolnost k agresivnímu prostředí
- výborné mechanické vlastnosti

**Příprava**

Při přípravě pojivové směsi na bázi anorganického polymeru je obvykle používáno 5 hmotnostních dílů části A; 4 hmotnostní díly části B (aktivátor) a 50% až 200% plniva v závislosti na jeho granulometrii. Typickým ostřivem může být lupek D462 0-0,4 mm (vyráběný Českými lupkovými závody, a.s.), v tomto případě je použito cca 75-125%.

**Balení**

27 kg papírový pytel + kanystr (22 kg)

540 kg v big bagu + IBC kontejner (max. 1,4t aktivátoru)



**ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s.**  
271 01 Nové Strašecí, Pectisov č. p. 1171

Telefon: +420 313 572 210

Telefax: +420 313 572 121

E-mail: info@clz.cz

## GEOPOLYMER

# BAUCIS LD85

Anorganické, dvousložkové, hlinítokřemičité pojivo na bázi metakaolínu (část A) aktivované alkalickým aktivátorem (část B). Směs společně s vhodně zvoleným plnivem vytváří mikroporézní strukturu.

**Základní surovina:** **metakaolín**  
ČSN 721300: Meřisto L03 (České lupkové závody, a.s.)  
světle šedá barva

**alkalický aktivátor**

### Typické vlastnosti:

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| • počáteční doba tuhnutí (20°C) | cca 85 min                              |
| • konečná doba tuhnutí (20°C)   | cca 105 min                             |
| • pevnost v tlaku               | > 70 MPa za 28 dní, > 80 MPa za 180 dní |
| • pevnost v ohybu               | > 10 MPa za 28 dní, > 12 MPa za 180 dní |

### Geopolymerní cement

- výborná adheze k původnímu povrchu (beton, kámen, kov)
- s doporučeným ostřivem použití až do 1200 °C
- chemická odolnost k agresivnímu prostředí
- výborné mechanické vlastnosti
- minimální výskyt výkvětů

### Příprava

Při přípravě pojivové směsi na bázi anorganického polymeru je obvykle používáno 3 hmotnostních dílů části A; 4,5 hmotnostního dílu části B (aktivátor) a 50% až 200% plniva v závislosti na jeho granulometrii. Typickým ostřivem může být lupek D462 0-0,4 mm (vyráběný Českými lupkovými závody, a.s.), v tomto případě je použito cca 75-125%.

### Balení

27 kg papírový pytel + kanystr (25 kg)

340 kg v big bagu + IBC kontejner (max. 1,4t aktivátoru)