



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

## MOŽNOSTI VYUŽITÍ SLÉVÁRENSKÝCH ODPRACHŮ

THE POSSIBILITIES OF USING OF FOUNDRY FILTER ASH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAROSLAV SOLIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta chemická  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	FCH-DIP0685/2011	Akademický rok: 2011/2012
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Bc. Jaroslav Solik	
Studijní program:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (N2820)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808T016)	
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.	
Konzultanti:		

### Název diplomové práce:

Možnosti využití slévarenských odprachů

### Zadání diplomové práce:

Literární rešerše.

Analýza odprašků ze slévárny litiny.

Laboratorní testy využití slévarenských odprašků pro přípravu anorganických kompozitů.

Zpracování a vyhodnocení výsledků.

Sepsání závěrečné práce.

### Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.2012

Diplomová práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

-----  
Bc. Jaroslav Solik  
Student(ka)

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

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 18.1.2012

-----  
prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce studuje možnosti využití slévárenských odprachů pro výrobu anorganických kompozitů, které by mohly být využity především ve stavebním průmyslu.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část, kde se v teoretické části nachází literární rešerše použitých materiálů a v experimentální části jsou shrnuty výsledky laboratorních testů testovaných směsí na bázi portlandského a hlinitanového cementu s různým obsahem slévárenských odprachů. Pro srovnání bylo použito také dalšího slévárenského odpadu - slévárenského písku.

Připravená testovací tělíska o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byla podrobována mechanickým zkouškám pevnosti a byl sledován vliv množství slévárenských odpadů na pevnosti připravených směsí.

Dále se práce zabývá možnostmi alkalické aktivace těchto slévárenských odpadů, kde bylo použito sodné vodní sklo, hydroxid sodný a komerčně dodávaný Baucis 160 L složka B jako alkalický aktivátor. U těchto testovacích směsí byl také pozorován vývoj vlivu množství slévárenských odpadů na mechanické pevnosti.

K analýzám vstupních surovin bylo použito metody RTG fluorescenční spektrometrie, TG – DTA – EGA a RTG práškové difrakce. Veškeré pevnosti byly testovány na testovacím zařízení desttest 3310.

## ABSTRACT

This thesis explores the possibility of using of foundry filter ash for production of inorganic composite materials, that could be used primary in the construction industry.

The thesis is divided into theoretical and experimental section, where theoretical section contain literature review of used materials and the experimental section summarizes the results of laboratory tests performed on tested mixture based on portland and alumina cement with various content of foundry filter ash. For comparison was also used another foundry waste - foundry sand.

Prepared test bodies with dimension of 40 x 40x 160 mm was subjected to mechanical strength tests and the influence of amount of foundry waste on the strenght of the prepared mixtures was monitored.

Next the thesis deals with possibilities of alkaline activation of foundry waste, where sodium water glass, sodium hydroxide and commercially supplied baucis 160 L component B were used as alkaline activator. These test mixtures were also subjected to mechanical strenght tests and the influence of amount of foundry waste on the strenght was observed too.

The analysis of input materials were performed by XRF, TG – DTA – EGA and XRD powder diffraction methods. All strength tests were tested by testing equipment desttest 3310.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Slévárenské formovací směsi, portlandský cement, hlinitanový cement, slévárenské odprachy, slévárenský písek, geopolymery, alkalická aktivace, vodní sklo, hydroxid sodný.

## **KEY WORDS**

Foundry molding sand, portland cement, alumina cement, foundry filter ash, foundry sand, geopolymers, alkaline activation, water glass, sodium hydroxide.

SOLIK, J. *Možnosti využití slévárenských odprachů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

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

.....

podpis studenta

### **Poděkování:**

*Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Opravilovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc při vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval projektu Centra materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně, CZ.1.05/2.1.00/01.0012 za jehož podpory tato diplomová práce vznikla.*

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>9</b>
2.1	OSTŘIVA VE FORMOVACÍCH SMĚSÍCH .....	10
2.1.1	<i>Křemen .....</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Magnezit, Chrommagnezit.....</i>	<i>11</i>
2.1.3	<i>Šamotové ostřivo .....</i>	<i>12</i>
2.1.4	<i>Ostřiva s vysokým obsahem <math>Al_2O_3</math>.....</i>	<i>12</i>
2.2	POJIVA FORMOVACÍCH SMĚSÍ.....	13
2.2.1	<i>Formovací směsi s jílovými pojivy.....</i>	<i>13</i>
2.2.1.1	<i>Kaolinitické jíly.....</i>	<i>14</i>
2.2.1.2	<i>Illitické jíly.....</i>	<i>14</i>
2.2.1.3	<i>Montmorillonitické jíly .....</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Formovací směsi s vodním sklem .....</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Sádrové formovací směsi.....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Formovací směsi s pryskyřičnými pojivy.....</i>	<i>16</i>
2.2.4.1	<i>Formovací směsi s fenolformaldehydovými pryskyřicemi.....</i>	<i>16</i>
2.2.4.2	<i>Formovací směsi s močovino-formaldehydovými pryskyřicemi.....</i>	<i>17</i>
2.2.4.3	<i>Formovací směsi s furanovými pryskyřicemi.....</i>	<i>18</i>
2.3	CEMENT .....	19
2.3.1	<i>Portlandský cement .....</i>	<i>20</i>
2.3.1.1	<i>Typy portlandského cementu .....</i>	<i>20</i>
2.3.1.2	<i>Suroviny k výrobě slínku .....</i>	<i>22</i>
2.3.1.3	<i>Složení surovinové směsi .....</i>	<i>22</i>
2.3.1.4	<i>Výroba slínku.....</i>	<i>23</i>
2.3.1.5	<i>Výroba a vlastnosti portlandského cementu .....</i>	<i>24</i>
2.3.1.6	<i>Tuhnutí a tvrdnutí portlandského cementu.....</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Hlinitanový cement.....</i>	<i>26</i>
2.4	GEOPOLYMERY .....	26
2.4.1	<i>Struktura geopolymery .....</i>	<i>27</i>
2.4.2	<i>Příprava geopolymery.....</i>	<i>28</i>
2.5	ALKALICKÉ AKTIVÁTORY .....	28
2.5.1	<i>Hydroxidy.....</i>	<i>28</i>
2.5.1.1	<i>Hydroxid sodný.....</i>	<i>28</i>
2.5.1.2	<i>Hydroxid draselný.....</i>	<i>29</i>
2.5.2	<i>Vodní sklo.....</i>	<i>29</i>
2.6	MATERIÁLY VHODNÉ PRO ALKALICKOU AKTIVACI .....	30
2.6.1	<i>Metakaolin.....</i>	<i>30</i>
2.6.2	<i>Popílky.....</i>	<i>31</i>
2.6.3	<i>Vysokopecní struska .....</i>	<i>31</i>
2.6.4	<i>Slévárenské písky.....</i>	<i>32</i>
2.6.5	<i>Slévárenské odprachy.....</i>	<i>33</i>
2.7	ALKALICKÁ AKTIVACE .....	33
2.8	ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE.....	34

<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>36</b>
3.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	36
3.1.1	<i>Příprava testovacích směsí.....</i>	37
3.2	STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU A V TAHU ZA OHYBU .....	37
3.3	TG – DTA – EGA ANALÝZA.....	38
3.4	RTG PRÁŠKOVÁ DIFRAKCE .....	39
3.5	RTG FLUORESCENČNÍ SPEKTROMETRIE .....	41
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>42</b>
4.1	VYSVĚTLIVKY K TABULKÁM.....	42
4.2	POUŽITÉ SUROVINY .....	42
4.3	CHEMICKÉ ANALÝZY VSTUPNÍCH SUROVIN .....	43
4.3.1	<i>TG – DTA – EGA analýza slévárenských odpadních písků.....</i>	43
4.3.2	<i>TG – DTA – EGA analýza slévárenských odprachů.....</i>	44
4.3.3	<i>RTG prášková difrakce slévárenských odpadních písků .....</i>	46
4.3.4	<i>RTG prášková difrakce slévárenských odprachů .....</i>	47
4.3.5	<i>RTG fluorescenční spektrometrie slévárenských odpadních písků.....</i>	48
4.3.6	<i>RTG fluorescenční spektrometrie slévárenského odprachu .....</i>	49
4.4	Vliv PŘÍDAVKU SLÉVÁRENSKÉHO PÍSKU A SLÉVÁRENSKÝCH ODPRACHŮ NA SMĚSI NA BÁZI PORTLANDSKÉHO CEMENTU .....	49
4.4.1	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku na směsi na bázi portlandského cementu .....</i>	50
4.4.2	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenských odprachů na směsi na bázi portlandského cementu ..</i>	52
4.4.3	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi portlandského cementu .....</i>	55
4.5	Vliv PŘÍDAVKU SLÉVÁRENSKÉHO PÍSKU A SLÉVÁRENSKÝCH ODPRACHŮ NA SMĚSI NA BÁZI HLINITANOVÉHO CEMENTU .....	57
4.5.1	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku na směsi na bázi hlinitanového cementu.....</i>	57
4.5.2	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenských odprachů na směsi na bázi hlinitanového cementu ..</i>	60
4.5.3	<i>Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi hlinitanového cementu .....</i>	62
4.6	MOŽNOSTI ALKALICKÉ AKTIVACE SLÉVÁRENSKÉHO ODPADNÍHO PÍSKU .....	64
4.6.1	<i>Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku sodným vodním sklem .....</i>	64
4.6.2	<i>Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku baucisem L160 složkou B .....</i>	66
4.6.3	<i>Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku hydroxidem sodným .....</i>	68
4.7	MOŽNOSTI ALKALICKÉ AKTIVACE SLÉVÁRENSKÝCH ODPRACHŮ SODNÝM VODNÍM SKLEM .....	70
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>74</b>

# 1 ÚVOD

Díky neustále rostoucí populaci a s tím související zvyšující se průmyslovou výrobou, dochází k velké spotřebě materiálu a nerostných surovin, které ve většině případů nejsou recyklovatelné a zůstávají jako odpady průmyslových výrob. Tento trend je široce rozšířený především u anorganických odvětví, jako jsou metalurgie, energetika apod., kde jsou odpadní materiály produkovány v řádech tisíců tun ročně.

S růstem průmyslové výroby je spojen i růst těžebního průmyslu, kdy se těžařské firmy snaží uspokojit stále se zvyšující poptávku trhu, což je spojeno se stále větší devastací krajiny nárůstem vytěžených prostor a vznikem nových deponií, na kterých se uskládá stále přibývajícím průmyslový odpad, především tuhé zbytky od spalování, ocelářské strusky či slévárenské písky a odprachy.

Ekologickým dopadům dříve prováděných skládek na okolní přírodu a ekosystém se v dnešní době klade velká pozornost. Podmínky pro ukládání odpadů se postupně zpříšňují a proto se takovéto skladování a ukládání odpadů stává finančně velmi náročné. Z tohoto důvodu se firmy produkující velké množství těchto materiálů snaží najít jinou cestu jak se jich zbavit bez zbytečných nákladů. Proto je v posledních letech vynaloženo značného úsilí a financí na možnosti užití těchto odpadních materiálů jako druhotných surovin. Zdá se, že toto úsilí se vyplácí, jelikož k užívání druhotných surovin se přechází stále ve větším měřítku. Za léta výzkumu bylo zjištěno, že druhotné suroviny mohou vykazovat dobré vlastnosti za zlomek ceny původních surovin, což je logicky hybnou silou jejich využívání. Nejbarvitější představy spočívají v tom, že jednou budou veškeré těžené prvotní suroviny nahrazeny druhotnými, což by mohlo být z ekologického a hlavně ekonomického hlediska velice lukrativní a navíc by se zamezilo silné devastaci krajiny těžařským průmyslem a vyčerpávání stále se tenčících zásob nerostného bohatství.

Jako největší odběratel druhotných surovin se nabízí stavební průmysl, kde se tyto materiály využívají už léta od stavby silnic přes přidávání strusky do cementu až po tvorbu alkalicky aktivovaných směsí.

Cílem této práce bylo prostudovat možnosti využití slévárenských odprachů jako druhotné suroviny. Slévárenské odprachy se zachycují v odlučovačích a poté jsou odváženy na skládku. Tato práce studuje jejich užití ve směsích s cementy a v alkalicky aktivovaných směsích. Spolu s odprachy byly studovány i možnosti slévárenského písku, který se používá na výrobu slévárenských formovacích směsí a po jeho několikanásobné recyklaci se užívá už jen jako posypový materiál, nebo minerální přísada do asfaltových směsí. Při smíchání slévárenského písku s cementem se nabízí jeho využití jako stavebního materiálu pro stavbu obvodových zdí, protizvukových bariér u silnic a dálnic apod.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se zabývá literární rešerší nejčastěji používaných surovin ve slévárenském průmyslu počínaje a materiály pro alkalickou aktivaci, recyklovanými materiály a běžnými materiály pro užití ve stavebním průmyslu konče.

Definice ideální formovací směsi zní: “ Ideální formovací směs je levná, dostatečně tekutá nebo plynná látka, která po styku s modelovým zařízením okamžitě ztuhne za normální teploty a vytvoří hladké stěny tenké formy o vysoké pevnosti. Je nesmáčivá a chemicky netečná vůči litému kovu. Má dostatečnou prodyšnost pro unikání plynů a vzduchu z formy při lití. Je pevná a rozměrově neměnná, až do ztuhnutí dostatečně tlusté kůry odlitku, pak se rozpadá nebo vypařuje na výchozí stav a je schopna opětovného použití bez nutnosti regenerace.”. Příprava a užití takovéto směsi je v dnešní době samozřejmě nad naše možnosti, avšak existuje řada jiných směsí, které se v některých směrech kladeným požadavkům na ideální směs přibližují.

V podstatě se dá říci, že formovací směs je polydisperzní třífázová soustava. Vlastnosti této soustavy závisí na vlastnostech a vzájemném působení všech tří fází- tuhé, kapalné a plynné. Částice tvořící tuhou fázi, nazývanou ostřívo, určují a tvoří kostru celé soustavy. V mezerách mezi těmito částicemi se vyskytuje fáze kapalná (voda, pojiva, atd.) a plynná (vzduch). [1]

Požadavky na vlastnosti formovacích směsí jsou určovány technologií výroby formy a odlitků. Průběh pochodů, kterými musí formovací a jádrová směs během technologického procesu projít, se dá znázornit následovně:

Příprava formovací směsi => doprava a skladování => výroba formy;

Příprava jádrové směsi => doprava a skladování => výroba jader => zakládání jader a složení formy => odlévání formy => ochlazení formy => oddělení směsi od ztuhlého odlitku => regenerace směsi.

Formovací směs prochází výrobním procesem ve složitém cyklu, který se dá rozdělit do dvou základních fází:

- Zhotovení formy a jader včetně různých stádií přepracování směsi.
- Vzájemné působení formovací směsi na roztavený kov a tuhnoucí odlitek.

V první fázi formovací směs vystupuje jako materiál, pomocí něhož se vytváří forma. V tomto případě je po směsi vyžadována homogenní příprava, malá osýchavost a drobivost, dokonalá formovatelnost ( plasticita, tekutost, atd.), mechanická pevnost ve spěchovaném stavu, přesnost udržení tvaru po vytažení modelu, dlouhá životnost apod. Ve druhé fázi formovací směs vystupuje jako nástroj, pomocí něhož se roztavený kov přeměňuje na odlitek. V tomto případě se po směsi vyžaduje dostatečná prodyšnost, tepelná a mechanická stálost, malá plynovost, mechanická pevnost v zahřátém stavu, poddajnost při tuhnutí odlitku apod.

Během slévárenského procesu dochází k cirkulaci formovací směsi. Při této cirkulaci lze pracovat se třemi pískovými systémy:

- Modelová směs se připravuje z nového ostřiva a přísad, výplňová směs je tvořena regenerovanou vratnou směsí.
- Modelová směs se připravuje z regenerované vratné směsi, což znamená, že ostřivo se dostává do pískového systému zčásti nebo úplně z vytlučené jádrové směsi a modelová směs se připravuje z vratné směsi přidáním pojiva a přísad. Pro výplňovou směs slouží vratná směs, jejíž vlastnosti byly upraveny pouze zavlhčením a rozmísením.
- Jednotná směs, jejíž vlastnosti jsou upravovány dokonalou regenerací a přípravou z vratné směsi. Tyto směsi se užívají pro sériovou výrobu strojních odlitků ze šedé litiny a oceli při lití za syrova. [2]

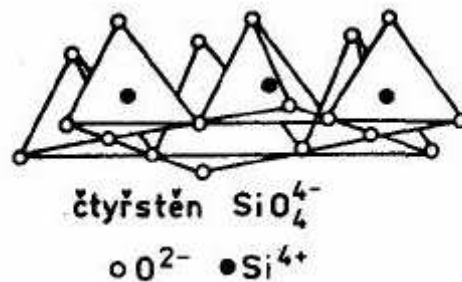
## 2.1 Ostřiva ve formovacích směsích

Ostřivo je zrnitý, žáruvzdorný materiál s velikostí částic nad 0,02 mm a tvoří až 98 % hmotnosti formovací směsi. Ostřivo určuje mnohé vlastnosti směsi, které jsou dány chemickým a mineralogickým složením ostřiva a jemnostním rozdělením jeho částic různé velikosti a tvaru. Z granulometrického hlediska jsou známy dvě soustavy ostřiv:

- Monodisperzní – obsahuje částice stejné velikosti (tříděné písky).
- Polydisperzní – obsahuje částice různých velikostí (přírodní neupravené písky). [3]

### 2.1.1 Křemen

Oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$  je nejrozšířenějším minerálem v přírodě a pro jeho vhodnou zrnitost je také základní surovinou formovacích hmot. Díky jeho teplotě tání 1700 °C je vhodný pro výrobu forem k odlévání většiny slévárenských slitin.

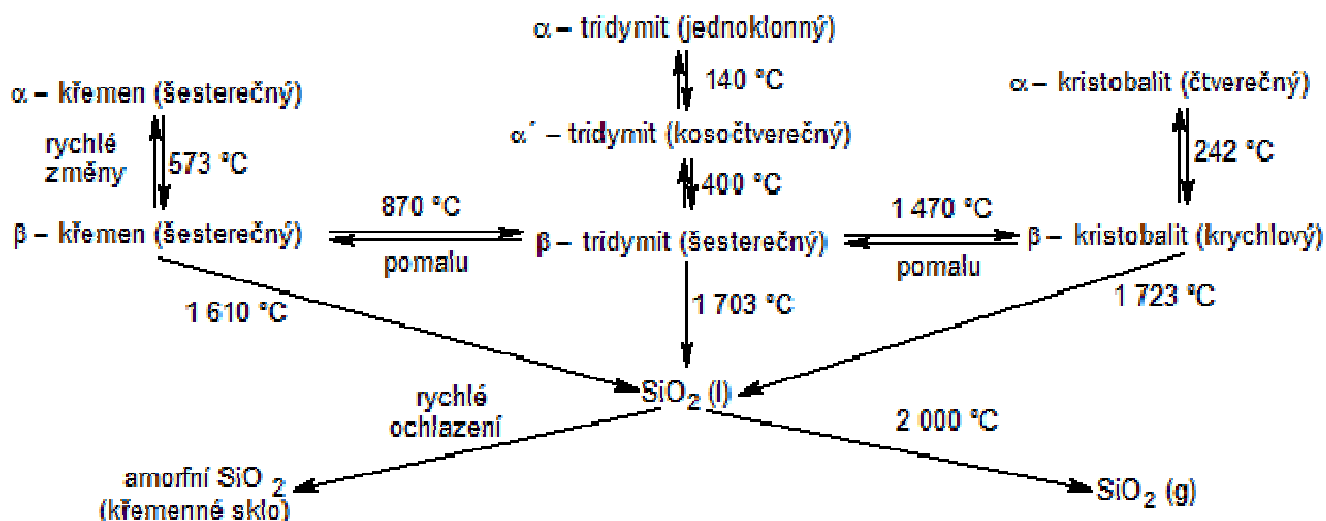


**Obrázek č.1:** Prostorová stavba křemene [4]

Kromě jeho dobrých vlastností má  $\text{SiO}_2$  i vlastnosti méně vhodné a to takové, že při ohřevu prodělává polymorfni změny, které se projevují objemovými změnami a poruchami celistvosti formy a dále křemenný prach vyvolává velmi vážné onemocnění - silikózu. Vzhledem k tomu, že křemen je kyselá sloučenina, reaguje velmi snadno se zásaditými látkami za vzniku nízkotavitelných sloučenin jako  $2 \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $2 \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$  apod. Oxid křemičitý se vyskytuje v několika krystalických a jedné amorfni modifikaci. Bezvodý  $\text{SiO}_2$  v modifikaci:

- křemen  $\alpha$  a  $\beta$ ,
- tridymit  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ ,

- cristobalit  $\alpha$  a  $\beta$ ,
- křemenné sklo.



**Obrázek č.2:** Fázový diagram soustavy  $\text{SiO}_2$  [2]

Polymorfni přeměny mezi jednotlivými formami křemene, tridymitu a cristobalitu probíhají rychle na rozdíl od přeměn mezi  $\alpha$ ,  $\beta$  formami, které jsou nevratné a probíhají pomalu jen při zvláštních podmínkách. Mezi nejzávažnější důsledky těchto polymorfni přeměn, ovlivňujících vlastnosti formovací směsi, patří změna hustoty a objemu jednotlivých modifikací, což se může projevit roztažností křemenných zrn při ohřevu povrchových vrstev formy a jejich odlupováním nebo praskáním.

Nejčastějším a nejrozšířenějším typem křemene v přírodě je  $\beta$ -křemen, který má podobu křemenných písků, křemenců, různých druhů křišťálu, dále je součástí vyvřelých hornin, pískovců, příměsí v jílech a kaolínech. Krystalizuje v soustavě trigonálně trapezodrické, měrná hmotnost se pohybuje v mezích 2620 – 2660  $\text{kg/m}^3$  a tvrdost má 7. [2]

### 2.1.2 Magnezit, Chrommagnezit

Magnezit je zásadité ostřivo, které se vyrábí z horniny zvané magnezit, která obsahuje vedle čistého minerálu ještě vápenaté, křemičité a železité sloučeniny. Čistý magnezit je uhličitan hořečnatý  $\text{MgCO}_3$  hnědé až bělošedé barvy. Krystalizuje v trigonální soustavě a izomorfne se mísí s  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{FeCO}_3$ .

Zrnitý magnezit pro formovací účely lze získat drcením odpadních cihel a tvarovek. Takto získaný magnezit je poté určen hlavně pro těžké odlitky z manganových ocelí, které obsahují vysoký podíl  $\text{MgO}$ , který by za určitých podmínek mohl chemicky reagovat s ostřivem kyselého charakteru. [2]



**Obrázek č.3:** Žárovzdorné nekřemenné ostřívo chromit

### 2.1.3 Šamotové ostřívo

Šamot je vypálený žárovzdorný jíel, který obsahuje nejméně 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Další složka šamotové hmoty je  $\text{SiO}_2$ . Všechny ostatní oxidy jsou znečišťujícími příměsemi, jejichž množství a složení závisí na čistotě výchozí suroviny. Při změně poměru  $\text{SiO}_2$  k  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dochází ke změnám fázového složení, které v konečném důsledku předurčují žárovzdorné vlastnosti této hmoty.

Výhoda šamotového ostřiva spočívá v tom, že neprodělává při ohřevu roztaveným kovem polymorfni přeměny, a proto se toto ostřívo v kombinaci se žárovzdorným jílem jako pojivem používá pro výrobu forem těžkých ocelových odlitků nebo těžkých odlitků ze šedé litiny. [5]



**Obrázek č.4:** Šamotové ostřívo

### 2.1.4 Ostřiva s vysokým obsahem $\text{Al}_2\text{O}_3$

Se stoupajícím obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v podvojně soustavě  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  roste také teplota tání směsi. Při obsahu 62,9 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vzniká silimanit, což je bezvodý křemičitan hlinitý, který přechází v mullit. Takovéto silimanitové a mullitové ostřívo se vyznačuje vysokou žárovzdorností, výbornou odolností proti náhlým změnám teploty a velkou chemickou stálostí. Jejich nejčastější využití je ve formovacích směsích pro metody přesného lití.

Průmyslově se vyrábí uměle tavením bauxitu nebo čistých jíelů bohatých na technický oxid hlinitý - korund. Korund se však příliš nevyužívá ve slévárenských směsích kvůli jeho vysoké ceně, avšak využívá se jako plnivo do barviva pro těžké ocelové odlitky a namáhaná jádra. [2]

## 2.2 Pojiva formovacích směsí

Pojiva jsou látky nebo směsi látek, jež mají schopnost samovolného zpevňování, čímž spojují zrnité systémy v pevný kompaktní celek. Předpokladem správné funkce jsou tyto vlastnosti pojiv:

- Na počátku působení mají být tekutá, aby se mohla rozmístit na površích a v pórech zrnitého systému.
- Musí smáčet povrch pojeného materiálu a vytvářet tak adhezní spoje.
- Po vhodné době se musí pojivo samovolně zpevnit (vysušením gelu, vypařením rozpouštědla, chemickou reakcí atd.).
- Adhezní spoje mají zůstat pevné i po ztuhnutí pojiva. [7]

Tedy aby zrnité suroviny získaly potřebnou vaznost a bylo z nich možno přechovat formy žádané pevnosti, musí se k nim přimíchat různá pojiva. Pojiva ve formovacích směsích vytvářejí vazbu mezi jednotlivými zrny pískového systému, kde takováto vazba může působit již v syrovém stavu po rozmíchání pojiva s ostřivem, nebo teprve po chemickém případně fyzikálním zásahu vnějšího prostředí.

Slévárenská pojiva jsou nejčastěji rozdělována podle jejich původu na:

- Anorganická
- Organická

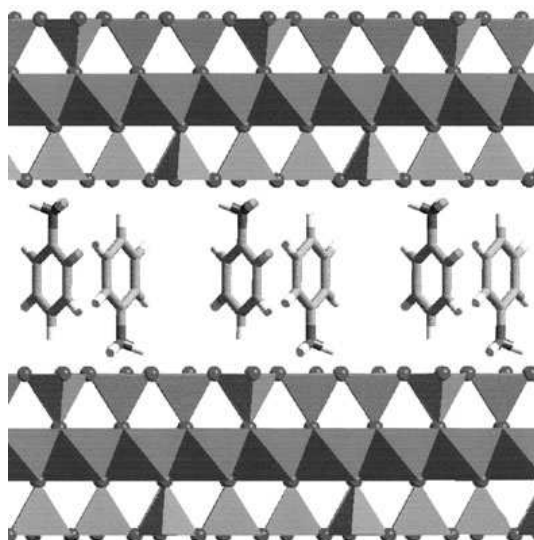
*Anorganická pojiva* jsou minerálního původu a udělují vaznost formovací směsi už v syrovém stavu nebo vytvrzují po chemickém a fyzikálním zpevnění. Směsi s těmito pojivy jsou vhodné pro lití za syrova, vyvíjejí málo plynů, ale mají zhoršenou rozpadavost a teplem kapalného kovu nevyhořívají. Mezi tato pojiva se řadí jíly, cement, sádra, vodní sklo, organické estery kyseliny křemičité apod.

Mezi *organická pojiva* se řadí umělé pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny a jiné odpadní organické produkty. Vlastnosti, kterými jsou směsi s těmito pojivy charakterizovány, jsou vysoká tekutost za syrova, možnost řízeného tepelného nebo chemického ztužení, tepelná destrukce a vyhořívání při lití, značný vývin plynů při lití, dobrá rozpadavost po odlití a s tím související snadné čištění odlitků. Velkou nevýhodou těchto pojiv je zdravotní závadnost, a proto je při práci s těmito pojivy nutné dodržování bezpečnostních předpisů. [1],[2]

### 2.2.1 Formovací směsi s jílovými pojivy

Mezi nejvýznamnější pojiva ve formovacích směsích se řadí právě jílová pojiva, která se používají při formování za syrova a jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení směsí syntetických i přirozených. Podle struktury jílové materiály patří mezi vrstevnaté silikáty, které jsou složeny z vrstviček čtyřstěnu  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  a osmistěnu  $\text{Al}(\text{OH})_6^{4-}$  nebo  $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$ . Tyto vrstevnaté silikáty se dále dělí na několik skupin minerálů podle stupně substitucí křemíku hliníkem a podle druhu vázaných kationů. Silikátové vrstvy jsou tvořeny sítí kyslíkových oktaedrů a tetraedrů. Obě sítě částečně sdílejí kyslíkové atomy. Ve středech

oktaedru jsou kationy kovů podle druhů silikátu (Al, Mg, atd.) ve středech tetraedrů je křemík viz obrázek č. 5.



**Obrázek č.5:** *Struktura vrstevnatých silikátů*

#### **2.2.1.1 Kaolinitické jíly**

Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) je hlavní součástí horniny kaolínu a žárovzdorných jílů. Plavením surového kaolínu se získává plavený kaolin, ve kterém je obsaženo až 90 % kaolinitu a 10 % příměsí jako je křemen, živec, slída apod. Kvůli rozplavování formy v důsledku vysoké teploty spékání je surový kaolín nevhodný pro formovací materiály, proto se používá žárovzdorný směsný jíl s označením Tumerit K.



**Obrázek č.6:** *Kaolinit krystalizující v trojklonné soustavě*

#### **2.2.1.2 Illitické jíly**

Jde o slídové jíly, které jsou obsaženy ve většině přirozených formovacích písků. Nejdůležitější z illitických jílů je glaukonit, který je tvořen drobnými krystalky zelené barvy. Po rozetření je velmi plastický a formovací směsi s ním dosahují vysokých vazností. [5]

### 2.2.1.3 Montmorillonitické jíly

Montmorillonit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) je hlavní minerál horniny bentonitu. Bentonit je vulkanického původu a vyskytuje se v sopečných oblastech. Proces bentonizace probíhal v zásaditém prostředí na rozdíl od kaolínu, kde jeho metamorfóza předpokládá kyselé prostředí. Bentonit se vyskytuje v různých barvách ( žlutý, šedý, červený atd.) a je na omak mastný. Díky dobré plastičnosti, adsorpční schopnosti, tixotropních vlastností a vysoké vaznosti se bentonitové jíly hojně využívají ve slévárenství, jelikož umožňují snížit jejich obsah ve formovacích směsích až trojnásobně oproti jílům jiných druhů. [6]

### 2.2.2 Formovací směsi s vodním sklem

Podle způsobu tuhnutí vodního skla ve formovacích směsích se směsi dělí na:

- Směsi s vodním sklem vytvrzované pomocí oxidu uhličitého.
- Směsi bez ovládaného ztužování, samotvrdnoucí.

Do první skupiny patří směs vytvrzována zavedením plynného  $\text{CO}_2$  do směsi křemenného písku a vodního skla. Tato směs obsahuje nejčastěji čistý křemenný písek se 4 % vodního skla.

Druhá skupina zahrnuje směsi tuhnoucí fyzikální dehydratací a směsi tuhnoucí vzájemným působením vodního skla a kyselého katalyzátoru. [1]

### 2.2.3 Sádrové formovací směsi

Sádra vzniká částečnou nebo úplnou dehydratací sádrovce  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Dehydratace sádrovce probíhá obvykle ve dvou stupních, v první fázi vzniká hemihydrát  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , který je hlavní složkou rychle tuhnoucí sádry. Ve druhém stupni vzniká bezvodý  $\text{CaSO}_4$ , ten je hlavní složkou pomalu tuhnoucí sádry a anhydritového pojiva.



Sádra se používá jako slévárenské hydraulické pojivo v pískových směsích pro odlitky z neželezných kovů, pro výrobu modelů a modelových desek. [1]

## 2.2.4 Formovací směsi s pryskyřičnými pojivy

V dnešní době, kdy existuje velký počet umělých pryskyřic průmyslově vyráběných s vhodnými vlastnostmi slévárenských pojiv, se nepoužívají přirozené pryskyřice, jelikož je to velice nevhodné. Jako slévárenská pojiva jsou nevhodnější pryskyřice vyráběné polykondenzací, a to hlavně pryskyřice:

- Fenolformaldehydové
- Močovino-formaldehydové
- Furanové
- Kombinované

Při vytvrzování slévárenských syntetických pryskyřic dochází k polykondenzaci. Při polykondenzaci vznikají makromolekuly postupně jako meziprodukty. Během reakce neustále vzrůstá molekulová hmotnost jednotlivých makromolekul na úkor molekul malých.

Jednotlivé pryskyřice tvrditelné teplem nebo tuhnoucí účinkem katalyzátoru za studena mají různou viskozitu, která ovlivňuje vaznost směsi za syrova. Viskozita směsí klesá v řadě fenolformaldehydové, močovino-formaldehydové a furanové.

Nevýhoda těchto formovacích směsí je, že pojiva na bázi umělých pryskyřic mají toxické účinky na lidský organismus, což je způsobeno vývinem volného fenolu, formaldehydu nebo furanu během přípravy a vytvrzování směsi. Z tohoto důvodu musí být při práci s těmito látkami dodržována přípustná koncentrace škodlivin v ovzduší a pracoviště musí být dobře větráno. [2]

### 2.2.4.1 Formovací směsi s fenolformaldehydovými pryskyřicemi

Fenolové pryskyřice jsou výsledkem komplikovaných reakcí mezi fenolem a aldehydy, většinou formaldehydem, na vyšší molekulární produkty. Při kondenzaci fenolu a formaldehydu je fenol trojfunkční a formaldehyd dvojfunkční, čím mohou vznikat trojrozměrné zesíťované struktury. Když se funkčnost fenolu sníží substitucí, získáme lineární struktury.

Při přeměně fenolu a formaldehydu na fenolové pryskyřice se vyskytují 3 stadia:

- Hydroxymetylace fenolu.
- Kondenzace hydroxymetylfenolů a vícesložkových sloučenin.
- Zesíťování.

Polykondenzáty z fenolů a aldehydů, obzvláště z fenolů a formaldehydu, vznikají tak, že molekuly vodíků fenolů reagují s formaldehydem na fenolové hydroxylové skupiny a přitom se trojrozměrně zesíťují. [8]

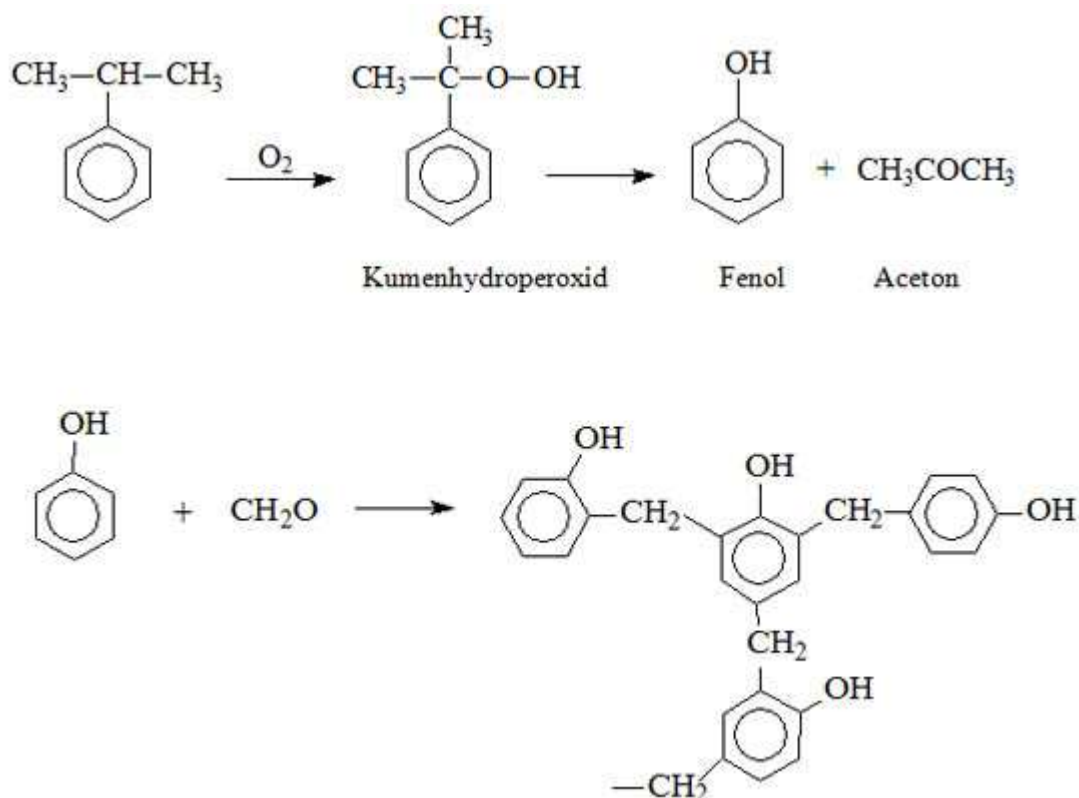
Fenolformaldehydové pryskyřice můžeme dle výroby a použití rozdělit na:

- Fenolformaldehydové nebo kresolformaldehydové vodní roztoky
- Práškové fenolformaldehydové tmely (novolaky)



Základní pryskyřice se často modifikuje polyamidy, stabilizátory, sacharidy a prostředky proti osychání. Tekutá fenolická pojiva se vytvrzují při teplotách 190 až 200 °C nebo použitím silných katalyzátorů kyselé povahy za studena.

Práškové fenolické tmely se uplatňují při výrobě skořepinových forem a jader. Směsi pro skořepinové formování se vyrábějí obalovým způsobem. Tato metoda je založena v obalení zrněk písku pryskyřicí buď ve formě roztoku v ethanolu nebo tekutou pryskyřicí a dále v odpaření použitého rozpouštědla a separaci jednotlivých zrněk směsi. Na závěr se směs vytvrzuje teplem od vyhřáté modelové desky nebo jaderníku. [2]



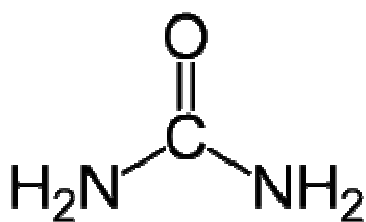
**Obrázek č.7:** Výroba fenol-formaldehydové pryskyřice

#### 2.2.4.2 Formovací směsi s močovino-formaldehydovými pryskyřicemi

Močovino-formaldehydové pryskyřice jsou tvrditelné látky, vznikající zahříváním močoviny s formaldehydem tzv. kondenzací.

Formaldehyd neboli methanal  $CH_2O$  je bezbarvý, štiplavě páchnoucí plyn, který se vyrábí dehydrogenací či oxidací methanolu.

Močovina neboli diamid kyseliny uhličitě  $CO(NH_2)_2$  je biologicky a technologicky velice významná sloučenina. Vyrábí se zahříváním oxidu uhličitého a amoniaku pod tlakem. Je to bezbarvá krystalická sloučenina dobře rozpustná ve vodě s mírně zásaditými vlastnostmi.[8]



**Obrázek č.8:** Močovina

Z technických aminopryskyřic se ve slévárenství používají především močovino-formaldehydové pryskyřice tzv. termoreaktivní karbamidové.

Takovéto pryskyřice se nejčastěji vyskytují ve formě vodního roztoku případně se zahušťují nebo suší pro větší stabilitu. Karbamidové pryskyřice se pro zlepšení nebo modifikaci jejich specifických vlastností (plasticita, stabilita, vodovzdornost atd.) modifikují různými látkami. Tato modifikace probíhá buď při výrobě pryskyřic, nebo během přípravy slévárenské jádrové směsi.

Pro konverzi pojiva se používá zvýšené teploty (150 až 170 °C) nebo katalyzátoru. Vzhledem k tomu, že vytvrzování pouze teplem je zdlouhavé, urychluje se užitím latentních katalyzátorů kyselé povahy ( kyselina boritá). [1]

#### **2.2.4.3 Formovací směsi s furanovými pryskyřicemi**

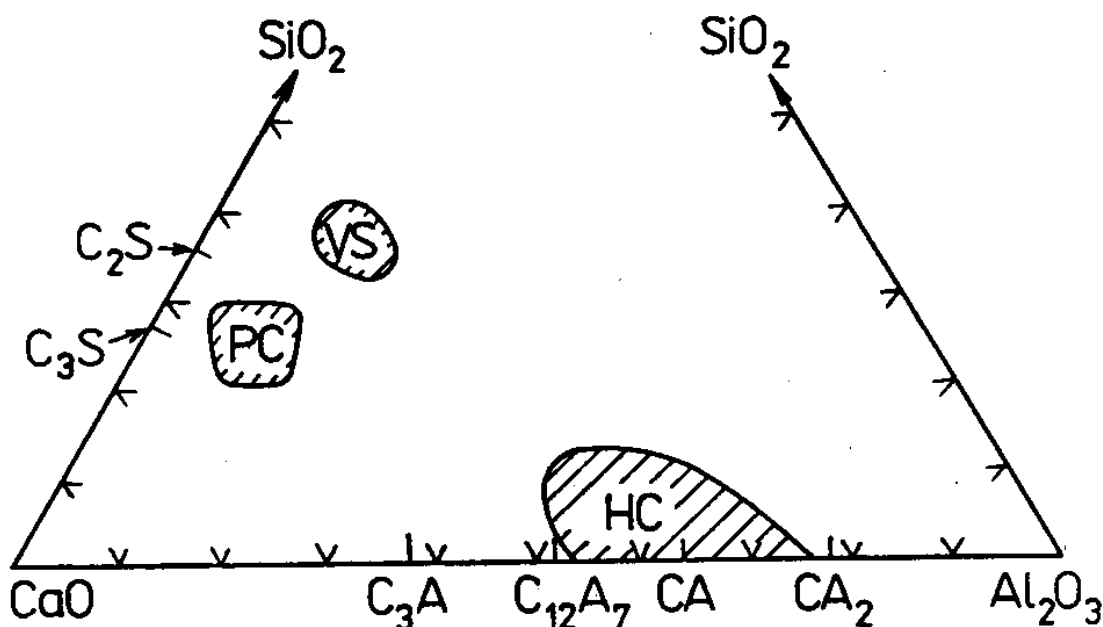
Furanové pryskyřice jsou kondenzáty z furfurylalkoholu a formaldehydu. Furan je kapalina o bodu varu 31 °C, která vzniká dekarboxylací 2-furankarboxylové kyseliny. Furanová pryskyřice slouží jako směsné pojivo především pro výrobu jader a rychle tuhoucích forem za studena. Takto zhotovená jádra mají poté tmavou, hnědou až zelenou barvu. Vytvrzování směsi trvá několik minut, z tohoto důvodu se směsi s furanovými pojivy připravují v kontinuálních šnekových mísičích, zajišťujících nepřetržitou výrobu směsi tak, aby nezuhla ve stroji. Jako vytvrzující přísady se užívají prostředky na bázi kyseliny sírové nebo aromatických sulfonyl kyselin ve spojení s močovinou. Teplota vytvrzování je 170 - 210°C. [5]

## 2.3 Cement

Nejrozšířenějším a nejvíce používaným pojivem je cement. Cement je polydisperzní práškové pojivo s hydraulickými vlastnostmi, jehož účinnými složkami jsou sloučeniny CaO a SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, případně jiné sloučeniny podobného typu. Dle chemického hlediska můžeme cementy rozdělit do tří základních skupin:

- Křemičitanové cementy, kde nejdůležitějším zástupcem je portlandský cement.
- Hlinitanové cementy s převahou hlinitanů vápenatých.
- Jiné cementy – železitanový, chromitanový a další.

Cementy prvních dvou skupin lze složením zařadit do soustavy CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s malým množstvím dalších složek. Vzhledem k tomu, že obsah Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> často bývá poměrně nízký, můžeme oblasti složení cementů zobrazit přibližně v tříložkovém systému CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> viz obrázek č. 9. [7]



*Obrázek č.9: Oblasti složení portlandského cementu (PC), bazické vysokopecní strusky (VS) a hlinitanového cementu (HC)*

Cementy se řadí k pojivům, tedy k látkám, které mají schopnost za určitých podmínek přecházet ze stavu plastického ve hmoty pevné a tvrdé při současném spojování částic cizích hmot. Hlavní výhodou cementových pojivových směsí je jejich schopnost tuhnout ve volné atmosféře bez komplikovaného umělého sušení. [4]

Podle evropské normy musí cement při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu malt a betonů zachovávajících si po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost a po předepsané době musí mít požadovanou pevnost. Hydraulické tvrdnutí probíhá hlavně v důsledku hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. [9]

### 2.3.1 Portlandský cement

Název portlandský cement pochází od anglického města Portlandu, v jehož okolí se těžil kámen, připomínající svým vzhledem výrobky z cementu. Portlandský cement byl poprvé vyroben ve Velké Británii na počátku 19. století. Patent na tento cement získal Brit Joseph Aspdin v roce 1824. Je to nejznámější druh cementu na výrobu betonu a malty.

Obsahuje jemně rozemletý křemičitanový slínek a přísady – sádrovec. Dále může obsahovat pucolánové látky, jako granulovanou vysokopecní strusku, popílek, vápencovou moučku nebo lávu. Po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne, a poté tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po ztvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost jak na vzduchu tak i ve vodě. [10]

Portlandský cement je základní složkou všech moderních hydraulických pojiv, na která se vztahuje evropská norma EN ČSN 197-1. Dvě hlavní složky, ze kterých se portlandský cement skládá, jsou portlandský slínek a síran vápenatý. Slínek vzniká pálením směsi přírodních nebo průmyslových surovin (vápenec, jíl, pyritové výpražky, atd.) a následně se mele v kulovém mlýně. Pomletý slínek však reaguje tak rychle s vodou, že nemůže být v praxi sám o sobě používán, protože by nebylo možné beton zpracovat. Tuhnutí je proto potřeba regulovat, z toho důvodu se ke slínku přimísí vhodné množství (3,5–4 % SO<sub>3</sub> podle pevnostní třídy) síranu vápenatého ve formě sádrovců nebo anhydritu. [9]

Vlastnosti portlandského cementu lze, díky způsobu výroby a složení, měnit ve velmi širokých mezích, čehož se využívá k získání osifikovaných cementů, jejichž vlastnosti se dají přesně upravit v závislosti na aplikacích.

#### 2.3.1.1 Typy portlandského cementu

Portlandský cement je tvořen portlandským slínkem a sádrovcem. Přimícháváním dalších příměsí v určitém množství ke slínku je možné získat další typy cementů, které jsou poté dle evropské normy EN 197-1 kvalifikovány do pěti tříd. Jako příměsí mohou být užity příměsí minerální podstaty zahrnující přírodní vulkanické pucolány, umělé pucolány, popílky, křemičité úlety, granulovanou vysokopecní strusku, vápenec apod. Zvolením různých typů příměsí lze ovlivňovat chemické vlastnosti cementu, ale také ekonomické i ekologické aspekty jeho výroby a účely jeho použití. V tabulce č. 1 jsou zobrazeny parametry jednotlivých druhů portlandského cementu podle EN 197 – 1. [9]

**Tabulka č.1:** Parametry jednotlivých druhů portlandského cementu podle EN 197 – 1

Parametry jednotlivých druhů portlandského cementu podle EN 197 – 1																			
druh cementu	název cementu	označení cementu	pevnostní třídy	sůlník K (%)	složka cementu		doplňující složky (%)												
					%	druh													
I	Portlandský cement	I	42,5; 52,5 42,5 R; 52,5 R	95 - 100	-	-	0 - 5												
II	Portlandský struskový cement	II/A-S II/B-S	32,5; 32,5 R	80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35	vysokopecní struska (S)	0 - 5 0 - 5												
	Portlandský cement s křemičitým úletem	II/A-D	42,5	90 - 94	6 - 10	křemičitý úlet (D)	0 - 5												
	Portlandský pucolánový cement	II/A-P II/B-P II/A-Q II/B-Q	32,5	80 - 94 65 - 79 80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35 6 - 20 21 - 35	pucolán přírodní (P)  pucolán průmyslový (Q)	0 - 5 0 - 5 0 - 5 0 - 5												
							Portlandský popílkový cement	II/A-V II/B-V II/A-W II/B-W	32,5; 42,5	80 - 94 65 - 79 80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35 6 - 20 21 - 35	popílek křemičitý (V)  popílek vápenatý (W)	0 - 5 0 - 5 0 - 5 0 - 5						
													Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	II/A-T II/B-T	42,5	80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35	kalcinovaná břidlice (T)	0 - 5 0 - 5
																			Portlandský cement s vápencem
	Portlandský směsný cement	II/A-M II/B-M	32,5	80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35	směs předcházejících složek (M)													
	III	Vysokopecní cement	III/A III/B III/C	32,5	35 - 64 20 - 34 5 - 19	35 - 65 66 - 80 81 - 95	vysokopecní struska (S)	0 - 5 0 - 5 0 - 5											
	IV	Pucolánový cement	IV/A IV/B	32,5	65 - 89 45 - 64	11 - 35 36 - 55	pucolán (P, Q), křemičitý úlet (D), křemičitý popílek (V)	0 - 5 0 - 5											
	V	Směsný cement	V/A V/B	22,5	40 - 64 20 - 39	18 - 30 18 - 30 30 - 50 30 - 50	vysokopecní struska (S)  pucolán (P, Q) Si popílek (V)	0 - 5 0 - 5											

### 2.3.1.2 Suroviny k výrobě slínku

Mezi základní suroviny se řadí vápenec a hlíny nebo jíly, nejčastěji kaolinitické, díky kterým se do směsi dostává  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Slínek nemá obsahovat více než 6 hmot %  $\text{MgO}$ , jelikož tato složka je příčinou rozpínání cementu po ztuhnutí, a tím snížení pevnosti. Další nežádoucí látky jsou  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{ZnO}$  aj., při větším množství i alkalické kovy a sírany.

Od základních surovin se požaduje, aby se daly dobře mlít, protože surovinová směs musí být jemná. Jemnost mletí by měla být taková, aby více než 80 % částic mělo velikost pod 90  $\mu\text{m}$ . [7]

### 2.3.1.3 Složení surovinové směsi

Technologie výroby cementu vychází z požadavku vytvořit slínek, jehož mikrostruktura je tvořena novými sloučeninami (fázemi) požadovaného složení. Primární význam má především příprava surovinové směsi vhodného chemického složení tzn. zejména poměr základních složek  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s odpovídajícími moduly. Dále vlastnosti produktu závisejí také na způsobu tepelného zpracování a úpravě slínku mletím. Mezi významné charakteristiky surovinové směsi se řadí:

- Hydraulický modul  $M_H = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$ , jehož hodnota se pohybuje mezi 1,7 až 2,4.
- Silikátový modul  $M_S = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$ , jehož hodnota leží mezi 1,7 až 2,7. Čím vyšší je tato hodnota, tím vyšší je nutná teplota výpalu.
- Hlinitanový modul  $M_s = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ , který většinou kolísá v rozmezí 1,5 až 2,5.

Cílem při sestavování surovinové směsi je aby všechny  $\text{CaO}$  zreagoval při tepelném zpracování na sloučeniny schopné hydraulického tuhnutí. Takovýchto sloučenin je pouze omezený počet a proto celý proces výroby směsi je veden tak, aby vznikaly žádané sloučeniny, které jsou uvedeny v tabulce č.2. [7]

**Tabulka č.2:** Hlavní minerály portlandského slínku [9]

Název	Vzorec	Zkrácený vzorec	Obsah složky (hm%)
Trikalcium silikát (alit)	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	44-77 %
$\lambda$ -dikalciumsilikát (belit)	$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	9-33 %
Tetrakalciumferoaluminát (celit)	$4 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	4-10 %
Trikalcium aluminát (amorfní fáze)	$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	6-13 %

### 2.3.1.4 Výroba slínku

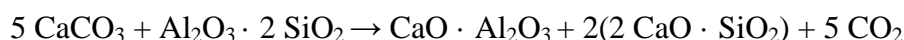
Výrobu portlandského cementu lze v podstatě rozdělit do tří základních kroků, kde prvním krokem je příprava surovinové směsi (drcení, mletí a mísení surovin), druhým je teplené zpracování surovin na slínek (obvykle v rotační peci) a třetím je závěrečné mletí slínku s příměsmi a dalšími doplňujícími složkami na cement. [9]

Příprava surovinové moučky v sobě zahrnuje několik různých operací, mezi které patří těžba surovin, jejich úpravy, homogenizace, analýza, dávkování a mletí. Surovinami pro přípravu surovinové moučky a následně slínku jsou především horniny a průmyslové odpady o různém chemickém a mineralogickém složení, což znamená, že jsou různě vydatnými zdroji základních oxidů. Základními oxidy pro výrobu slínku a jejich zdroji jsou:

- CaO – zdrojem jsou především vápence, které mohou obsahovat jako nečistoty i další oxidy, zejména SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a některé stopové prvky.
- SiO<sub>2</sub> – zdrojem jsou břidlice, hlíny, jíly a křemičité horniny
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – zdrojem jsou především jíly, slíny a bauxit
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – zdrojem jsou železné rudy a průmyslové odpady s obsahem železité složky

Po pomletí a zhomogenizování surovinové směsi v bubnovém mlýnu s ocelovými mlecími tělesy následuje další krok, kterým je výpal slínku. Výpal slínku se provádí v cementářských pecích, nejčastěji rotačních kvůli jejich vysokému výkonu, kvalitnímu výpalu slínku a také z důvodu použitelnosti pro mokrý i suchý způsob výroby cementu. Tyto pece mají několik teplotních pásem, kterými surovinová moučka a později slínek prochází:

- Sušící (do 200 °C) – dochází k odstraňování vody ze směsi jejíž obsah je asi 2 % u suchého způsobu, 12 -13 % u způsobu polosuchého a 30 – 40 % u surovinových vodních suspenzí (kalů).
- Předehřívací (200 – 800 °C) – dochází k rozkladu pevných látek a ke ztrátě chemicky vázané vody v kaolinitu. Produkt dehydratace je velmi reaktivní, což má za následek jeho reakci s CaO respektive CaCO<sub>3</sub> za vzniku prvních produktu reakcí v pevném stavu C<sub>2</sub>S (2 CaO · SiO<sub>2</sub>) a CA (CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



- Kalcinační (800 – 1200 °C) – Okolo 800 °C nastává rozklad kalcitu (CaCO<sub>3</sub>) na volné vápno (CaO) a CO<sub>2</sub>. Zhruba od 900 – 950 °C vznikají hlinitany vápenaté, zejména C<sub>3</sub>A (3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):



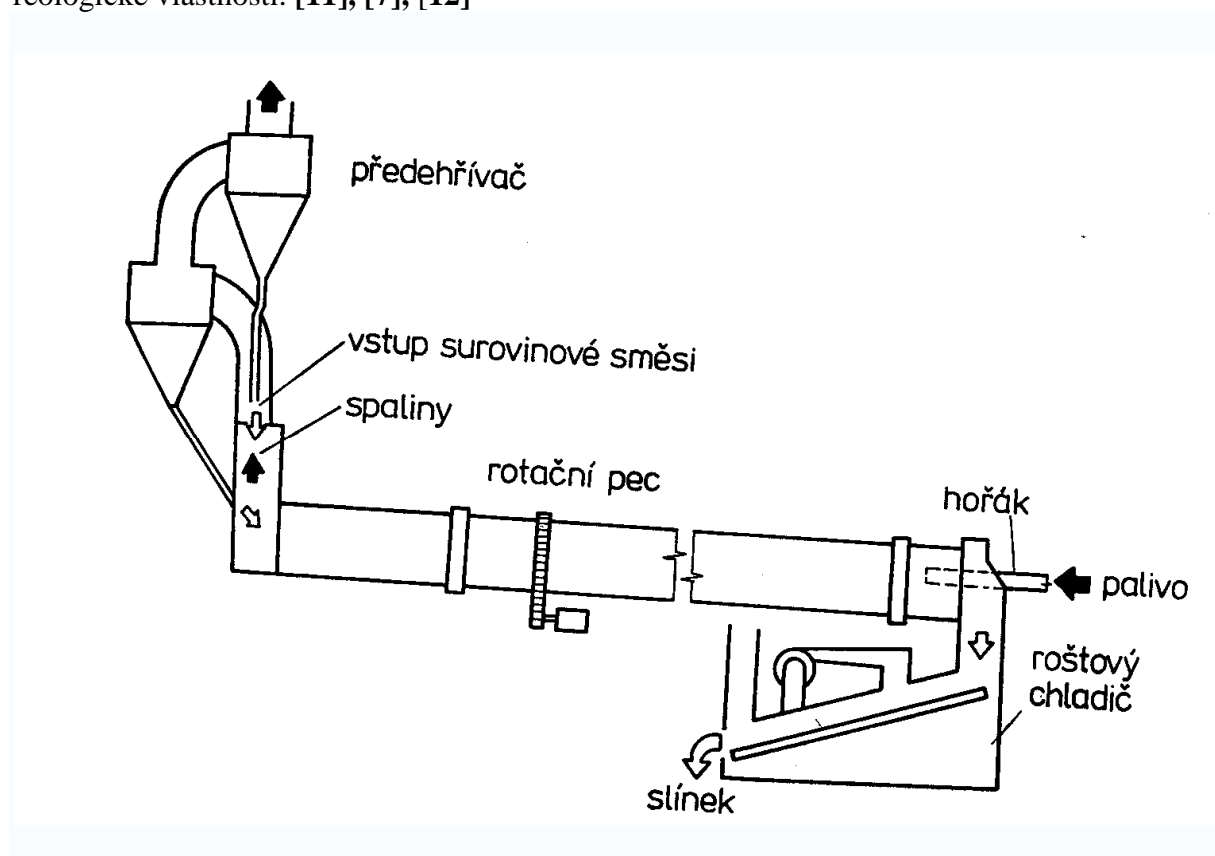
- Exotermické (1300 °C) – Nad teplotu 1250 °C se začíná objevovat kapalná fáze slínku a od této teploty se začíná tvořit C<sub>3</sub>S (3 CaO · SiO<sub>2</sub>)



- Slinovací (až 1400 – 1450 °C s poklesem na 1300 °C) – v této fázi nabývají reakce, kterými vznikají slínkové minerály dostatečné rychlosti. Převážně v této fázi vzniká nejžádanější slínkový minerál  $C_3S$ , který je nositelem typických vlastností portlandského cementu.
- Chladicí (1100 – 1000 °C) – chlazení slínku by mělo být rychle, aby bylo uchováno fázové složení, které se utvořilo za vysoké teploty a bylo blízké rovnováze a zejména jde o uchování  $C_3S$  a omezení jeho rozkladu na  $C_2S$  a  $CaO$ .

V průběhu výpalu se uplatňuje celá řada fyzikálních a fyzikálně-chemických procesů, jejichž výsledkem je v ideálním případě kvalitní slínek.

Závěrečným krokem výroby slínku je jeho mletí se sádrovcem, který plní úlohu regulátoru tuhnutí, a případně dalšími příměsmi a doplňujícími složkami. Důležitým faktorem ovlivňujícím výsledné vlastnosti cementu je jeho jemnost, která ovlivňuje jeho reaktivitu a reologické vlastnosti. [11], [7], [12]



**Obrázek č.10:** Schéma rotační cementářské peci

### 2.3.1.5 Výroba a vlastnosti portlandského cementu

Slínek je ve formě granulí poměrně dobře odolný vlhkosti. Teprve až po mletí získává schopnost dostatečně rychlé reakce s vodou a tuhnutí. Před mletím se slínek drtí v kuželových nebo válčových drtičích a pak se rozemílá většinou v oběhových mlýnicích s přidavkem 2 až 6 % sádrovce. Sádrovec se přidává ke zpomalení tuhnutí, aby se cement mohl běžně zpracovat. Někdy se může cement mísit s vysokopecní struskou, která se přidává při mletí slínku. Portlandský cement s obsahem 40 % strusky se nazývá struskoportlandský cement a



s obsahem 40 až 80 % strusky se označuje jako vysokopecní cement. Takto přidávaná struska musí mít vhodné složení (vysoký obsah CaO a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v poměru k SiO<sub>2</sub>) a má obsahovat co nejvíce skelné fáze. Taková struska poté vykazuje latentní hydrauličnost a ve směsi s budičem (sádrovec aj.) je schopna hydraulického tuhnutí. Hydraulického tuhnutí jsou schopny i jiné přírodní látky zejména ty sopečného původu jako pucolán. Z tohoto důvodu je i tyto látky možné užít jako příměsí portlandského cementu.

O vlastnostech cementů do určité míry rozhoduje stupeň jemnosti. Většina částic normálního cementu má velikost mezi 3 až 30 μm. Hustota čistého portlandského cementu nabývá hodnot 3,1 až 3,22 g·cm<sup>-3</sup>. Pro struskoportlandský cement se udává hodnota 3,04 g·cm<sup>-3</sup> a pro vysokopecní asi 2,8 g·cm<sup>-3</sup>. Pro použití cementu je rozhodující také jeho chování při tuhnutí a tvrdnutí, včetně dosažených pevností, objemových změn apod. Podle těchto dosažených pevností v tlaku (v MPa) po 28 dnech tuhnutí zkušebních tělísek můžeme portlandský cement rozdělit do tří tříd:

- třída 32,5
- třída 42,5
- třída 52,5

Další významnou vlastností cementu je objemová stálost při zpevňování. Smrštění cementu při tuhnutí je malé, takže obvykle nevede ke vzniku trhlin. Smrštění vzrůstá s rostoucím obsahem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A) ve slínku, s jemností mletí a s vodním součinitelem.[13], [7]

### ***2.3.1.6 Tuhnutí a tvrdnutí portlandského cementu***

Po smísení s vodou cement tuhne a postupně nabývá pevnosti. Tuhnutí a tvrdnutí tedy probíhá za aktivní účasti vody a vzniklé produkty jsou ve vodě nerozpustné a stálé. Tento stav je charakteristický pro hydraulické tuhnutí a tvrdnutí.

Praktické využití cementu jako pojiva umožňují dva charakteristické rysy jeho interakce s vodou:

- Po smísením s vodou nastává indukční perioda, která představuje smáčení zrn cementu. Dochází k prvním reakcím se slínkovými minerály. Tato perioda se vyznačuje velkou rychlostí uvolňování hydratačního tepla, ale stupeň hydratace zůstane nízký a tato směs je několik hodin ještě tvárná (dochází k tuhnutí).
- Po zatuhnutí vyplňují hydratační produkty prostor, který byl zaplněn nejprve vodou, tímto vzniká hutný produkt aniž by došlo k velkým objemovým změnám a následně dochází k tvrdnutí. [11]

Reakce slínkových minerálů s vodou lze označit jako hydrolýza s následující hydratací. Nejrychleji reaguje s vodou C<sub>3</sub>A a C<sub>4</sub>AF, pak následuje C<sub>3</sub>S a β-C<sub>2</sub>S. V případě, že při reakci slínkových materiálů s vodou bude přítomen přebytek vody, může nastat úplná hydrolýza slínkových materiálů za vzniku křemičitého gelu:



S malým množstvím vody vede reakce při normální teplotě ke vzniku hydrosilikátů podle schématu: [7]



### 2.3.2 Hlinitanový cement

Pojivo na bázi hlinitanového cementu je jemně mletá anorganická látka bílého až tmavošedého zbarvení, která po smíchání s vodou a ostřivem vytváří spojitelnou směs, která chemickým procesem ztuhne a ztvdne a zachová si určitou konzistenci. Hlavní účinnou látkou je  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Přibližné zastoupení hlavních složek je 40 hmot. %  $\text{CaO}$ , 45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5 %  $\text{SiO}_2$ , 10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Výchozími surovinami je vápenec a bauxit, jež se mísí v poměru 1:1.

Hlinitanový cement se nejčastěji vyrábí tavením v plamenné nebo elektrické obloukové peci. Pro tento účel není třeba jemně mletí surovin stačí pouhé rozdrcení. Tavicí teploty jsou okolo 1600 °C. Na rozdíl od portlandského cementu se má produkt ochlazovat pomalu, aby vzniklo žádané mineralogické složení. Jiným výrobním způsobem je slinování briket nebo granulí zhotovených z jemně mleté směsi surovin, při teplotách kolem 1250 °C.

Při tuhnutí nastává rychlá hydrolýza a hydratace hlavní aktivní fáze:



Na začátku vzniká při nižších teplotách jako hlavní produkt  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$  a zároveň s ním nebo později vzniká sloučenina, která je v uvedena v rovnici výše. Metastabilní  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$  má vysoké počáteční pevnosti, při vyšších teplotách vzniká rovnovážná sloučenina  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ , která nemá žádoucí vlastnosti z hlediska tuhnutí.

Mezi charakteristické vlastnosti hlinitanových cementů patří:

- Pomalé počáteční tuhnutí následované rychlým tvrdnutím.
- Vysoké konečné pevnosti 60 až 100 MPa, po delší době však tyto pevnosti klesají.
- Odolnost vůči síranovým, uhličitým a mořským vodám, díky ochrannému účinku gelu  $\text{Al(OH)}_3$
- Odolnost k vysokým teplotám, z tohoto důvodu se tyto cementy využívají u žárobetonu.

Díky těmto vlastnostem se hlinitanové cementy používají pouze pro speciální účely jako jsou havarijní opravy betonových konstrukcí, na nádrže na síranové a minerální vody a k výrobě žárobetonu, což je směs hlinitanového cementu se žárovzdornou výplní.[7]

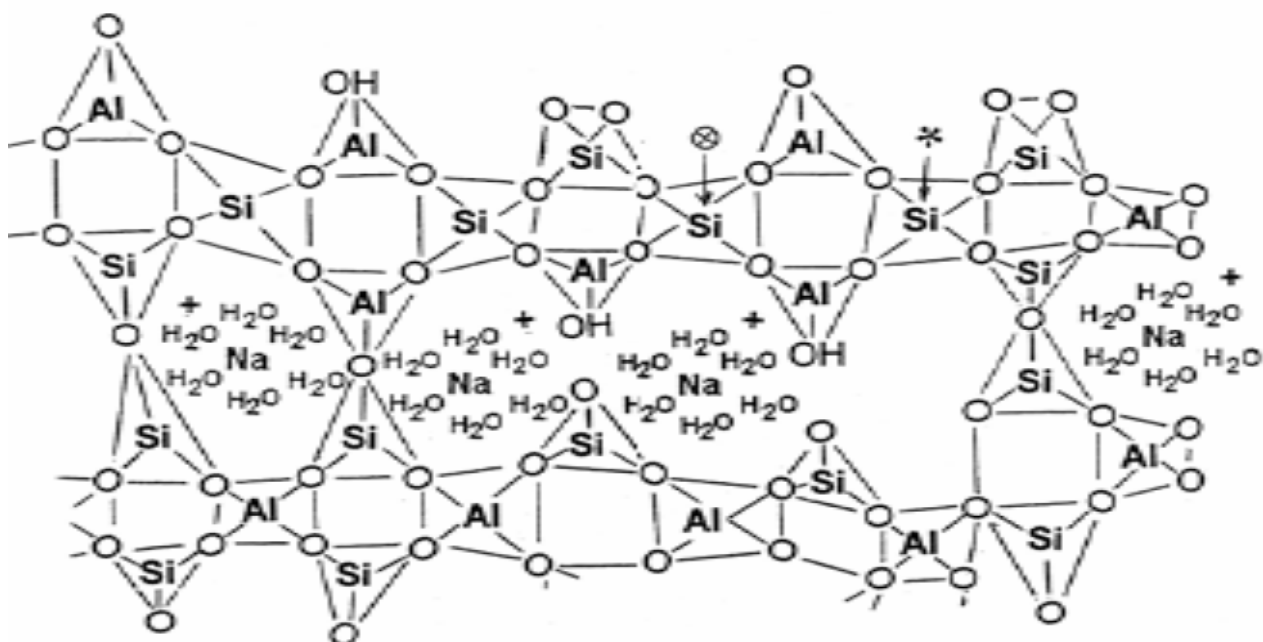
## 2.4 Geopolymery

Slovem geopolymery jsou označovány anorganické polymerní materiály, které jsou připravovány polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitanových materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce se označuje jako geopolymrace. Geopolymery patří do skupiny minerálních kompozitních materiálů netradičního složení, které se velmi podobají anorganickým minerálům - zeolitům. V podstatě se geopolymery definují jako alkalické aluminosilikáty bez obsahu vápenaté složky připravované nejčastěji

alkalickou aktivací metakaolinu roztokem hydroxidu sodného či draselného nebo vodním sklem. Termín geopolymery byl použit poprvé v roce 1979, kdy byl tento typ materiálu patentován Prof. Josephem Davidovitsem, který popsal geopolymery jako materiál, jehož základní aktivovanou složkou je metakaolin, který se připravuje kalcinací s různými typy vápenců. V podstatě si pod pojmem geopolymery můžeme představit amorfni hlinitokřemičitý materiál skládající se z tetraedrálních hlinitých a křemičitých jednotek kondenzujících při pokojové teplotě za vzniku rovnovážných struktur s přítomností jednomocného iontu alkalického kovu. Takovýto materiál poté vykazuje velmi překvapivé vlastnosti, jakými jsou například nerozpustnost ve vodě, nehořlavost, odolnost k teplotám kolem 1000°C apod. [14], [15]

### 2.4.1 Struktura geopolymery

Prof. Joseph Davidovits navrhl pro chemické označení geopolymery název polysialáty, ve kterých sialát označuje zkratku pro oxid hlinitokřemičitanu. Sialát je tedy složen z tetraedrálních aniontů  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  a  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  sdílejících kyslík, který potřebuje ionty jako jsou  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  apod. pro kompenzaci elektrické šarže  $\text{Al}^{3+}$  v tetraedrálnej koordinaci. Geopolymery mají porézní strukturu a náhodné prostorové uspořádání. Obsahují v pórech a v gelu vodu, která hraje roli jen jako nosič alkalického aktivátoru. Obecný vzorec geopolymery lze vyjádřit jako:  $\text{Me} [-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ , kde  $n$  označuje stupeň polymerace, a  $z$  počet tetraedrálních jednotek ( $z=1,2,3$ ). Me je alkalický kation, nejčastěji kation alkalických kovů jako sodík, draslík tvořících různé typy polysialátů. Geopolymery mají trojrozměrnou amorfni mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek. Platí zde také Loewensteinovo pravidlo, které nám říká, že spojování tetraedrů, které v jádře obsahují hliník, je zakázáno. Takovéto tetraedry mohou být propojeny pouze přes minimálně jeden tetraedr, který ve svém jádře obsahuje křemík. Z toho vyplývá, že dialuminátový anion  $-\text{Al}-\text{O}-\text{Al}-$  neexistuje. Tímto pravidlem je daný maximální poměr mezi Al:Si a je rovný 1:1.[16], [17]



Obrázek č.11: Jeden z možných pohledů na strukturu sodného geopolymery

## 2.4.2 Příprava geopolymérů

Pro přípravu geopolymérů byly studovány různé základní materiály jako jsou metakaolin, albit, kaolinit a další typy hlinitokřemičitanových minerálů. Geopolymerací lze také přeměnit řadu odpadních surovin, především elektrárenské a teplárenské popílků, slévárenské odpadní suroviny jako jsou slévárenské písky a odprašky, na plnohodnotné geopolymerní materiály s vysokou pevností, odolností proti ohni, kyselinám a bakteriím.

Teorie na přípravu geopolymérů se značně liší. V podstatě jsou známy dva základní postupy míchání polymerů. První postup preferuje nejprve smíchat pevné složky směsi, aktivátor připravit odděleně a následným smícháním těchto dvou složek směs aktivovat. Druhý způsob přípravy doporučuje míchat směs v pořadí metakaolin, hydroxid, vodní sklo a strusku. Pro správný průběh chemické reakce je však velmi důležitá homogenizace.

V podstatě můžeme říci, že chemická reakce probíhá v roztoku a tím je ovlivněn postup při přípravě geopolymérů. Nejprve musí dojít k rozpuštění aktivované složky v silné alkálii, ke kterému dochází při pokojové teplotě. Poté se přidává vodní sklo o známém silikátovém modulu pro dosažení obsahu alkálií a na závěr se přidají ostatní složky, které zlepšují mechanické i zpracovatelské vlastnosti materiálu. Takovými složkami jsou různá plniva a příměsi.[16]

## 2.5 Alkalické aktivátory

Jako aktivátory můžeme použít alkalické roztoky sodíku, draslíku a lithia, což jsou například hydroxidy, uhličitany a vodní skla. Kromě těchto látek můžeme pro alkalickou aktivaci použít síran a chlorid sodný nebo také cement, vápno, síran a chlorid vápenatý pro přípravu alkalicky aktivovaných cementů.

Alkalický aktivátor je velmi důležitou složkou geopolymerní reakce a zásadně ovlivňuje pevnost a další vlastnosti vzniklého produktu. Množství aktivátoru se liší v závislosti na ostatních složkách, například pro draselný aktivátor se přidává takový obsah roztoku aktivátoru, aby se obsah  $K_2O$  pohyboval v rozmezí mezi 3-10 % a pro  $Na_2O$  2-8 %. Podle posledních výzkumů bylo zjištěno, že materiály dosahují vyšší pevnosti ve směsích obsahujících jako aktivátor vodní sklo samostatně nebo ve směsi s roztokem hydroxidu. Ještě vyšší pevnosti se dá dosáhnout, pokud je vodní sklo použito ve formě koloidního roztoku, jehož silikátový modul by se měl pohybovat v rozmezí 1-2, kdy mechanická pevnost roste se snižováním silikátového modulu, tzn. vyšším obsahem alkálií v systému vodního skla. Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost geopolymérů je koncentrace aktivátoru, kdy s rostoucí koncentrací aktivátoru roste mechanická pevnost materiálu. Dále druh aktivátoru kromě pevnosti ovlivňuje tendenci vytvářet výkvěty vodorozpustných solí, přičemž stabilnější jsou aktivátory na bázi sodíku než na bázi draslíku.[14], [18],[19]

### 2.5.1 Hydroxidy

#### 2.5.1.1 Hydroxid sodný

Hydroxid sodný je v čistém stavu pevná bílá látka ve formě peciček, lístečků nebo granulí, silně hygroskopická a pohlcující oxid uhličitý ze vzduchu. To je důvod, proč musí být

uchovávána v hermeticky uzavřených obalech. Je dobře rozpustný ve vodě a ethanolu a ve smyslu platných předpisů o nebezpečných látkách se jedná o silnou žíravinu. Hydroxid sodný se vyrábí elektrolýzou roztoku chloridu sodného. Tato elektrolýza se dá provádět třemi způsoby (amalgamovým, membránovým a diafragmovým). Typ zvolené elektrolýzy ovlivňuje kvalitu produkovaného roztoku hydroxidu sodného, přičemž horší kvalitou se vyznačuje hydroxid připraven diafragmovou elektrolýzou (vyšší obsah chloridů 1-1,15 %). Naopak amalgamové elektrolýzy produkují louh sodný kvalitnější, ale z důvodu používání kovové rtuti se postupně nahrazují membránovou elektrolýzou. V České republice jsou nyní v chodu dvě elektrolýzy a to amalgamového typu, produkující hydroxid sodný a draselný (Neratovice, Ústí nad Labem).[20]

### 2.5.1.2 Hydroxid draselný

Čistý hydroxid draselný je světlá, silně navlhavá, pevná látka mající hustotu přibližně 2.04 g/cm<sup>3</sup>. Je dobře rozpustný ve vodě, kdy 1 g KOH se rozpustí v 0,5 g vody a také rozpustný v slabších alkoholech jako je methanol, ethanol a butanol. Během rozpouštění ve vodě dochází k silné exotermní reakci, produkující značné množství tepla, vedoucího ke zvyšování teploty roztoku někdy až ke 100°C a výše. Hydroxid draselný vytváří pevné hydráty jako jsou monohydrát KOH · H<sub>2</sub>O, dihydrát KOH · 2H<sub>2</sub>O a tetrahydrát KOH · 4H<sub>2</sub>O. Je to důležitá sloučenina, která tvoří silně zásadité roztoky ve vodě a ostatních polárních rozpouštědlech, schopné zneutralizovat mnoho kyselin a rozložit některé anorganické látky na organický materiál. Jelikož je KOH silná zásada, má silně korozivní účinky na veškerou organiku, včetně živých vláken. Hydroxid draselný se vyrábí obdobně jako hydroxid sodný elektrolýzou vodného roztoku chloridu draselného.[20]

### 2.5.2 Vodní sklo

Vodní sklo je v podstatě vodný koloidní roztok alkalického křemičitanu (sodného, draselného a někdy i lithného), vznikající rozpuštěním příslušného alkalicko-křemičitého skla ve vodě. Jeho obecný vzorec je Me<sub>2</sub>O · m SiO<sub>2</sub> · n H<sub>2</sub>O. Velikost částic běžně používaných vodních skel se pohybuje v rozmezí 1-500 nm. Tyto částice představují samostatnou fázi oddělenou disperzním prostředím, což je v tomto případě voda. Soustavu lze také malým zásahem destabilizovat a převést přes přechodovou formu gelu až na pevnou látku. [14]

Výroba vodního skla jako taveniny probíhá v podstatě stejným způsobem, jak jej objevil mnichovský profesor mineralogie J. N. von Fuchs v roce 1818. Výroba se v průmyslové praxi provádí v rotačních nebo taky stacionárních autoklávech za zvýšené teploty a tlaku. Do autoklávu se nadávkuje potřebné množství sodnokřemičité frity a vody dle jeho kapacity. Navážka těchto surovin odpovídá příslušnému typu vodního skla (dle měrné hmotnosti požadovaného koloidního roztoku vodního skla a křemičitého modulu). Poté se autokláv natlakuje vodní parou na tlak přibližně 0,6 MPa. Po několika hodinách se rozvařování skla ukončí a zbytkovým tlakem v autoklávu se jeho obsah přetlačí do zásobníku na vodní sklo. Dále se pak může vyrobené vodní sklo dekantovat, filtrovat, či odstředovat, což záleží na konečném využití produktu.

Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno křemičitým modulem  $m$ , což je molární poměr SiO<sub>2</sub>/Me<sub>2</sub>O, kde Me<sup>+</sup> je kation alkalických kovů nejčastěji Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> a

$\text{NH}^{4+}$ . Křemičitý modul se vypočte z hmotnostního poměru složek (hmotn.%  $\text{SiO}_2$  / hmotn.%  $\text{Me}_2\text{O}$ ) vynásobením koeficientem, který se liší v závislosti na složení křemičitanu-křemičitan sodný (1,032), křemičitan draselný (1,569), křemičitan lithný (0,498) a jeho hodnota u běžně vyráběných typů vodního skla leží v rozmezí 2,0-3,7. Křemičitý modul  $m$  lze upravovat jak směrem nahoru tak také směrem dolů. Modul  $m$  můžeme zvýšit rozpouštěním amorfního oxidu křemičitého ve vodním skle. Na druhou stranu k jeho snížení můžeme použít hydroxid sodný nebo roztok vodního skla o nižším molárním poměru. [20]

Vedle křemičitého modulu se k charakterizování vodního skla používá nejčastěji hustota, která poskytuje informaci o koncentraci roztoku i složení výchozího skla, dále viskozita a rovněž hodnota pH. Viskozita vodního skla závisí na jeho koncentraci a na hodnotě křemičitého modulu výchozího skla. Vodní skla, jakožto roztoky soli silné zásady a slabé kyseliny, jsou silně alkalická.

Vodní sklo se používá jako lepidlo, přísada do odmašťovacích, pracích a čistících prostředků a jako pojivo při výrobě pískových forem ve slévárnách. Pro tyto účely se používá především sodné vodní sklo. Pro výrobu nátěrových hmot a tmelů ve stavebnictví se používá naopak draselné vodní sklo. A v neposlední řadě se vodní sklo začalo používat k tvorbě geopolymerních materiálů.[14]

## 2.6 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pro alkalickou aktivaci se používají křemičité, nebo častěji hlinitokřemičité materiály, které se vyznačují latentními hydraulickými vlastnostmi. Do této skupiny můžeme zařadit materiály jak přírodního tak syntetického původu. Patří zde například aktivované kaolinické hlíny nejčastěji metakaolin, popílky, vysokopecní struska, vulkanická struska, slévárenské odpadní materiály apod.

### 2.6.1 Metakaolin

Metakaolin je vysoce reaktivní metastabilní materiál. Chemicky se jedná o vysoce reaktivní hlinitokřemičitan, který se získává tepelnou úpravou kaolinu a kaolinických jíílů v rozmezí teplot 650 - 900 °C, přičemž jako optimální kalcinační teplota je uváděna hodnota 700°C. Reaktivita metakaolinu je závislá na kalcinační teplotě. Se snižující se teplotou dochází ke vzniku méně reaktivního metakaolinu s obsahem většího množství zbytkového kaolinitu. Jedná se o materiál, který se díky své dostupnosti používá na výrobu geopolymérů nejčastěji. Metakaolin lze využít jako příměs do betonu. Je schopen reakce s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných kalcium silikátů a aluminátů, které mají příznivý vliv na kvalitu betonu a zlepšení fyzikálně mechanických a fyzikálně chemických vlastností. Metakaolin je využitelný také jako příměs do vápenných malt, zlepšuje jejich mechanické vlastnosti a zvyšuje jejich odolnost proti zmrazovacím cyklům. Aplikací metakaolinu dochází ke zlepšení tepelných a někdy i vlhkostních vlastností omítek. [25]

Bylo zjištěno, že u metakaolinu dochází k nepatrnému poklesu měrné hmotnosti oproti kaolinu. V případě kaolinu je měrná hmotnost  $2,58 \text{ g.cm}^{-3}$ , po kalcinaci na 600, 700 a 800 °C dochází k jejímu poklesu na hodnotu  $2,45 \text{ g.cm}^{-3}$ . Kalcinací při teplotách vyšších než 800°C dochází k jejímu opětovnému nárůstu a to na hodnoty přesahující  $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$ . Pokles je pravděpodobně spojen s úbytkem vody a vznikem volnější struktury a nárůst hustoty je možné přisuzovat slinování částic a vzniku dalších produktů. To souvisí také s vývojem

specifického povrchu, který je další důležitou vlastností těchto minerálů. Kolem teploty 500°C dochází k prudkému nárůstu specifického povrchu a při teplotách vyšších než 800 °C zaznamenáváme jeho prudký pokles.

Kalcinací dochází také ke změně distribuce velikosti částic. Střední hodnota velikosti částic se zvyšuje se zvyšující se teplotou kalcinace. Tyto deviace jsou v průmyslu řešeny mletím.[26]

### 2.6.2 Popílky

Z chemického hlediska se jedná o heterogenní materiály, které se skládají z více komponent o rozdílném chemickém, fyzikálním a mineralogickém složení. Tyto parametry jsou dány kvalitou spalovaného uhlí a typem spalovacího zařízení. Skládají se převážně z oxidu křemičitého, jehož obsahují až 70 % a oxidu hlinitého. Popílky vznikají při spalování pevných paliv v elektrárnách. Nalézají široké uplatnění ve stavebnictví a při výrobě stavebních hmot. Ve stavebnictví se používají při přípravě betonů a malt, přičemž mohou působit jako aktivní i neaktivní složky, což znamená, že mohou přispívat i nepřispívat procesu tvrdnutí. Při výrobě stavebních hmot se užívají hlavně při výrobě cementu ke korekcím surovinové moučky, pórobetonu a také k výrobě geopolymérů netradičního složení.[24]

### 2.6.3 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je vedlejším produktem termických a spalovacích procesů ve vysokých pecích. Tento materiál musí vykazovat takové chemické složení, které umožňuje, aby popel koksu a hlušina železné rudy mohly opustit vysokou pec jako kompaktní tavenina. K tomuto účelu jsou do vsázky přidávány struskotvorné přísady jako vápenec, kazivec, křemen apod. Struska je po výstupu z pece granulována ve vodě na struskový granulát nebo struskovou vlnu. Granulát má dobré hydraulické vlastnosti a je přidáván do cementu nebo slouží k výrobě struskových tvárnic.

**Tabulka č.3:** Složení strusky ze závodu NH Ostrava

<b>Struska NH Ostrava</b>	
<b>Složka</b>	<b>Obsah [% hmotn.]</b>
CaO	4,44
SiO <sub>2</sub> rozp.	5,15
SiO <sub>2</sub> nerozp.	52,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,32
MnO	0,12
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,22
Cl <sup>-</sup>	0,07

#### 2.6.4 Slévárenské písky

Slévárenské písky jsou zrnité světle zbarvené horniny, které jsou buď přímo a nebo po úpravě vhodné k výrobě slévárenských forem a jader. Hlavními požadavky na slévárenské písky jsou dostatečná žárovzdornost, pevnost (závisí na kvalitě a kvantitě vazné složky) a vhodná zrnitost (velikost středního zrna a pravidelnost zrnění). Přírodní slévárenské písky jsou vzhledem ke své variabilitě stále častěji a více nahrazovány syntetickými písky, tj. písky křemennými, do kterých se vmíchává stanovené množství vazné příměsi (většinou bentonit). [21]

V podstatě se dá říci, že slévárenský písek je vysoce kvalitní křemičitý písek, který je vedlejším produktem z výroby jak neželezitých, tak i železitých kovových odlitků. Fyzikální a chemické vlastnosti slévárenského písku z velké části závisí na typu licího procesu a na průmyslovém odvětví, z kterého pochází. [22]

Pro přípravu syntetických slévárenských směsí jsou na křemenné písky kladeny určité požadavky, které se dají shrnout do několika bodů:

- Vysoce mineralogicky čisté ( $\text{SiO}_2 > 96 \%$ ).
- Vysoce pravidelné.
- Nemají obsahovat hrubší zrna nad 0,5 - 0,6 mm (neplatí pro masivní odlitky).
- Písky pro ocel musí obsahovat velmi malé množství živců (do 1 %).
- Málo hranaté (kulaté písky jsou vhodné pro organická pojiva – malý povrch, min. spotřeba pojiva, avšak neodolávají tolik změnám teplot a jsou náchylnější k vadám z tepelného pnutí).
- Povrch zrn vysoce aktivní, čistý bez povlaků a nalepených částic

Křemenný písek dodávaný v prané a tříděné formě je jako ostřívo základní složkou slévárenské formovací směsi. Ostřívo představuje až 98 % objemu směsi. Při výrobě těžkých odlitků se začal značně využívat i chromit díky vyššímu ochlazovacímu účinku a žárovzdornosti. Jeho velkou nevýhodou je však vysoká cena ve srovnání s křemenným pískem. Forma je zpevňována pojivem, které je k ostřívu přidáváno v množství 1 – 10 % v závislosti na typu pojivového systému. Mezi nejčistší z těchto technologií se řadí směs s anorganickým pojivem (alkalickým silikátem) jako je například bentonitová směs (písek + bentonit + voda). Tato směs je v zásadě velmi čistá a její použití nezpůsobuje žádné problémy s hygienou práce ani eventuálním druhotným využitím směsi. Do těchto směsí se však ve slévárnách přidávají uhlíkaté přísady na zlepšení povrchu odlitku, kdy při jejich tepelné destrukci dochází k nežádoucímu vývinu některých škodlivých organických látek jako jsou fenoly, polycyklické aromatické uhlovodíky apod. [23]

Pro formování se slévárenské písky používají ve směsích s bentonity, vodním sklem apod. Po průchodu žárovým procesem se však jejich vlastnosti změní natolik, že je nelze ve větším měřítku opakovaně užít. Z tohoto důvodu se v posledních letech řada zemí zabývá výzkumem s cílem zvýšit podíl recyklovaného písku v nových směsích, nebo najít pro tyto recyklované písky využití v některém z jiných průmyslu.

Slévárenské písky jsou u nás v podstatě těženy ve třech hlavních oblastech (česká křídová tabule, moravská křídová tabule, písky váté a kaolinové). Ložiska slévárenských písků také doprovázejí na všech ložiskách sklářské písky, což je méně kvalitní surovina. [21]



### 2.6.5 Slévárenské odprachy

Prachové částice zachycované odsávacími zařízeními tvoří významný podíl slévárenských odpadů a jsou zachycovány při:

- vytloukání odlitků z forem,
- čištění odlitků,
- regeneraci formovacích směsí,
- tavení kovů,
- přípravě formovacích směsí,
- výrobě forem.

Materiál, který je zachycován v odlučovačích prachu je velmi rozdílného složení a stupně nebezpečnosti podle místa zdroje prachu. Mnohé oxidy nebo částice kovů jsou karcinogenní a zdraví nebezpečné, částice SiO<sub>2</sub> jsou zdrojem silikózy, zbytky fenolických a furanových pryskyřic jsou toxické, z tohoto důvodu není ekologické uložení takového odpadu na skládky, jelikož jíly v něm obsažené tvoří po zvlhčení deštěm a vyschnutí tuhou vrstvu, která je nepropustná. Pod touto vrstvou vznikají toxické kapaliny, které když proniknou na povrch skládky bývají příčinou uhynutí ptáků a jiných živočichů, nebo mohou proniknout do podzemní vody a tím způsobit její kontaminaci.

Pro odlučování prachu můžeme rozdělit odlučovače na dva základní typy:

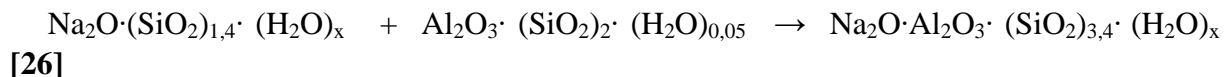
- Suché odlučovače
- Vlhké odlučovače

*Suché odlučovače* separují prach podobně jako různé typy vysavačů použitím textilní složky. Tento typ odlučování prachu se v dnešní době používají více, než vlhké odlučovače, jelikož zachycené produkty není nutno sušit. Materiál je periodicky vytrásán do kontejnerů, zachycené částice jsou podobného složení jako u mokrých odlučovačů. V některých provozech jsou odlučovače umístěny u místa vzniku prachu, v jiných provozech je tento odpad shromažďován centrálně a periodicky odvážen na řízené skládky.

*Vlhké odlučovače*, které používají pro separaci prachu vodní sprchy a výsledkem jsou dva rozdílné produkty – černá voda a kal. Černá voda obsahuje koloidální jíl, nejčastěji montmorillonitického typu a uhlíkaté částice, které sedimentují velmi pomalu. Kalový produkt obsahuje větší a těžší částice uhlí, písku a kovu, které klesají velmi rychle. [23]

### 2.7 Alkalická aktivace

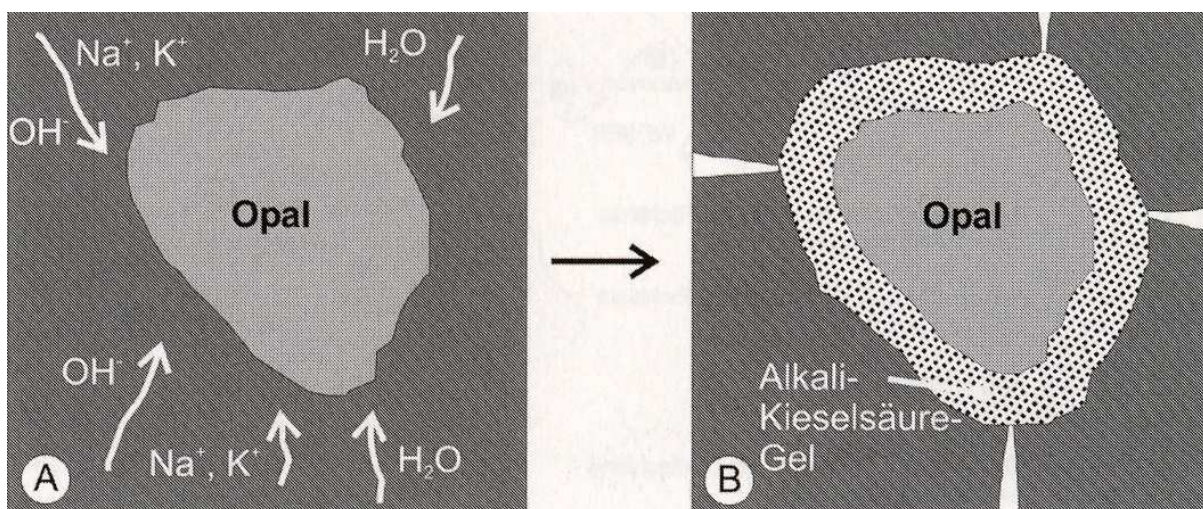
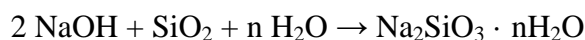
Podmínkou pro alkalickou aktivaci je silně zásadité prostředí až pH > 12, aby mohlo dojít k rozkladu trojrozměrné struktury výchozího hlinitokřemičitanu za vzniku křemičitanových a hlinitanových anionů. Geopolymerace je vyvolávána exotermní chemickou reakcí oxidu hliníku a křemíku s alkáliemi Na<sup>+</sup> nebo K<sup>+</sup> za vzniku polymerních vazeb Si—O—Al. Výsledná pevná látka geopolymeru je vytvořena ze soustavy sol-gel. Alkalickou aktivací například metakaolinu pomocí vodního skla dochází ke vzniku geopolymeru obsahujícího jednotku sialát-siloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-] popřípadě sialát-disiloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-] dle reakce: [25]



Prekurzorem těchto reakcí je voda, která během reakčního procesu pomalu a postupně mizí.[18]

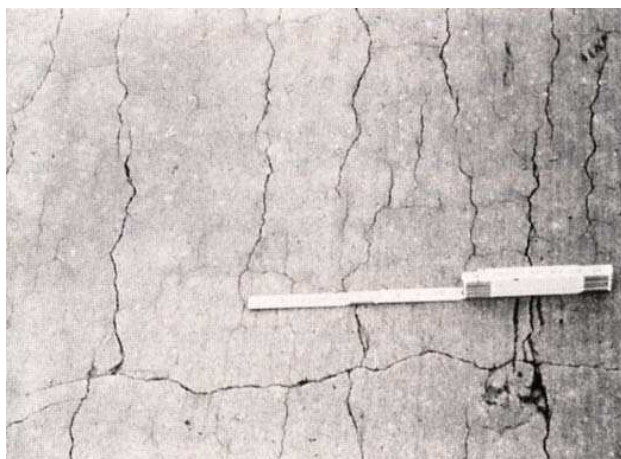
## 2.8 Alkalicko-křemičitá reakce

Při alkalicko-křemičité reakci reagují amorfni oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a hydroxid alkalického kovu ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ , za přítomnosti vlhkosti) na více či méně hustý alkalicko-křemičitý gel :



**Obrázek č.12:** A: Reakce amorfniho oxidu siřičitého s  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  a vodou  
B: Zvětšování objemu při tvorbě alkalicko-křemičitého gelu

Po nasáknutí kameniva je tato reakce spojena s objemovou expanzí. Protože kamenivo je pevně usazeno, není k dispozici odlehčující prostor pro expanzi. Objemový nárůst tak vede k vnitřnímu tlaku při bobtnání. Toto namáhání přesahuje pevnost v tahu přijatelnou pro materiál, takže mohou vznikat trhliny. Tyto trhliny jsou většinou jemně rozloženy a síťovité, nejsou omezeny pouze na okrajovou oblast, nýbrž se mohou táhnout celou strukturou materiálu.



**Obrázek č.13:** Ukázka trhliny způsobené alkalicko-křemičitou reakcí

Alkalicko-křemičité reakce probíhají během delšího časového období. Dochází k postupnému prosakování alkálii z uvolněných pórů a také z vytvořené vrstvy gelu. Dále alkálie reagují s amorfním oxidem křemičitým v jádru kameniva. Současně se mohou z gelu znovu uvolňovat alkalické hydroxidy, které jsou rovněž k dispozici pro pokračování reakce.

Pro vznik nežádoucí alkalicko-křemičité reakce jsou stanoveny tři základní podmínky:

- V materiálu musí být obsaženo kamenivo příslušné zrnitosti citlivé na alkálie.
- V kamenivu musí být obsaženo dostatečné množství alkálií.
- K alkalicko- křemičité reakci dojde pouze v případě je-li materiál dostatečně vlhký.

Zabránění škodlivé alkalicko-křemičité reakce lze dosáhnout omezením alespoň některého ze tří předpokladů nutných pro její vznik.[27]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části jsou popsány metody a přístroje, které byly použity pro přípravu a analýzu vstupních materiálu a vzorků.

#### 3.1 Příprava zkušebních vzorků

Zkušebními vzorky pro pevnosti v tlaku a v ohybu byly trámečky o rozměrech 40x40x160 mm. Jednotlivé směsi byly nejdříve homogenizovány pomocí míchačky a poté přisypávány a udusávány do připravených forem. Vrchní strana zkušebních tělísek ve formě byla pomocí špachtle uhlazena do roviny. K vyjmutí vzorků z forem docházelo většinou do 1-2 dnů, podle typu míchaných vzorků a aktuálního stavu připravené směsi. Jejich tvrdnutí probíhalo při laboratorní teplotě po dobu 28 dní bez dalšího vlhčení nebo zpomalování vysychání zakrytím fólií. Od každé směsi byly připraveny vždy tři zkušební tělíska.

Formy pro zhotovení zkušebních trámců musí být vyrobeny z oceli minimální tvrdosti podle Brinella  $HB = 140$  tak, aby v nich mohla být vyrobena současně tři zkušební tělesa. Ke kovové podložce musí být formy pevně přichyceny, aby nedošlo k případnému unikání vody mezi formou a podložkou.



**Obrázek č.14:** Forma pro přípravu zkušebních trámčků 40x40x160 mm

### 3.1.1 Příprava testovacích směsí

V experimentální části byly testovány postupně směsi s obsahem portlandského cementu, hlinitanového cementu a směsi na bázi geopolymerních pojiv alkalicky aktivovaných sodným vodním sklem, hydroxidem sodným a komerčně dodávaným baucisem L 160 složkou B.

K těmto pojivům se postupně přidávalo různé množství (v hm. %) slévárenského písku a slévárenských odprachů. Pro zlepšení zpracovatelských vlastností bylo ke vzorkům přidáváno takové množství vody, že rozliv testované směsi činil na setřásacím stolku 13 - 14 cm. Přesné složení veškerých směsí je uvedeno níže v textu.

Pro měření byly použity trámečky o rozměrech 40x40x160 mm. Měření pevnosti se provádělo po 1, 7 a 28 dnech u směsí s portlandským a hlinitanovým cementem a po 7, 14 a 28 dnech u alkalicky aktivovaných směsí.

### 3.2 Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu

Připravená zkušební tělíska byla testována na přístroji DESTTEST 3310 COMPACT A, který uvádí do provozu společnost Beton System. Jedná se o komplexní zkušební pracoviště pro pevnostní zkoušky v oblasti stavebních hmot sestávající se z lisů, lamaček, trhačky, skříně s hydraulickým agregátem a řídicího počítače s ovládacím panelem. Pro účely této práce byl konkrétně použit lis BS-300 pro zkoušení pevností v tlaku a lamačka BS-10 pro zkoušení pevností v tahu za ohybu. Přístroj i testovací tělíska byly v plném souladu s EN ČSN 197-1. [29]

**Tabulka č.4:** Technické parametry lisu BS-300 a lamačky BS-10.

	<b>BS-300</b>	<b>BS-10</b>
<b>Jmenovitá zatěžovací síla [kN]</b>	300	10
<b>Minimální zatěžovací síla [kN]</b>	6	0,2
<b>Rychlost zatěžování [Ns-1]</b>	0,3÷99,9k	5÷99,9k
<b>Přesnost měření * [%]</b>	±1	±1
<b>Výška pracovního prostoru [mm]</b>	55	55
<b>Zdvih tlakového válce [mm]</b>	55	55
* Od 5 % do 100 % jmenovité lisovací síly		





**Obrázek č.15:** Pracoviště DESTTEST 4310 COMPACT A

### 3.3 TG – DTA – EGA analýza

Diferenční termická analýza (DTA) je metoda, kterou můžeme sledovat endotermní nebo exotermní pochody ve vzorku při plynulých změnách teploty vzorku. Jestliže v látce takové pochody probíhají, můžeme zaznamenat náhlý vzrůst, nebo pokles teploty vzorku, na rozdíl od souběžně zahřívaného referenčního vzorku, který musí být stabilní a inertní v měřeném intervalu teplot. U DTA se měří rozdíl teplot zkoumaného a referenčního vzorku při časově konstantním gradientu teploty, čímž dostáváme závislost  $\Delta T = f(T)$  resp.  $\Delta T = f(t)$ . Exotermní a endotermní pochody se projeví jako maxima a minima na křivce přímého ohřevu. Kvalitní charakteristikou látky je poloha píku, zatímco kvantitativní charakteristikou je plocha píku, která je dána množstvím uvolněného nebo vázaného tepla a je v e vztahu k ostatním komponentám vzorku. [31]

Pomocí termogravimetrie (TG), lze sledovat změny hmotnosti navážky vzorku v závislosti na kontinuálním tepelném zatěžování. Dá se říci, že termogravimetrie je metoda, pomocí které můžeme sledovat procesy spojené se změnou hmotnosti navážky vzorku při kontinuálním zvyšování teploty, nebo v izotermickém režimu. Pro účely této práce se sleduje závislost aktuální hmotnosti na teplotě nebo čase ( $\Delta m = f(T)$ , resp.  $\Delta m = f(t)$ ) při konstantním teplotním gradientu. Stanovení kvantitativního zastoupení složek vzorku lze posoudit z velikosti hmotnostních změn  $\Delta m$  a příslušných teplotních intervalů. Využití izotermické gravimetrie, která sleduje závislost hmotnosti v čase při konstantní teplotě, umožňuje hodnotit kinetiku probíhajících pochodů a reakcí a následně stanovit mechanismus většinou rozkladného procesu.[31]

Při TG analýze vznikají tepelným rozkladem vzorku plynné produkty, které jsou podstatným zdrojem informací o povaze testovaných materiálu. Z tohoto důvodu se používá

termická analýza v kombinaci s efluenční plynovou analýzou (EGA), která umožňuje identifikaci uvolňovaných plyných látek pomocí infračerveného spektrometru s Fourierovou transformací (FTIR). [32]

Infračervená spektroskopie patří do skupiny nedestruktivních analytických metod, kdy zkoumaný vzorek není analýzou poškozen, a přesto poskytuje informaci o svém složení. Infračervená spektroskopie je v podstatě analytická technika určená především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických a anorganických látek. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorpance (A) na vlnové délce dopadajícího záření.[33]

Díky pokroku ve výpočetní technice došlo k praktickému rozšíření infračervených spektrometrů s Fourierovou transformací. Jedná se o přístroje pracující na principu interference spektra, které na rozdíl od disperzních přístrojů měří interferogram modulovaného svazku záření po průchodu vzorkem. Tyto přístroje využívají matematickou metodu Fourierovy transformace, abychom získali klasický spektrální záznam. FTIR spektrometry vykazují celou řadu výhod. Při měření dopadá na detektor vždy celý svazek záření. Takové uspořádání umožňuje i experimenty, při nichž dochází k velkým energetickým ztrátám, tj. měření silně absorbujících vzorků nebo měření s nastavci pro analýzu pevných či kapalných vzorků v odraženém světle - reflektanční infračervená spektroskopie.[33]



*Obrázek č.16: Přístroj TA INSTRUMENTS Q600 + THERMO NICOLET IS10 pro TG – DTA – EGA + FTIR analýzu*

### 3.4 RTG prášková difrakce

RTG prášková difrakce je analytická metoda na stanovení fázového složení látek krystalického charakteru. Tato metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu.

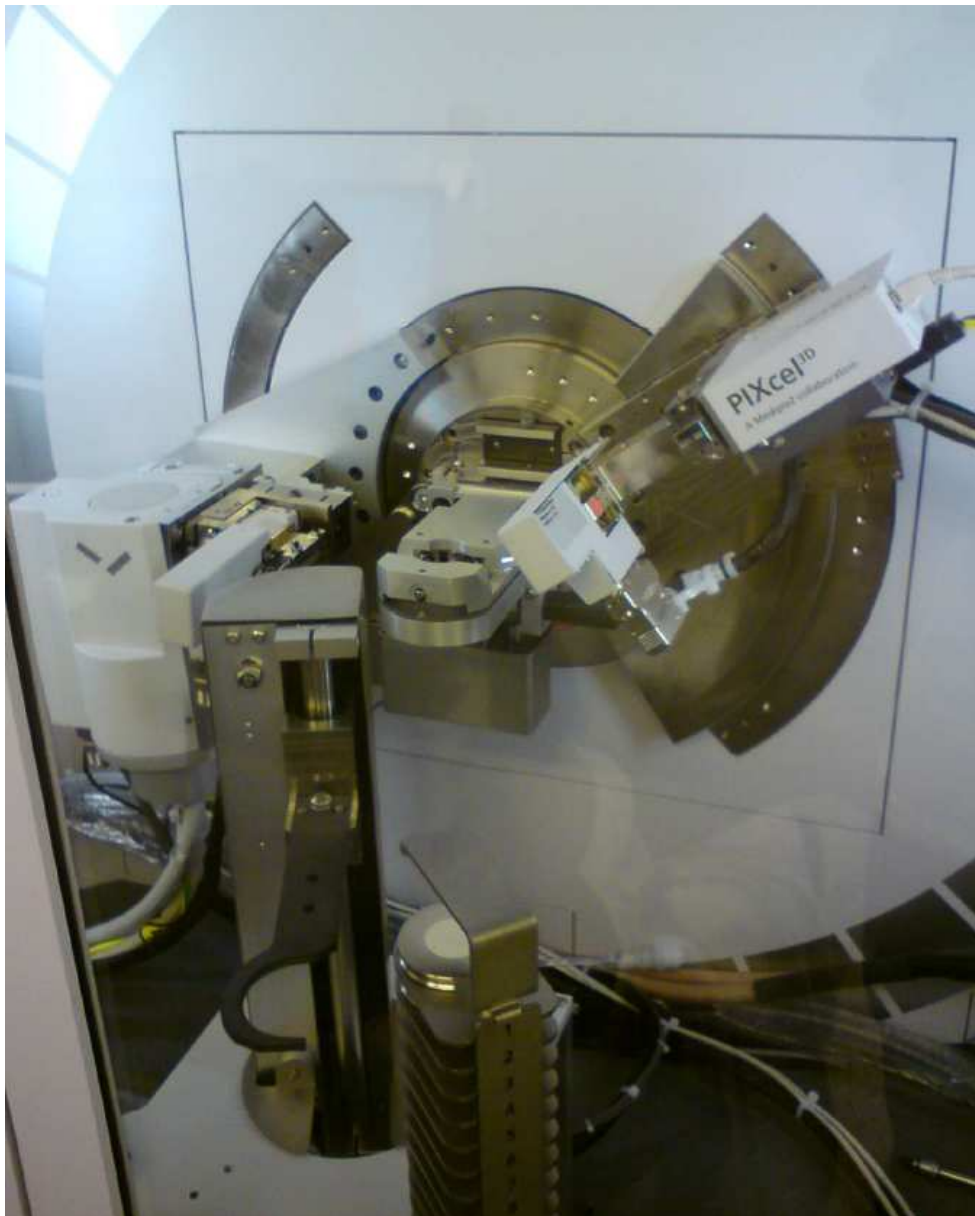
Jelikož v práškovém (polykrystalickém) vzorku jsou jednotlivé krystality orientovány náhodně, ve velkém množství malých krystalků se budou vyskytovat všechny směry natočení

rovin vzhledem k dopadajícímu záření. Ve směrech kde je splněna Braggova podmínka dojde k difrakci záření. Braggova podmínka :

$$n \cdot \lambda = 2d_{hkl} \cdot \sin \theta$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka rentgenového záření,  $n$  je celé číslo vyjadřující, o kolik násobků vlnové délky je jeden paprsek vůči druhému zpožděn (řád difrakce),  $d_{hkl}$  je vzdálenost dvou sousedních rovin v krystalu a  $\theta$  je úhel difrakce rentgenového záření.

RTG analýza se používá ke stanovení mineralogického (fázového) složení krystalických látek. RTG difrakční analýza vychází ze spojení krystalografického uspořádání látek a interakce RTG záření s částicemi tvořícími krystalovou mřížku. Vzhledem k tomu, že práškové materiály jsou jen částečně krystalické, tak určení fázového složení bývá nepřesné a obtížné.[30]



**Obrázek č.17:** RTG spektrometr PANalytical Empyrean



### 3.5 RTG fluorescenční spektrometrie

RTG fluorescenční spektrometrie je jednoduchá metoda sloužící k určování prvkového složení látek. Principem této metody je interakce RTG záření, které emituje rentgenka, se vzorkem. Při takové interakci dochází k vyražení elektronu z vnitřních slupek zkoumané látky. Následně dojde k přesunu elektronu z vyšších energetických hladin a vyzáření sekundárního rentgenového záření, které je charakteristické pro všechny prvky. Toto záření je poté detekováno na detektoru. Fluorescenční spektrometry dělíme na dva základní typy - vlnově dispersní a energiově dispersní. Zatímco u vlnově dispersních spektrometrů dochází k separaci RTG záření na krystalu na základě různých vlnových délek, u energiově dispersních spektrometrů dochází k detekci na základě různých energií fotonů sekundárního RTG záření.

Využití této metody je velmi široké. Tato metoda je schopna identifikovat prvky v rozsahu Al - U na vzduchu a při použití vakua je možno identifikovat až Be.



**Obrázek č.18:** *Energiově dispersní fluorescenční spektrometr EX6600 Xenometrix*

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

V následujících podkapitolách jsou sumarizovány analýzy vstupních surovin, dále je zde rozepsáno složení připravovaných směsí s různým obsahem slévárenských odpadních materiálu, s různým druhem pojiva a jejich pevností v tlaku a ohybu.

### 4.1 Vysvětlivky k tabulkám

A,B,C,D,E... označení jednotlivých směsí

Počet dnů      počet dní zrání směsi

$\sigma_{P_0}$               pevnost vzorku v tahu za ohybu v MPa

$\sigma_{P_d}$               pevnost vzorku v tlaku v MPa

### 4.2 Použité suroviny

**Portlandský cement**              Portlandský cement 42,5 R - Mokrá

**Hlinitanový cement**              Secar 51, Lafarge, Francie

**Slévárenský písek**              Slévárenský písek - Kuřím

**Slévárenské odprachy**              Slévárenské odprachy – Kuřím

**Vodní sklo**              Vodní sklo sodné

**Baucis**              Baucis L160 složka B, ČLUZ a.s. Nové Srašecí CZ

**Hydroxid sodný**

**Normovaný písek**              Směs písků ČSN I, ČSN II a ČSN III v poměru 1 : 1 : 1

**Destilovaná voda**

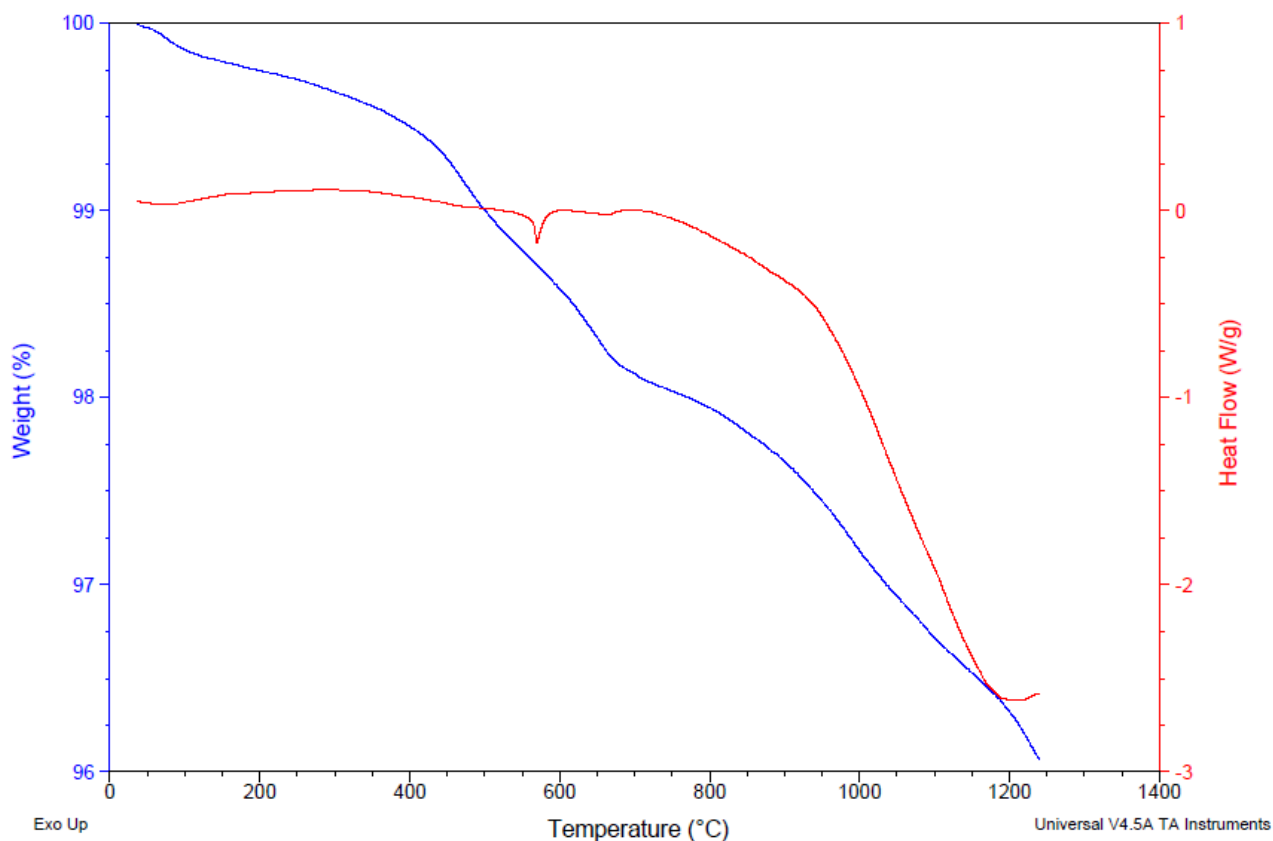
### 4.3 Chemické analýzy vstupních surovin

Tato kapitola obsahuje analýzy zmiňovaného slévárenského odpadního písku a slévárenských odprachů. Analýzy dalších vstupních surovin se neprováděly, jelikož byly použity obecně známé (technický list, složení) složky.

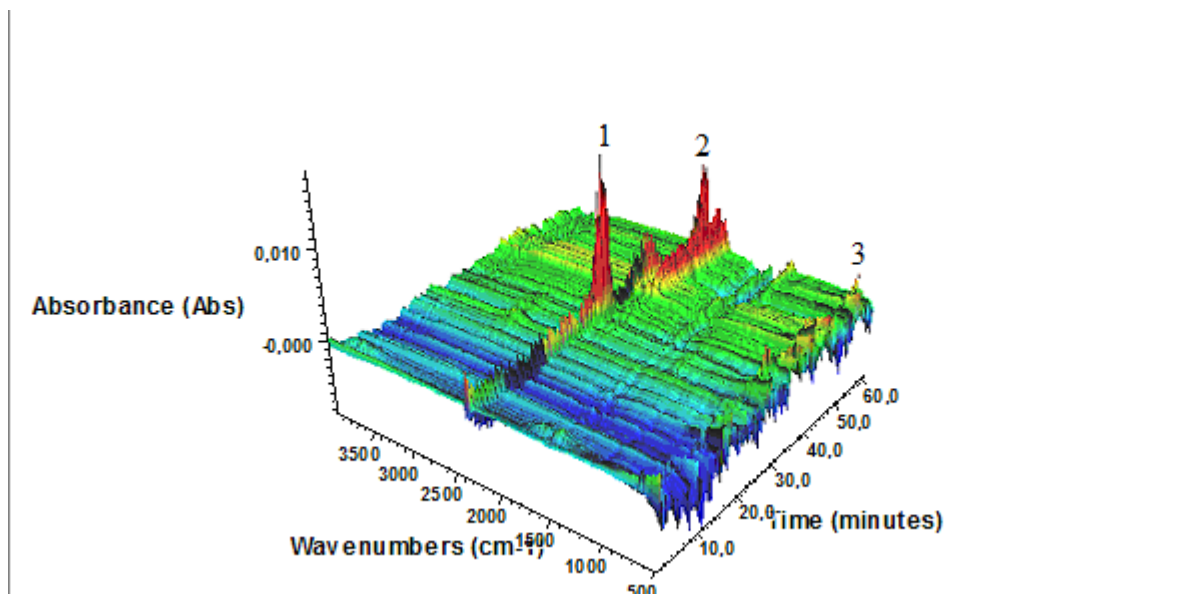
#### 4.3.1 TG – DTA – EGA analýza slévárenských odpadních písků

K vlastní analýze této suroviny bylo do platinového kelímku naváženo ~ 44 mg vzorku, který se rovnoměrně rozvrstvil po dně kelímku. Tento vzorek se zahříval rychlostí  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  na teplotu  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jako referenční vzorek byl použit práškový korund. Celá analýza se prováděla v oxidační atmosféře.

Na obrázku č.19 jsou uvedeny křivky změn hmotnosti a změn tepelného toku měřených vzorků v závislosti na teplotě v čase. Na obrázku č.20 je uvedeno grafické znázornění záznamu z EGA analýzy, kdy byly analyzovány uvolněné plynné rozkladné produkty z použitého slévárenského písku.



**Obrázek č.19:** Grafické znázornění záznamu z TG-DTA analýzy použitého slévárenského písku



**Obrázek č.20:** Grafické znázornění záznamu z EGA analýzy použitého slévárenského písku

#### Vyhodnocení:

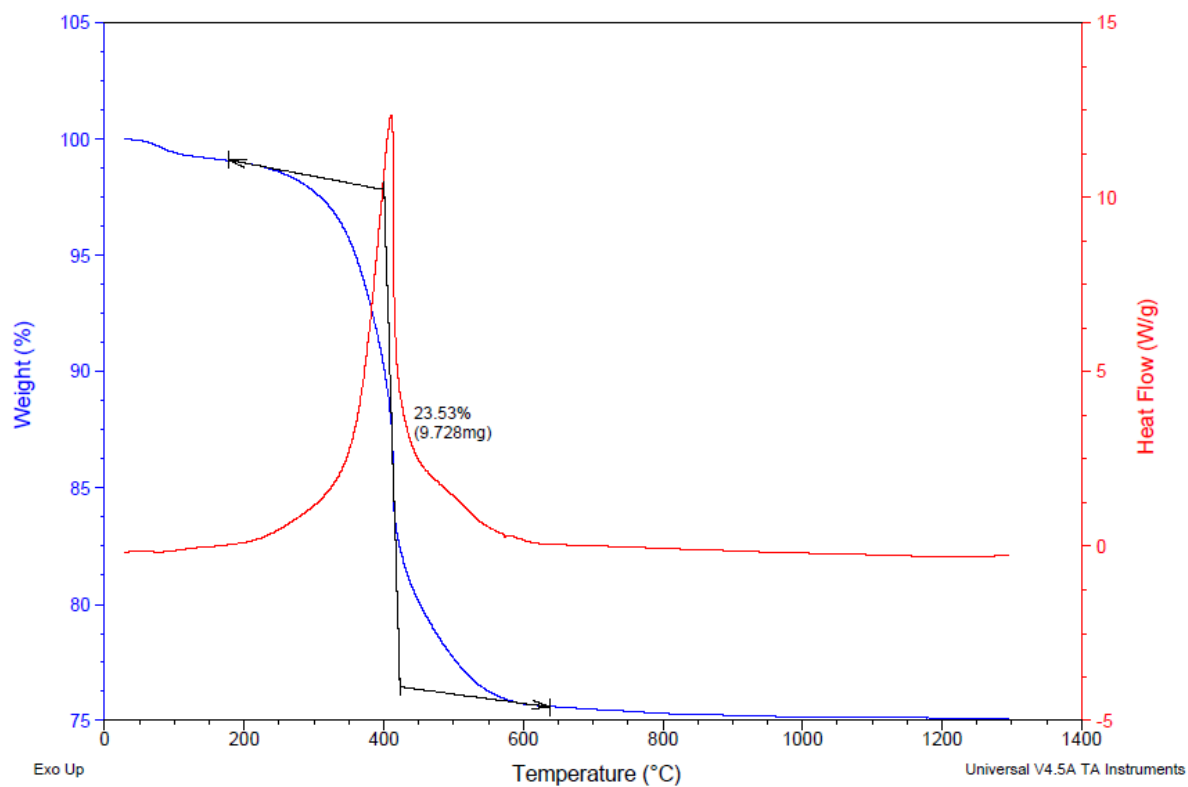
Z obrázku č.19 lze vidět, že při TG-DTA analýze nejprve docházelo k uvolňování vlhkosti (cca do 100 – 110 °C), poté docházelo k pozvolné pyrolýze organických sloučenin. Tuto skutečnost dokládá mírné zvlnění na obrázku č.20 při cca 3200- 3300  $\text{cm}^{-1}$  v čase 30 – 40 minut. Zbylý pyrolitický uhlík z organických sloučenin zreagoval s kyslíkem obsaženým v oxidační atmosféře a uvolňoval se ve formě  $\text{CO}_2$ . Z grafického znázornění záznamu TGA-DTA analýzy je patrné, že celkový pokles hmotnosti byl jen něco kolem 4 %. Endotermický efekt při teplotě 573 °C odpovídá přechodu  $\alpha$ -křemene na  $\beta$ -křemen.

Z grafického znázornění EGA analýzy na obrázku č.20 lze pozorovat píky č.1, 2 a 3, kdy pík č.1 a 2 odpovídá deformačním pásům uvolněného  $\text{CO}_2$  (pásky okolo 2500  $\text{cm}^{-1}$ ) z rozkladu kalcitu resp. vápence a pík č.3 odpovídá vibračnímu pásu uvolněného  $\text{CO}_2$ .

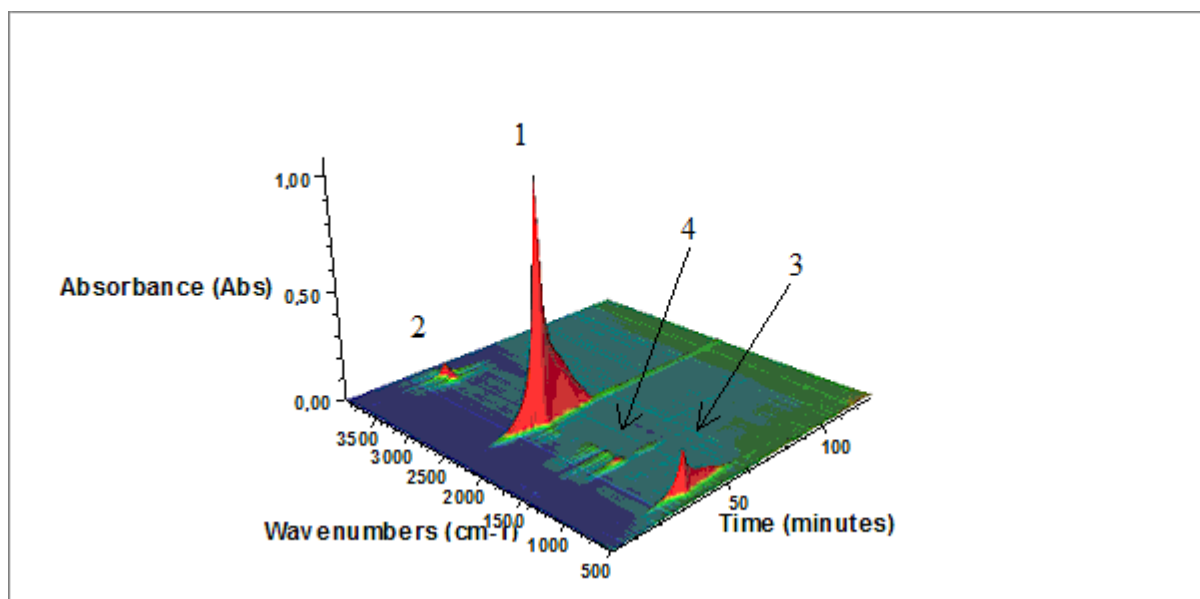
#### 4.3.2 TG – DTA – EGA analýza slévárenských odprachů

K vlastní analýze této suroviny bylo do platinového kelímku naváženo ~ 41 mg vzorku, který se rovnoměrně rozvrstvil po dně kelímku. Tento vzorek se zahříval rychlostí 20 °C ·  $\text{min}^{-1}$  na teplotu 1250 °C. Jako referenční vzorek se použil práškový korund. Celá analýza se prováděla za oxidační atmosféry.

Na obrázku č.21 jsou uvedeny křivky změn hmotnosti a tepelného toku měřených vzorků v závislosti na teplotě. Na obrázku č.22 je uvedeno grafické znázornění záznamu z EGA analýzy použitých slévárenských odprachů.



**Obrázek č.21:** Grafické znázornění záznamu z TG-DTA analýzy použitého slévárenského odprachu



**Obrázek č.22:** Grafické znázornění záznamu z EGA analýzy použitého slévárenského odprachu

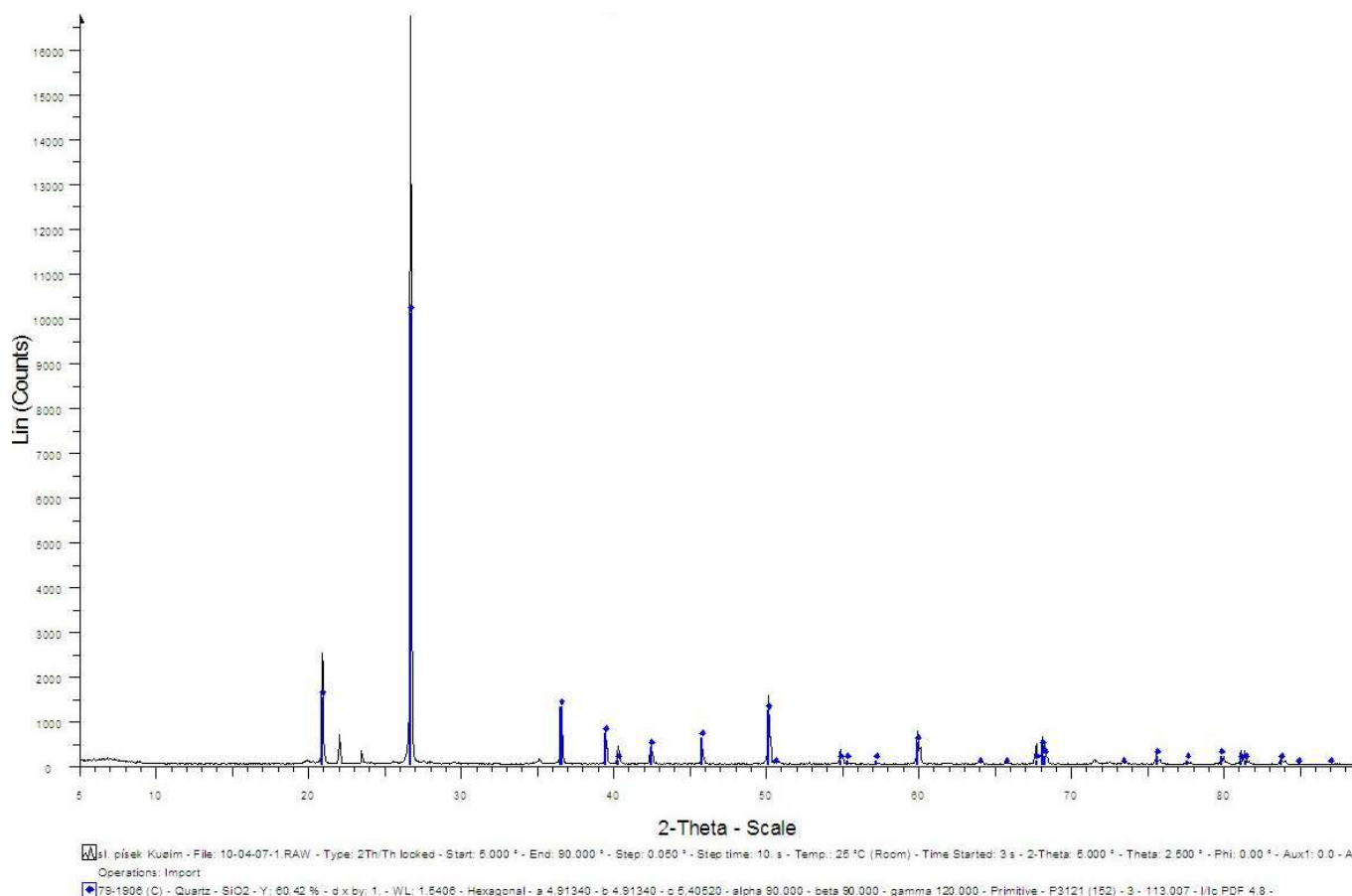
## Vyhodnocení:

Z provedených experimentů je patrné, že slévárenské odprachy uvolnily cca 24 % produktů po vyhoření organických složek Tomuto vyhoření odpovídá velký exotermický efekt na DTA křivce.

Na obrázku č. 22 můžeme vidět píky č.1, 2, 3 a 4, kde pík č.1, 2 a 3 odpovídá uvolněnému CO<sub>2</sub> z hoření organické fáze. Pík č. 4 znázorňuje malé množství organických fragmentů.

### 4.3.3 RTG prášková difrakce slévárenských odpadních písků

Na přístroji Panalytical Empyrean byla provedena kvalitativní analýza fází ve slévárenském odpadním písku v oblasti mezi difrakčními úhly 5 – 90 °2θ.



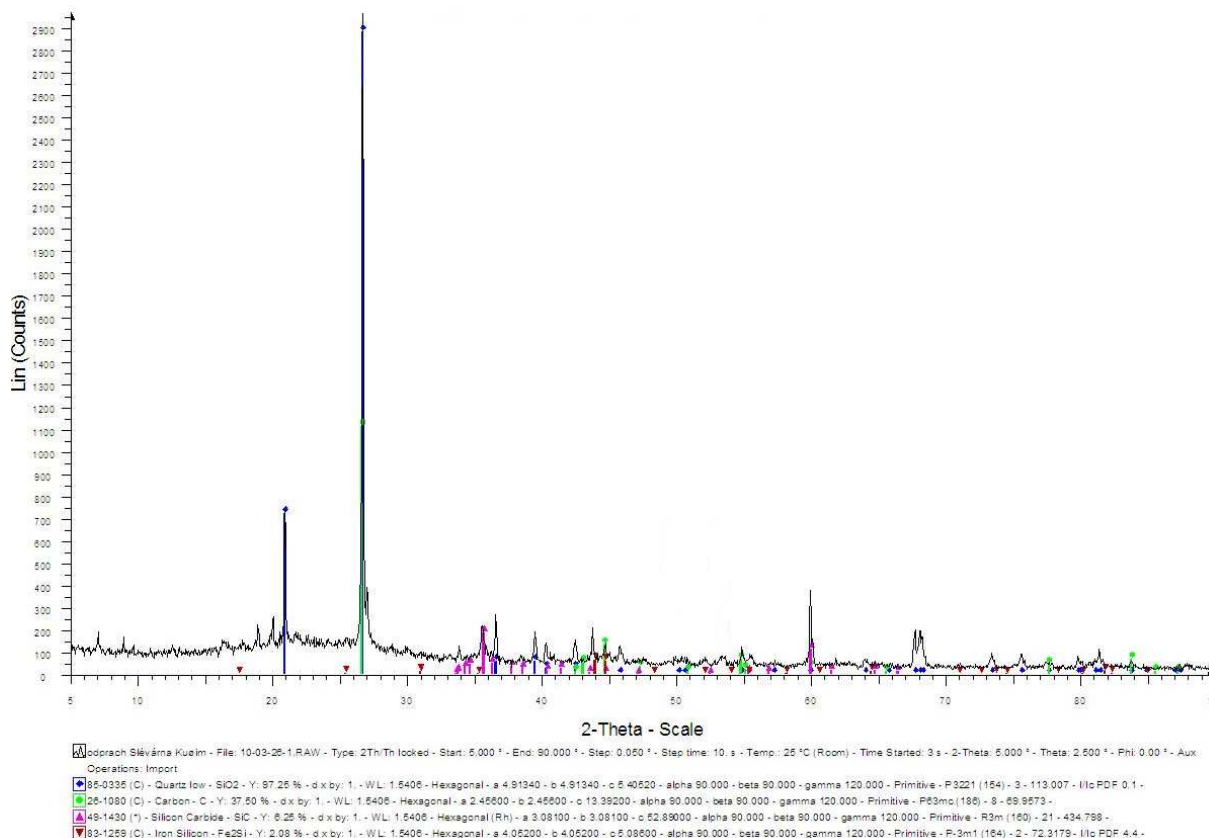
**Obrázek č.23:** Grafické znázornění záznamu z RTG práškové difrakce použitého slévárenského písku

## Vyhodnocení:

Difraktogram na obrázku č.23 reprezentuje fázové složení použitého slévárenského odpadního písku. Z tohoto grafu je patrné, že tato vstupní surovina je převážně tvořena pouze oxidem křemičitým a nepatrným podílem amorfni fáze.

### 4.3.4 RTG prášková difrakce slévárenských odprachů

Na přístroji Panalytical Empyrean byla provedena kvalitativní analýza fází v použitých slévárenských odprašcích v oblasti mezi difrakčními úhly 5 – 90 °2 $\theta$ .



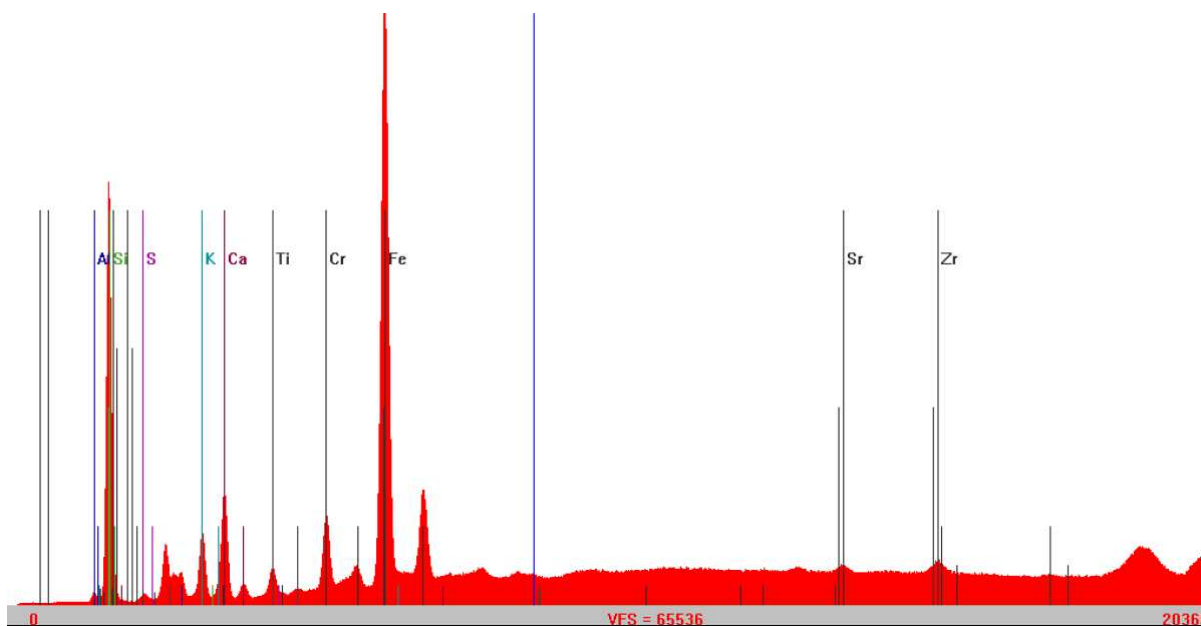
**Obrázek č.24:** Grafické znázornění záznamu z RTG práškové difrakce použitého slévárenského odprachu

#### Vyhodnocení:

Difraktogram na obrázku č.24 reprezentuje fázové složení vstupních slévárenských odprachů. Z grafu je patrné, že majoritní podíl této suroviny je tvořen oxidem křemičitým (cca 85-90 %), dále je ve vzorku obsažen karbid křemíku (cca 5 %), ferrosilicium (cca 3 %) a stopové množství uhlíku vyredukovaného z litiny. Zbývající podíl je tvořen amorfni fází popřípadě stopovým množstvím jiné fáze.

#### 4.3.5 RTG fluorescenční spektrometrie slévárenských odpadních písků

RTG fluorescenční spektrometrie byla provedena na přístroji EX 6600 Xenometrix.



*Obrázek č.25: Grafické znázornění záznamu z RTG fluorescenční spektrometrie pro použitý slévárenský odpadní písek*

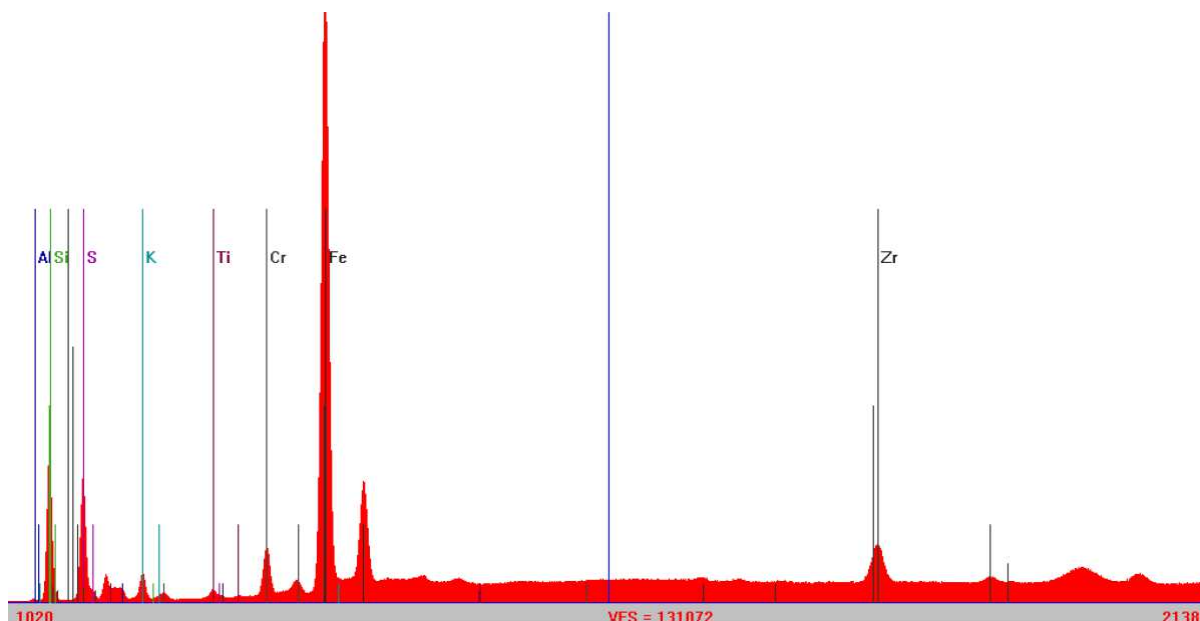
#### **Vyhodnocení:**

Z fluorescenční spektrometrie, která určuje prvkové složení vzorku (obrázek č.25) je patrné, že slévárenský odpadní písek obsahoval největší množství Fe, Al, Ca a K, dále jsou v menším množství zastoupeny prvky Si, S, Ti, Cr, Sr a Zr. Všechny prvky se pravděpodobně ve vzorku vyskytují ve formě oxidů.



#### 4.3.6 RTG fluorescenční spektrometrie slévárenského odprachu

RTG fluorescenční spektrometrie byla provedena na přístroji EX 6600 Xenometrix.



*Obrázek č.26: Grafické znázornění záznamu z RTG fluorescenční spektrometrie pro použité slévárenské odprachy*

#### Vyhodnocení:

Z grafického znázornění RTG fluorescenční spektrometrie (obrázek č.26) je patrné, že vzorek slévárenského odprachu obsahoval stejně jako slévárenský písek největší množství Fe, ale na rozdíl od předchozího vzorku lze vidět, že Si je zde zastoupen v mnohem menší míře a naopak množství S se vydatně zvýšilo. Dále se dá říci, že zbytek prvků, kromě Sr, je zastoupeno v podobné míře jako u slévárenského písku. Všechny prvky jsou opět obsaženy ve formě oxidů.

#### 4.4 Vliv přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi portlandského cementu

Následující kapitoly popisují experimenty prováděné na směsích s portlandským cementem, které obsahují různá množství slévárenských odpadních materiálů. Testovací směsi byly připraveny tak, aby obsahovaly vždy 50 %, 65 %, 70 % a 85 % těchto zkoumaných odpadních materiálů. Pro srovnání byly připraveny i směsi pouze s portlandským cementem bez dalších surovin a směsi s portlandským cementem a normovaným pískem v poměru 1:1. Množství vstupních surovin bylo voleno tak, aby

výsledná směs vážila 3000 g. K tomuto množství byla ještě přidávána voda pro zlepšení zpracovatelských vlastností.

#### 4.4.1 Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku na směsi na bázi portlandského cementu

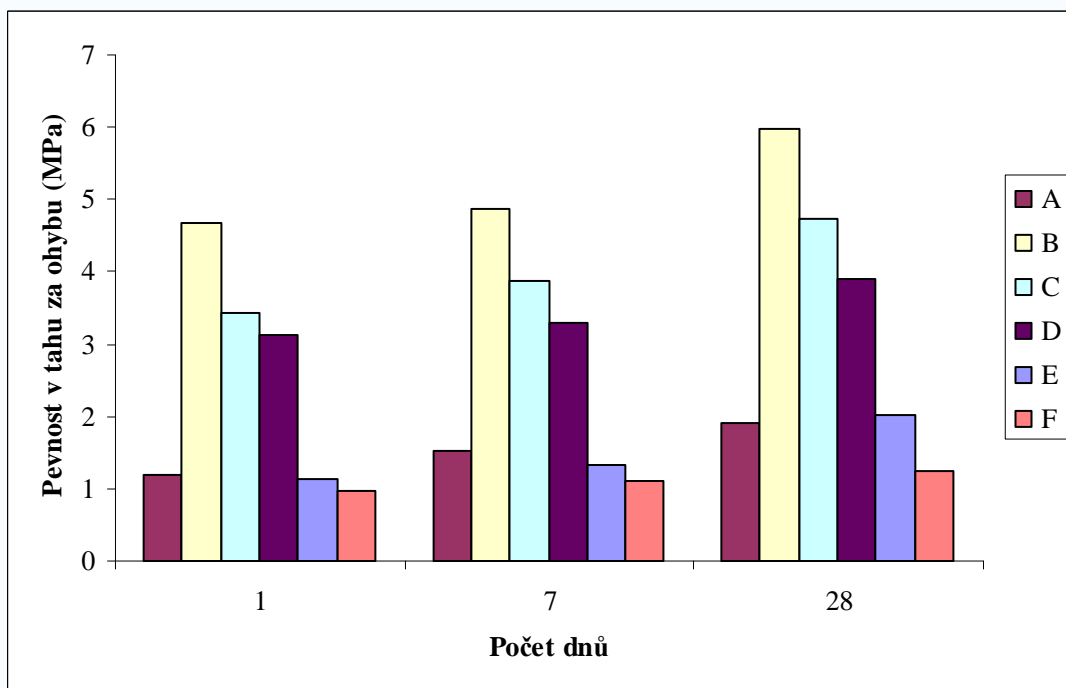
V této kapitole jsou popsány výsledné mechanické vlastnosti připravených anorganických kompozitů s obsahem portlandského cementu a slévárenského písku a jejich porovnání se směsí pouze s portlandským cementem bez dalších surovin a se směsí portlandského cementu a normovaného písku. V tabulkách č.5 a 6 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.27 a 28.

**Tabulka č.5:** Složení testovacích směsí obsahujících portlandský cement a slévárenský písek

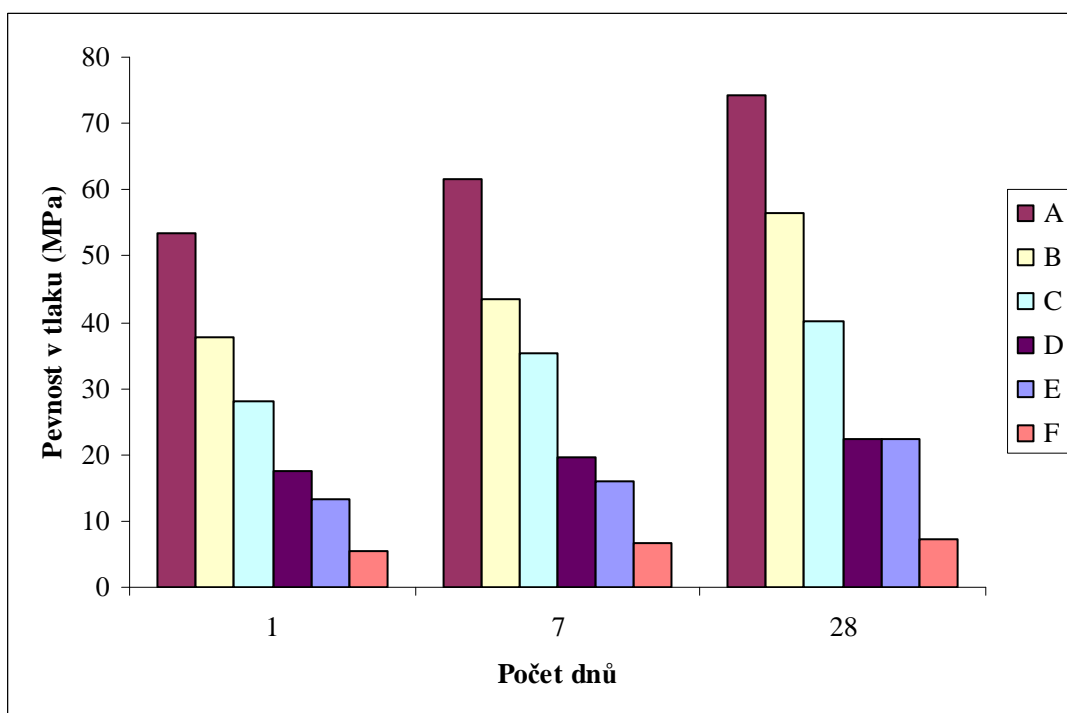
	Portlandský cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenský písek [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-	800
<b>B</b>	1500	1500	-	420
<b>C</b>	1500	-	1500 (50 hm. %)	600
<b>D</b>	1050	-	1950 (65 hm.%)	500
<b>E</b>	900	-	2100 (70 hm.%)	550
<b>F</b>	450	-	2550 (85 hm.%)	550

**Tabulka č.6:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících portlandský cement a slévárenský písek

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	1,18	53,35
<b>B</b>	1	4,67	37,65
<b>C</b>	1	3,44	28,01
<b>D</b>	1	3,12	17,64
<b>E</b>	1	1,14	13,29
<b>F</b>	1	0,97	5,53
<b>A</b>	7	1,52	61,65
<b>B</b>	7	4,86	43,35
<b>C</b>	7	3,87	35,23
<b>D</b>	7	3,28	19,76
<b>E</b>	7	1,32	15,87
<b>F</b>	7	1,11	6,69
<b>A</b>	28	1,91	74,35
<b>B</b>	28	5,97	56,35
<b>C</b>	28	4,73	40,01
<b>D</b>	28	3,9	22,29
<b>E</b>	28	2,03	22,22
<b>F</b>	28	1,24	7,37



**Obrázek č.27:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenského písku



**Obrázek č.28:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenského písku

## Vyhodnocení:

Z jednotlivých tabulek a grafů pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku lze pozorovat, že s rostoucím počtem dnů se jednotlivé pevnosti zvyšují. U pevnosti v tahu je vidět, že největších pevností ze směsí obsahujících slévárenský písek dosahovaly směsi C resp. D, kde byl přírůstek slévárenských písků 50 resp. 65 hm. %. Ve srovnání se směsí s normovaným pískem tyto směsi dosahovaly jen mírně nižších hodnot. Oproti tomu směsi se 70 a 85 hm. % obsahem slévárenského písku dosahovaly výrazně nižších hodnot, ne však zanedbatelných, jak je vidno na obrázku č.27.

Ohledně pevnosti v tlaku lze vidět, že výrazně nejvyšších hodnot dosahovala směs A, kde bylo použito pouze portlandského cementu. A naopak nejnižších hodnot dosahovala směs F, kde byla naměřena pevnost v tlaku jen 7, 37 MPa. Pevnosti v tlaku ostatních směsí se pohybovaly v rozmezí 13 – 56 MPa viz obrázek č.28.

### 4.4.2 Zkoumání vlivu přírůdku slévárenských odprachů na směsi na bázi portlandského cementu

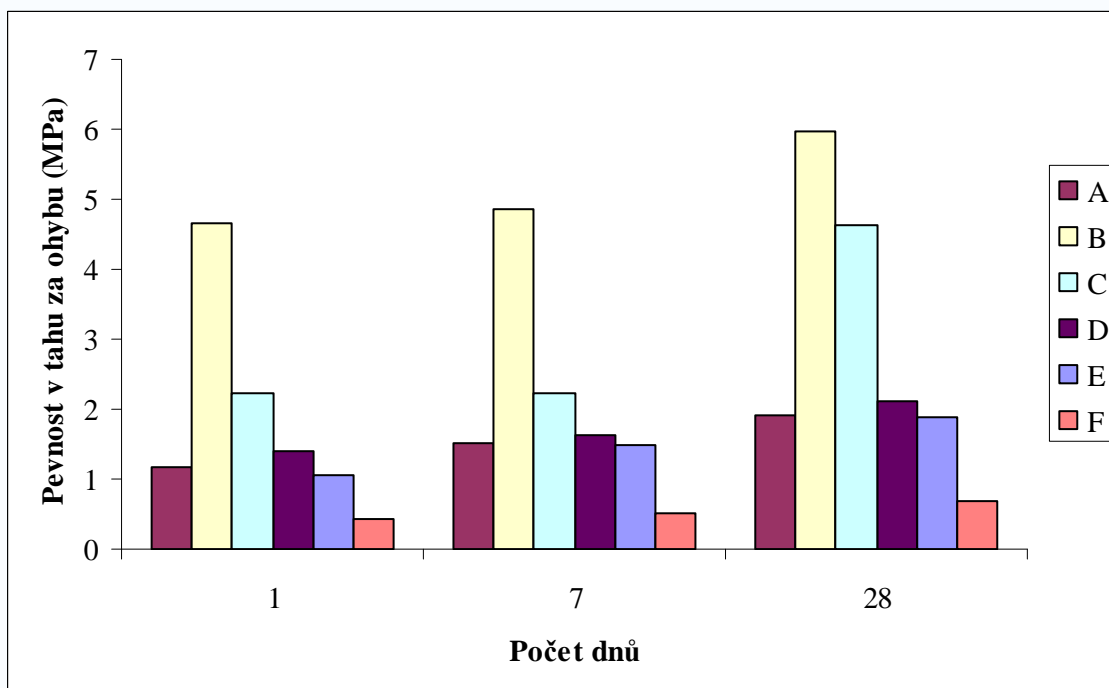
V této kapitole jsou popsány výsledné mechanické vlastnosti připravených anorganických kompozitů s obsahem portlandského cementu a slévárenských odprachů a jejich porovnání se směsí pouze s portlandským cementem bez dalších surovin a se směsí portlandského cementu a normovaného písku. V tabulkách č.7 a 8 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.29 a 30.

**Tabulka č.7:** Složení testovacích směsí obsahujících portlandský cement a slévárenské odprachy

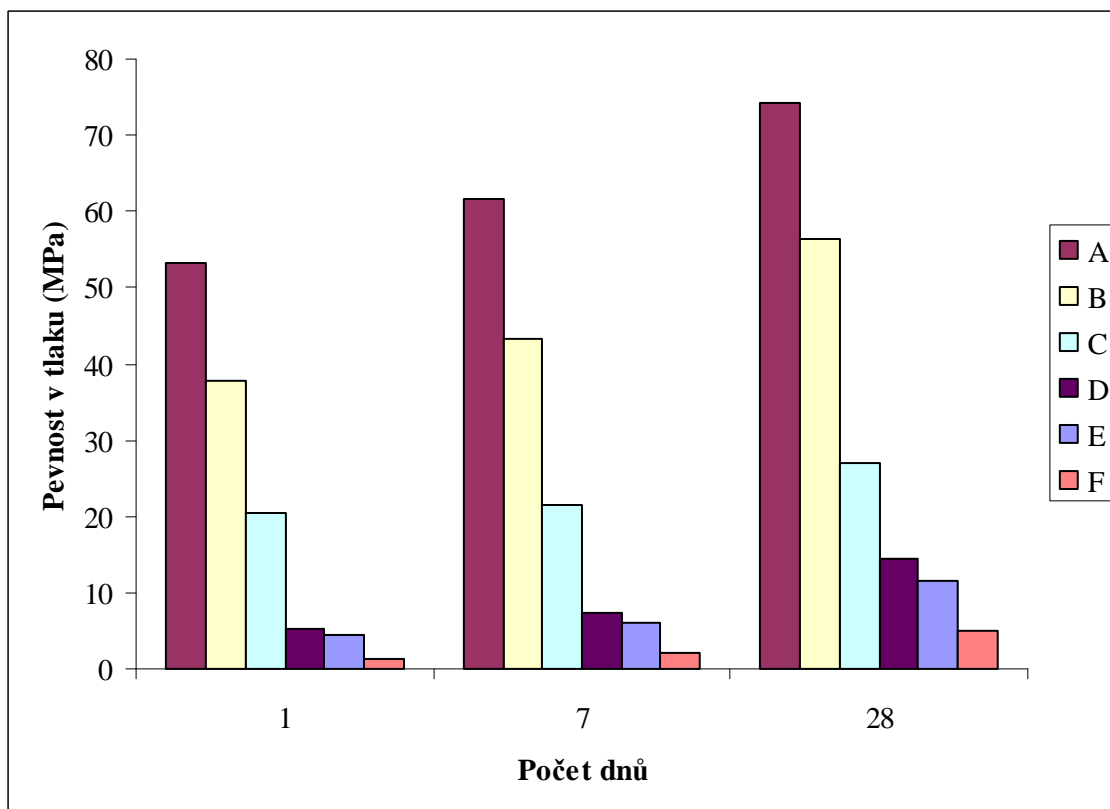
	Portlandský cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenské odprachy [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-	800
<b>B</b>	1500	1500	-	420
<b>C</b>	1500	-	1500 (50 hm. %)	650
<b>D</b>	1050	-	1950 (65 hm.%)	700
<b>E</b>	900	-	2100 (70 hm.%)	800
<b>F</b>	450	-	2550 (85 hm.%)	800

**Tabulka č.8:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících portlandský cement a slévárenské odprachy

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	1,18	53,35
<b>B</b>	1	4,67	37,65
<b>C</b>	1	2,23	20,49
<b>D</b>	1	1,4	5,21
<b>E</b>	1	1,07	4,48
<b>F</b>	1	0,44	1,42
<b>A</b>	7	1,52	61,65
<b>B</b>	7	4,86	43,35
<b>C</b>	7	2,24	21,55
<b>D</b>	7	1,63	7,25
<b>E</b>	7	1,48	5,91
<b>F</b>	7	0,51	2,13
<b>A</b>	28	1,91	74,35
<b>B</b>	28	5,97	56,35
<b>C</b>	28	4,64	26,96
<b>D</b>	28	2,12	14,37
<b>E</b>	28	1,9	11,59
<b>F</b>	28	0,69	4,88



**Obrázek č.29:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenských odprachů



**Obrázek č.30:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenských odprachů

### Vyhodnocení:

Z experimentu plyne, že se pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku s rostoucím počtem dnů opět zvyšovaly. Na obrázku č.29 lze vidět, že ve srovnání se směsí s normovaným pískem největších hodnot dosahovala směs C (50 hm. % slévárenského odprachu). Za zmínku stojí ještě směs D a E, kde se pevnosti v tahu za ohybu pohybovaly nad 1 MPa. Směs F s největším přídatkem slévárenského odprachu se po vyjmutí z formy drolila a dosahovala nejmenších hodnot, což je pravděpodobně způsobeno přílišným přídatkem slévárenského odprachu v poměru k cementu.

U pevnosti v tlaku se vyskytuje stejný trend jako u pevnosti v tahu za ohybu, z námi testovaných směsí s obsahem slévárenských odprachů dosahovala výrazně nejvyšších pevností směs C a to až 26,96 MPa, což je ovšem o 20 MPa méně než dosahovala srovnávací směs B. Ostatní směsi se pohybovaly v rozmezí 5- 15 MPa.

#### 4.4.3 Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi portlandského cementu

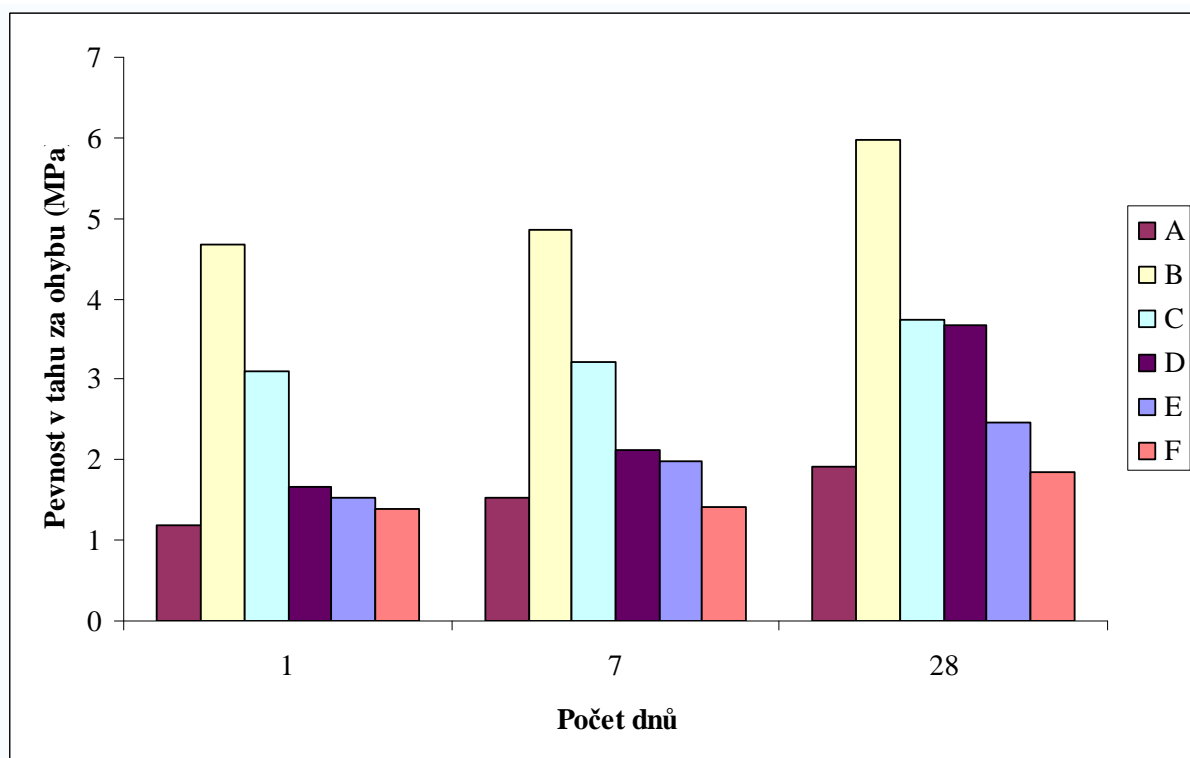
V kapitole 4.4.3 jsou popsány výsledné mechanické vlastnosti připravených anorganických kompozitů obsahujících portlandský cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy, a jejich porovnání se směsí pouze s portlandským cementem bez dalších surovin a se směsí portlandského cementu a normovaného písku. Poměr slévárenského písku a slévárenských odprachů byl zvolen 1:1. V tabulkách č.9 a 10 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.31 a 32.

**Tabulka č.9:** Složení testovacích směsí obsahujících portlandský cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy v poměru 1:1

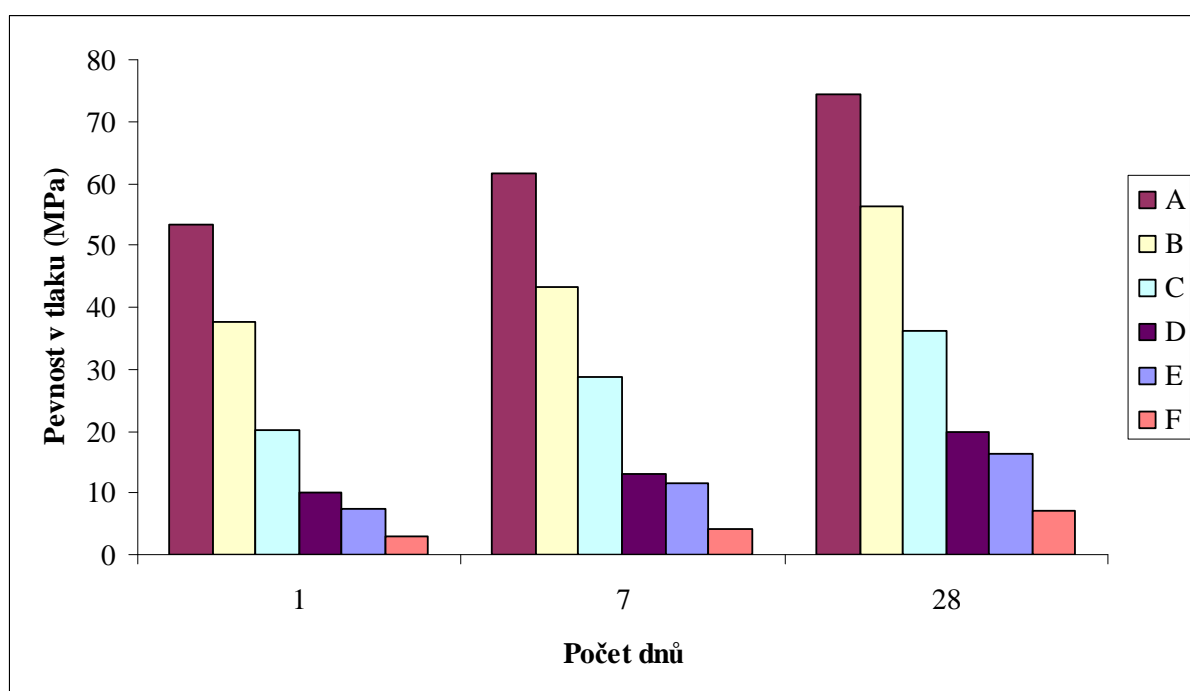
	Portlandský cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenský písek [g]	Slévárenské odprachy [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-	-	800
<b>B</b>	1500	1500	-	-	420
<b>C</b>	1500	-	750 (25 hm. %)	750 (25 hm. %)	750
<b>D</b>	1050	-	1975 (32,5 hm.%)	1975 (32,5 hm.%)	800
<b>E</b>	900	-	1050 (35 hm.%)	1050 (35 hm.%)	950
<b>F</b>	450	-	1275 (42,5 hm.%)	1275 (42,5 hm.%)	1000

**Tabulka č.10:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících portlandský cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy v poměru 1:1

	Počet dnů	$\sigma_{p0}$ (MPa)	$\sigma_{pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	1,18	53,35
<b>B</b>	1	4,67	37,65
<b>C</b>	1	3,1	20,24
<b>D</b>	1	1,66	10,02
<b>E</b>	1	1,53	7,45
<b>F</b>	1	1,4	2,91
<b>A</b>	7	1,52	61,65
<b>B</b>	7	4,86	43,35
<b>C</b>	7	3,22	28,64
<b>D</b>	7	2,12	12,97
<b>E</b>	7	1,98	11,57
<b>F</b>	7	1,41	4,11
<b>A</b>	28	1,91	74,35
<b>B</b>	28	5,97	56,35
<b>C</b>	28	3,73	36,28
<b>D</b>	28	3,66	19,98
<b>E</b>	28	2,47	16,24
<b>F</b>	28	1,85	7,15



**Obrázek č.31:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenského písku a slévárenských odprachů



**Obrázek č.32:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující portlandský cement a různé množství slévárenského písku a slévárenských odprachů



## Vyhodnocení:

U pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku jednotlivých směsí stále přetrvává trend, kdy s rostoucím počtem dnů jednotlivé pevnosti rostou a naopak se zvyšujícím se obsahem slévárenských odpadů jednotlivé pevnosti klesají. Jak lze vidět na obrázku č.31 a 32 ve srovnání se směsí s normovaným pískem opět dosahuje nejvyšších hodnot směs C a to 3,73 MPa v tahu za ohybu a 36,28 MPa v tlaku. Směs D po jednom dnu zrání vykazovala výrazně nižší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu než směs C, ale po 28 dnech zrání se tyto pevnosti téměř vyrovnaly. Pevnosti v tahu za ohybu zbylých směsí se pohybovaly v rozmezí 1,5 – 2,5 MPa a pevnosti v tlaku v rozmezí 7 - 17 MPa. Pevnosti směsí, které obsahovaly slévárenský písek i slévárenské odprachy jsou větší, než pevnosti směsí obsahující pouze slévárenské odprachy, a naopak menší než pevnosti směsí obsahující jenom slévárenský písek.

### 4.5 Vliv přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi hlinitanového cementu

Následující kapitoly popisují experimenty prováděné na směsích s hlinitanovým cementem, které obsahují různá množství slévárenských odpadních materiálů. Testovací směsi byly připraveny tak, aby obsahovaly vždy 50 %, 65 %, 70 % a 85 % těchto zkoumaných odpadních materiálů. Pro srovnání byly připraveny i směsi pouze s hlinitanovým cementem bez dalších surovin a směsí s hlinitanovým cementem a normovaným pískem v poměru 1:1. Množství vstupních surovin bylo voleno tak, aby výsledná směs vážila 3000 g. K tomuto množství byla ještě přidávána voda pro zlepšení zpracovatelských vlastností

#### 4.5.1 Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku na směsi na bázi hlinitanového cementu

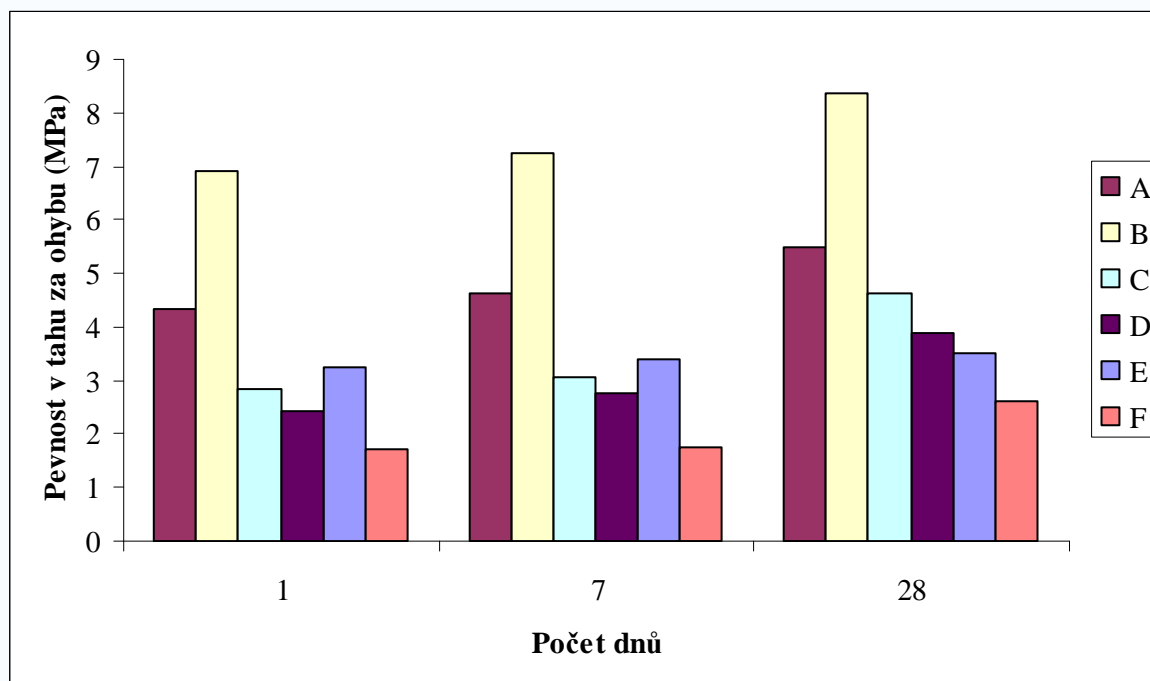
V této kapitole jsou popsány výsledné mechanické vlastnosti připravených anorganických kompozitů s obsahem hlinitanového cementu a slévárenského písku a jejich porovnání se směsí pouze s hlinitanovým cementem bez dalších surovin a se směsí hlinitanového cementu a normovaného písku. V tabulkách č.11 a 12 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.33 a 34.

**Tabulka č.11:** Složení testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement a slévárenský písek

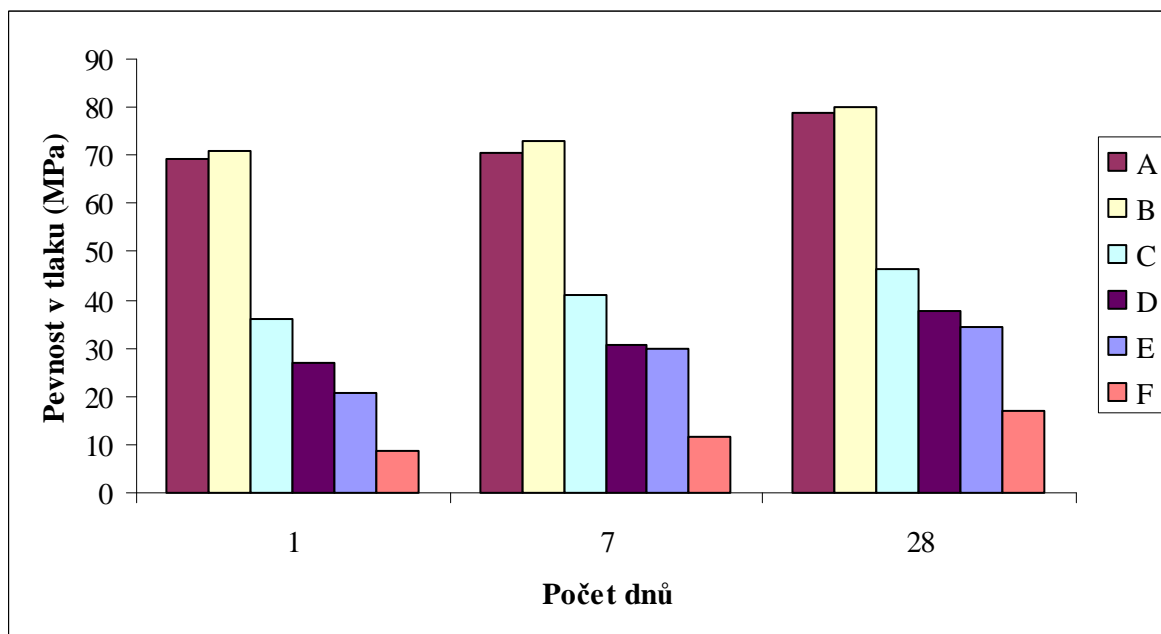
	Hlinitanový cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenský písek [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-	800
<b>B</b>	1500	1500	-	420
<b>C</b>	1500	-	1500 (50 hm. %)	600
<b>D</b>	1050	-	1950 (65 hm.%)	560
<b>E</b>	900	-	2100 (70 hm.%)	560
<b>F</b>	450	-	2550 (85 hm.%)	600

**Tabulka č.12:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement a slévárenský písek

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	4,32	69,18
<b>B</b>	1	6,91	70,87
<b>C</b>	1	2,85	36,19
<b>D</b>	1	2,42	26,94
<b>E</b>	1	3,24	20,86
<b>F</b>	1	1,7	8,75
<b>A</b>	7	4,63	70,33
<b>B</b>	7	7,24	72,83
<b>C</b>	7	3,06	41,17
<b>D</b>	7	2,76	30,56
<b>E</b>	7	3,41	29,91
<b>F</b>	7	1,74	11,73
<b>A</b>	28	5,5	78,77
<b>B</b>	28	8,37	79,91
<b>C</b>	28	4,64	46,36
<b>D</b>	28	3,87	37,73
<b>E</b>	28	3,52	34,61
<b>F</b>	28	2,62	17,09



**Obrázek č.33:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenského písku



**Obrázek č.34:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenského písku

#### Vyhodnocení:

Z naměřených výsledků a z grafů plyne, že s rostoucím počtem dnů se pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku zvyšovaly. Jak je patrné z obrázku č.33 u těchto směsí neplatí trend, že s vyšším obsahem slévárenského písku klesají pevností v tahu za ohybu, jelikož po 1 a 7 dnech zrání dosahovaly pevností směsí E vyšších hodnot než pevností směsí C a D. Pevností směsí E se však již příliš nezvyšovaly, oproti tomu pevností směsí C a D výrazně rostly a dosáhly hodnot 4,64 resp. 3,87 MPa.

Pro pevnosti v tlaku přetrvával trend z předchozích měření, tzn. že s rostoucím obsahem slévárenské složky klesaly pevnosti. Nejvyšších hodnot dosahovala ve srovnání se směsí s normovaným pískem směs C (46,36 MPa), nicméně je nutno říci, že i zbylé směsí dosahovaly velice obstojných hodnot, jak je patrné z obrázku č.34.

#### 4.5.2 Zkoumání vlivu přidavku slévárenských odprachů na směsi na bázi hlinitanového cementu

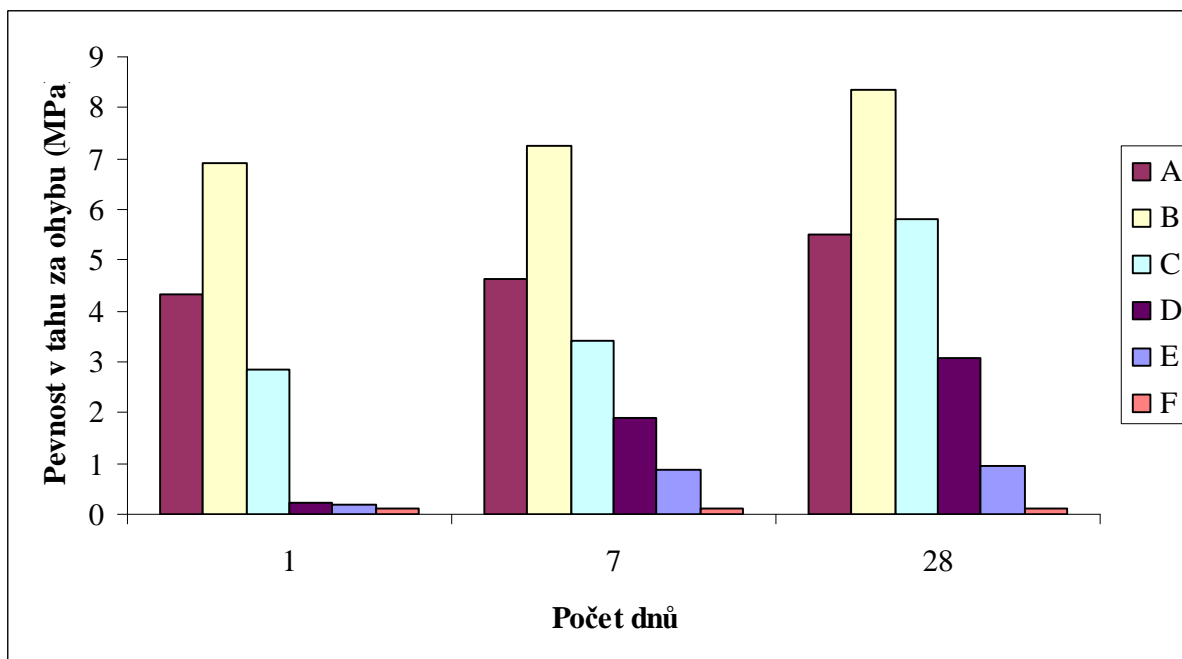
V kapitole 4.5.2 jsou popsány výsledné mechanické vlastnosti připravených anorganických kompozitů s obsahem hlinitanového cementu a slévárenských odprachů a jejich porovnání se směsí pouze s hlinitanovým cementem bez dalších surovin a se směsí hlinitanového cementu a normovaného písku. V tabulkách č.13 a 14 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.35 a 36.

**Tabulka č.13:** Složení testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement a slévárenské odprachy

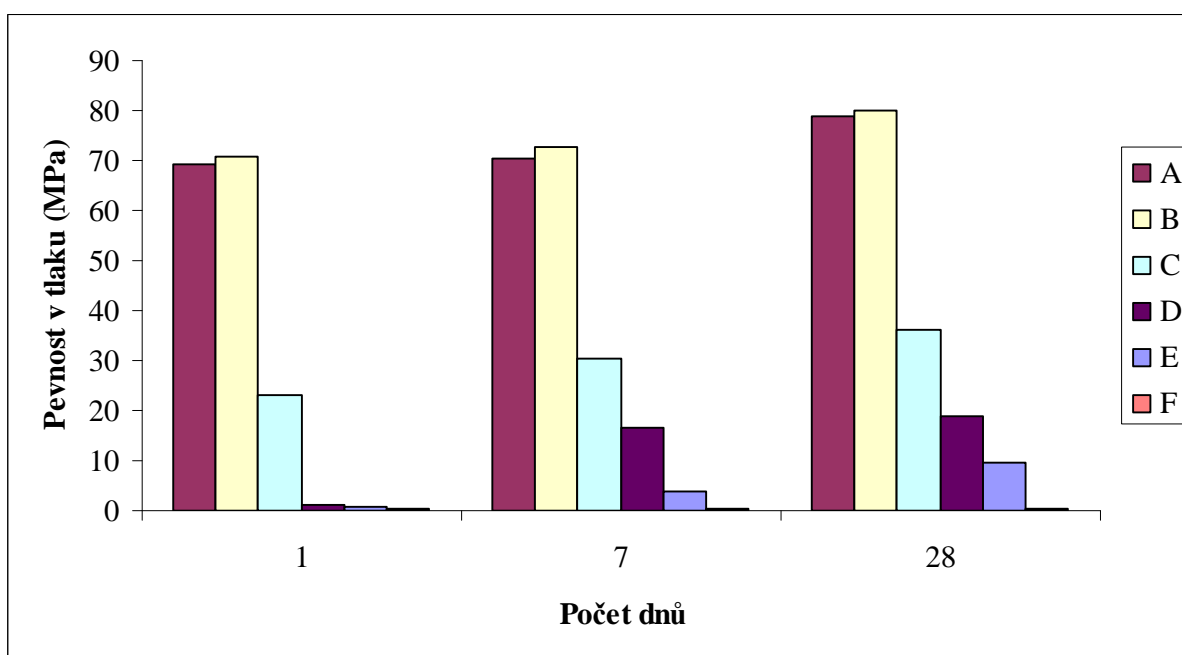
	Hlinitanový cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenské odprachy [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-	800
<b>B</b>	1500	1500	-	420
<b>C</b>	1500	-	1500 (50 hm. %)	800
<b>D</b>	1050	-	1950 (65 hm.%)	900
<b>E</b>	900	-	2100 (70 hm.%)	1000
<b>F</b>	450	-	2550 (85 hm.%)	1000

**Tabulka č.14:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement a slévárenské odprachy

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	4,32	69,18
<b>B</b>	1	6,91	70,87
<b>C</b>	1	2,84	23,04
<b>D</b>	1	0,21	1,01
<b>E</b>	1	0,18	0,81
<b>F</b>	1	0,11	0,26
<b>A</b>	7	4,63	70,33
<b>B</b>	7	7,24	72,83
<b>C</b>	7	3,4	30,39
<b>D</b>	7	1,89	16,39
<b>E</b>	7	0,89	3,74
<b>F</b>	7	0,12	0,39
<b>A</b>	28	5,5	78,77
<b>B</b>	28	8,37	79,91
<b>C</b>	28	5,8	36,01
<b>D</b>	28	3,07	18,69
<b>E</b>	28	0,96	9,68
<b>F</b>	28	0,13	0,42



**Obrázek č.35:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenských odprachů



**Obrázek č.36:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenských odprachů

### Vyhodnocení:

U tohoto experimentu přetrvávají oba výše zmíněné trendy, ale pevností jak v tahu za ohybu, tak i v tlaku u směsí E a F dosahovaly velice nízkých hodnot. Za zmínku stojí pouze směsi C a D, které dosáhly svého maxima po 28 dnech a to 5,8 resp. 3,07 MPa v tahu za ohybu a 36,01 resp. 18,06 MPa v tlaku. Zbylé směsi E a F byly dokonce i po 28 dnech zrání stále velice vlhké a drolivé. To mohlo být způsobeno tím, že příliš velký přírůstek odprachů zablokoval hydrataci a z toho důvodu vzorky neztuhly.

### 4.5.3 Zkoumání vlivu přídavku slévárenského písku a slévárenských odprachů na směsi na bázi hlinitanového cementu

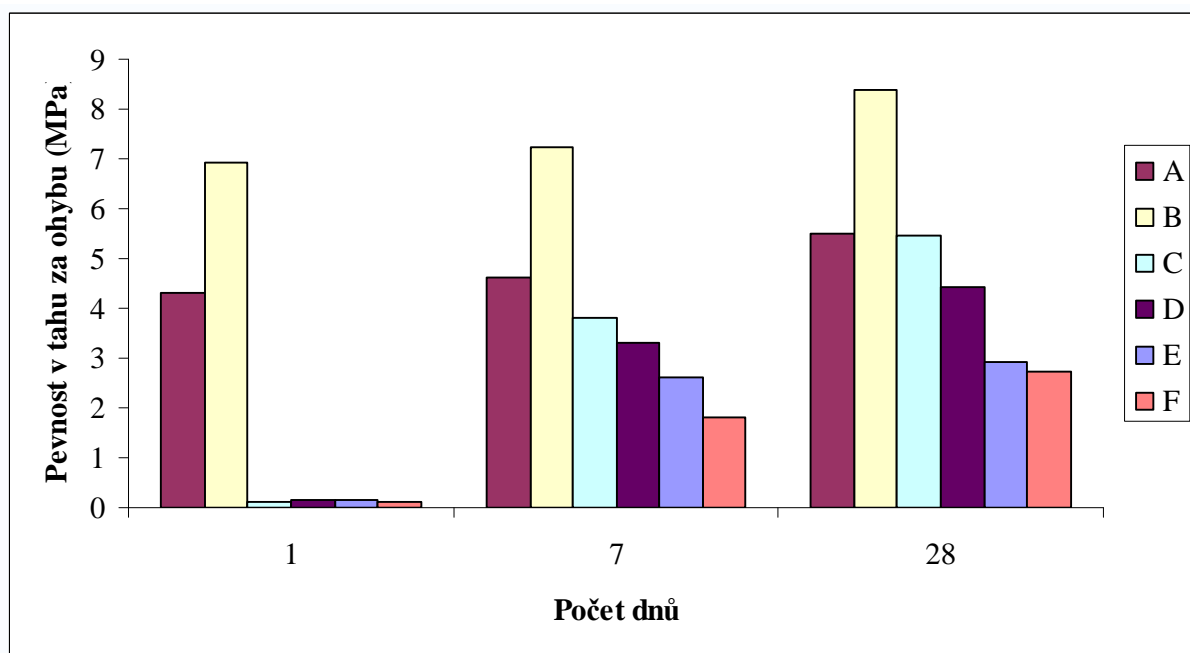
Kapitola 4.5.3 pojednává o výsledných mechanických vlastnostech připravených anorganických kompozitů obsahujících hlinitanový cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy, a jejich porovnání se směsí pouze s hlinitanovým cementem bez dalších surovin a se směsí hlinitanového cementu a normovaného písku. Poměr slévárenského písku a slévárenských odprachů byl zvolen 1:1. V tabulkách č.15 a 16 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.37 a 38.

**Tabulka č.15:** Složení testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy v poměru 1:1

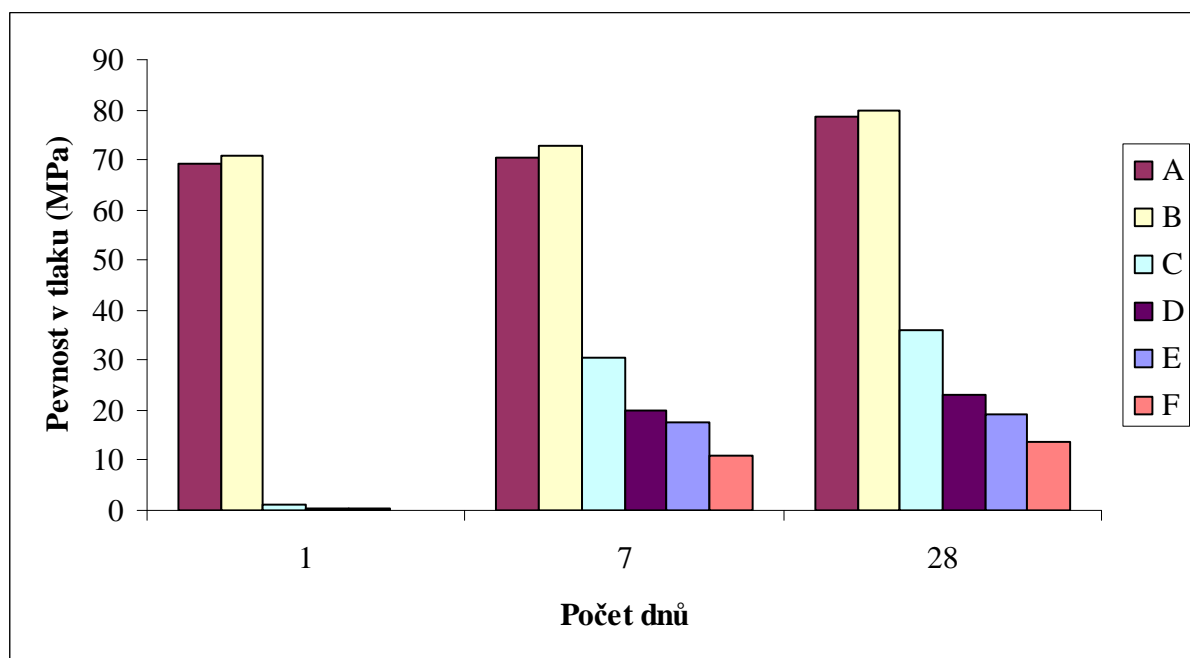
	Hlinitanový cement [g]	Normovaný písek [g]	Slévárenský písek [g]	Slévárenské odprachy [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	3000	-	-		800
<b>B</b>	1500	1500	-		420
<b>C</b>	1500	-	750 (25 hm. %)	750 (25 hm. %)	800
<b>D</b>	1050	-	1975 (32,5 hm.%)	1975 (32,5 hm.%)	900
<b>E</b>	900	-	1050 (35 hm.%)	1050 (35 hm.%)	1000
<b>F</b>	450	-	1275 (42,5 hm.%)	1275 (42,5 hm.%)	1000

**Tabulka č.16:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících hlinitanový cement, slévárenský písek a slévárenské odprachy v poměru 1:1

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	1	4,32	69,18
<b>B</b>	1	6,91	70,87
<b>C</b>	1	0,1	0,99
<b>D</b>	1	0,17	0,24
<b>E</b>	1	0,16	0,21
<b>F</b>	1	0,12	0,18
<b>A</b>	7	4,63	70,33
<b>B</b>	7	7,24	72,83
<b>C</b>	7	3,81	30,69
<b>D</b>	7	3,3	20,13
<b>E</b>	7	2,62	17,52
<b>F</b>	7	1,81	10,89
<b>A</b>	28	5,5	78,77
<b>B</b>	28	8,37	79,91
<b>C</b>	28	5,47	35,99
<b>D</b>	28	4,41	23,08
<b>E</b>	28	2,93	19,12
<b>F</b>	28	2,75	13,74



**Obrázek č.37:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenského písku a slévárenských odprachů



**Obrázek č.38:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující hlinitanový cement a různé množství slévárenského písku a slévárenských odprachů

### Vyhodnocení:

Z grafu č. 37 a 38 lze vidět, že po 1 dni zrání dosahovaly všechny směsi ve srovnání se směsí s normovaným pískem zanedbatelných hodnot pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. To mohlo být způsobeno tím, že po krátké době zrání byly testované směsi ještě velice vlhké a málo kompaktní. S rostoucím počtem dnů zrání se tyto hodnoty zvyšovaly vlivem

odpařování vody a následnému zatuhnutí směsí tak, že nejlepší směs C dosahovala pevnosti v tahu za ohybu 5,47 MPa a pevnosti v tlaku 35,99 MPa.

U těchto směsí s obsahem jak slévárenského písku, tak i slévárenského odprachu se vyskytuje stejný trend jako u směsí s portlandským cementem, jelikož jak lze vidět z naměřených výsledků, tyto směsi dosahují vyšších hodnot pevností, než směsi pouze se slévárenským odprachem a naopak nižších hodnot pevností, než směsi jen se slévárenským pískem. Hodnoty pevností zbylých směsí jsou uvedeny v tabulce č.16.

#### 4.6 Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku

Následující kapitoly se zabývají možností alkalické aktivace slévárenského odpadního písku a popisují experimenty prováděné na směších s obsahem tohoto písku, kde bylo jako alkalického aktivátoru použito sodného vodního skla, baucisu L160 složky B a hydroxidu sodného. Testovací směsi byly připraveny tak, aby obsahovaly vždy 10 hm. %, 15 hm. %, 20 hm. % a 25 hm. % alkalického aktivátoru. Množství slévárenského písku bylo pro každou sérii stejné a měnilo se pouze množství alkalického aktivátoru.

##### 4.6.1 Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku sodným vodním sklem

Tato kapitola studuje vliv množství vodního skla obsaženého ve slévárenském písku na mechanické vlastnosti směsi. Byly připraveny směsi odpadního slévárenského písku s různými koncentracemi sodného vodního skla a to 10 hm. %, 15 hm. %, 20 hm. % a 25 hm. %. V tabulkách č.17 a 18 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí jsou graficky znázorněny na obrázcích č.39 a 40.

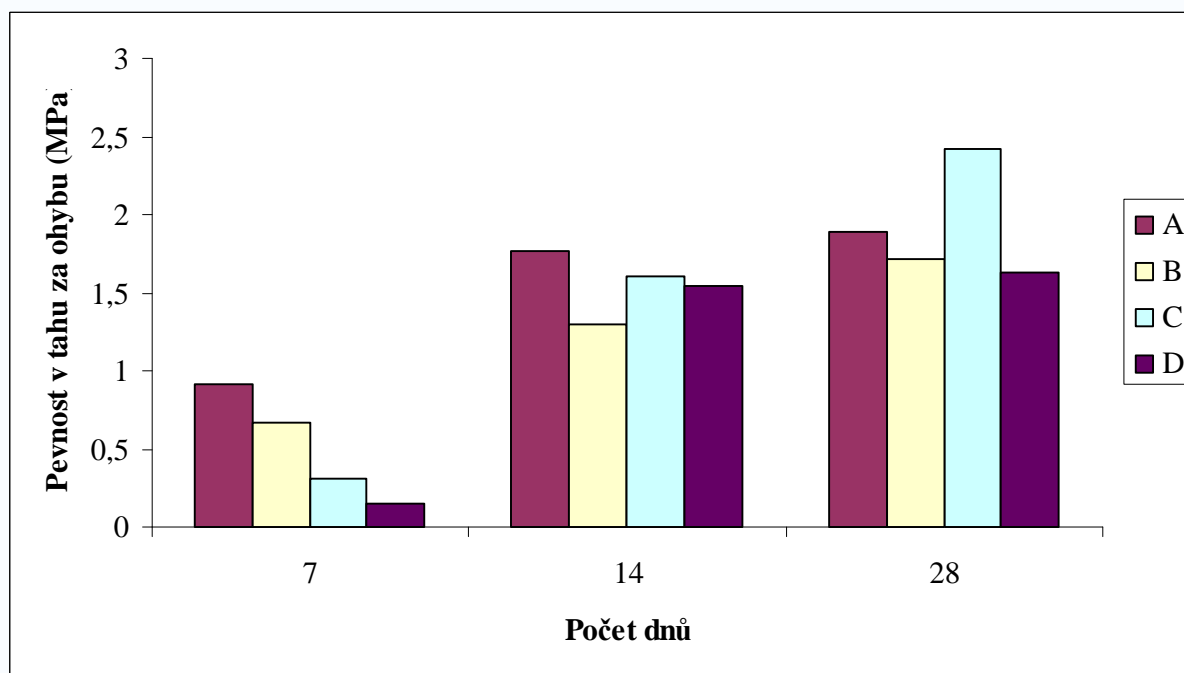
**Tabulka č.17:** Složení testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a sodné vodní sklo

	Slévárenský písek [g]	Vodní sklo (Na) [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	1300	130 (10 hm.%)	-
<b>B</b>	1300	195 (15 hm.%)	-
<b>C</b>	1300	260 (20 hm.%)	-
<b>D</b>	1300	325 (25 hm.%)	-

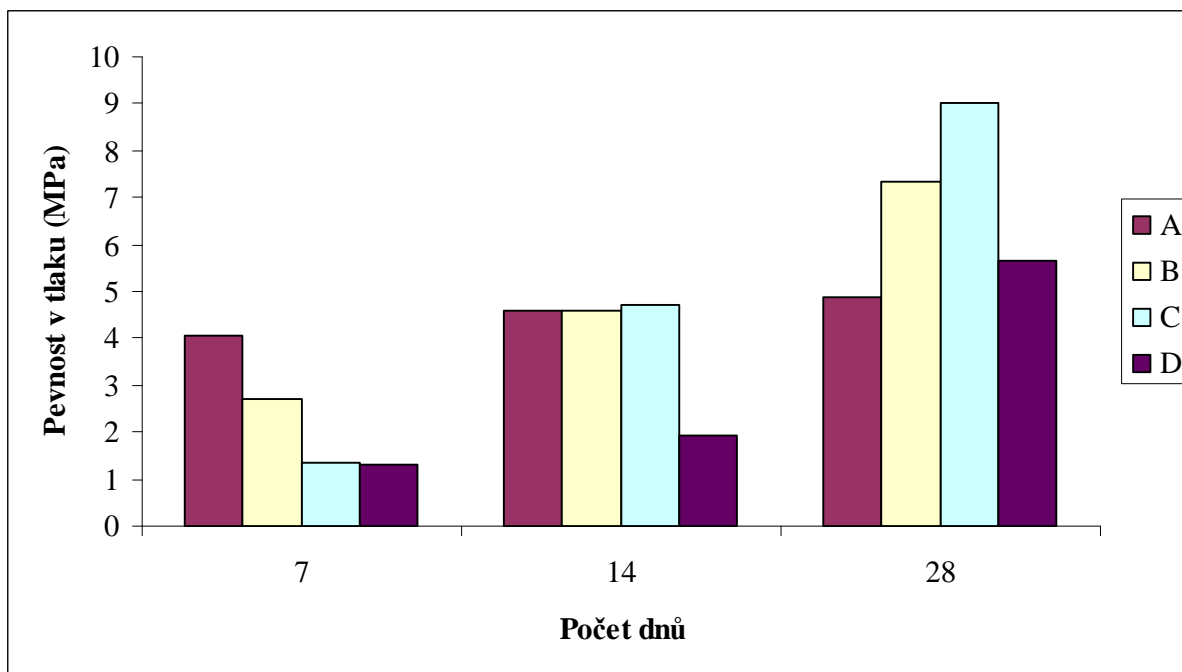


**Tabulka č.18:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a sodné vodní sklo

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	7	0,91	4,06
<b>B</b>	7	0,31	2,72
<b>C</b>	7	0,67	1,34
<b>D</b>	7	0,15	1,33
<b>A</b>	14	1,77	4,59
<b>B</b>	14	1,3	4,61
<b>C</b>	14	1,61	4,73
<b>D</b>	14	1,54	1,94
<b>A</b>	28	1,89	4,87
<b>B</b>	28	1,72	7,32
<b>C</b>	28	2,46	9,03
<b>D</b>	28	1,63	5,65



**Obrázek č.39:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující slévárenský písek a sodné vodní sklo



**Obrázek č.40:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující slévárenský písek a sodné vodní sklo

#### Vyhodnocení:

Z grafů a naměřených hodnot je patrné, že po prvním dni zrání dosahovala nejvyšších hodnot pevností jak v tahu za ohybu tak i v tlaku směs A, poté směs B a směs C. Po delším zrání se však začala dostávat do popředí směs C. To bylo způsobeno tím, že po krátké době zrání se směs C oproti směsím A a B jevila jako mnohem vlhčí a snadno se rozpadávala, jelikož pro její přípravu bylo použito větší množství aktivátoru. Po delší době zrání se však z této směsi uvolňovala voda a došlo k výraznému nárůstu pevností až na hodnotu 2,46 MPa v tahu za ohybu a 9,03 MPa v tlaku. Hodnoty zbylých směsí jsou uvedeny v tabulce č.18 a na obrázcích č.39 a 40.

#### 4.6.2 Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku baucisem L160 složkou B

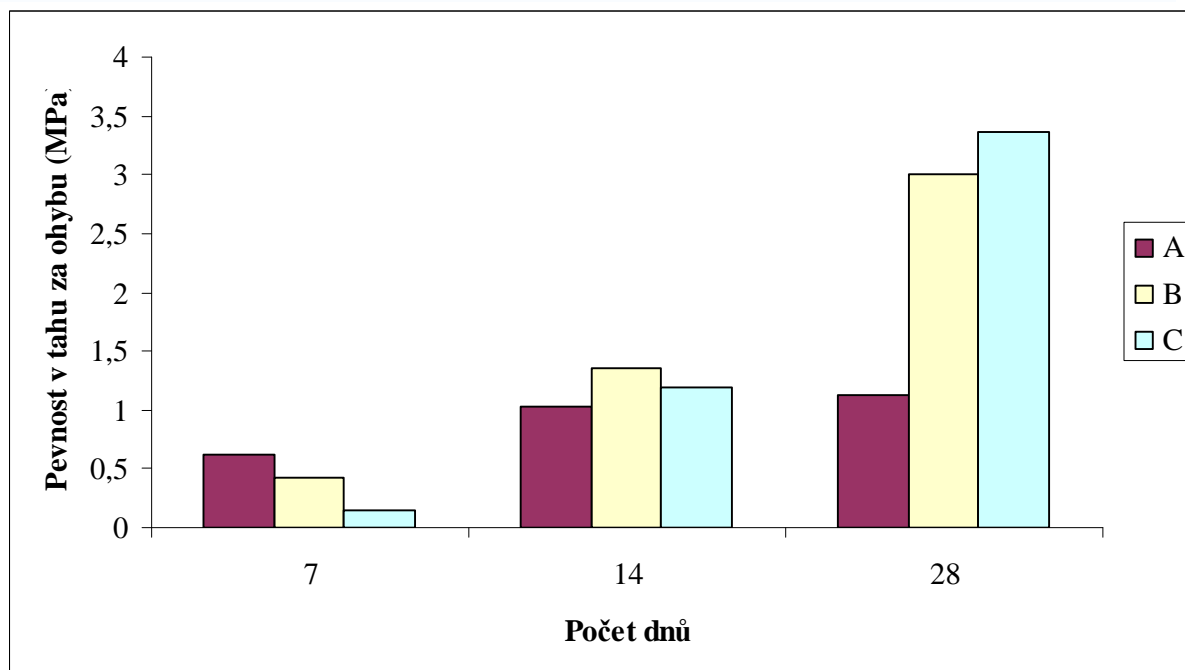
Tato kapitola studuje vliv množství baucisu L160 složky B obsaženého ve slévárenském písku na mechanické vlastnosti směsi. Byly připraveny směsi odpadního slévárenského písku s různými koncentracemi baucisu L160 složky B a to 10 hm. %, 15 hm. %, 20 hm. % a 25 hm. %. V tabulkách č.19 a 20 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevností v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.41 a 42.

**Tabulka č.19:** Složení testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a baucis L160 složku B

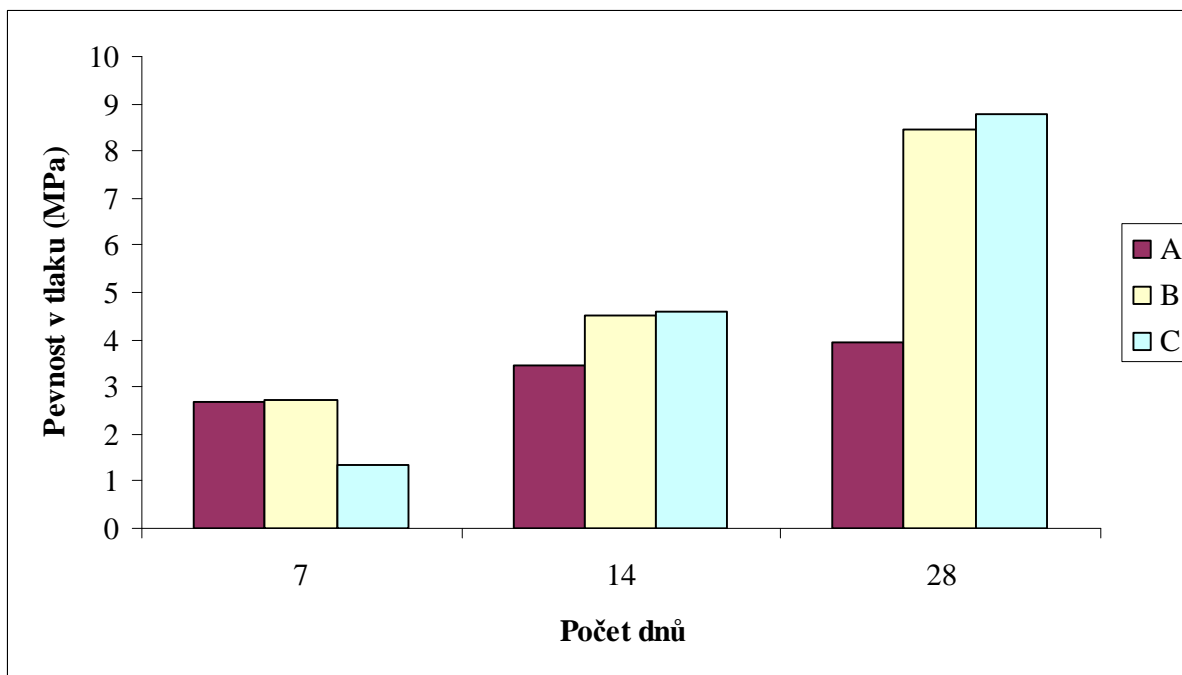
	Slévárenský písek [g]	Baucis L160 složka B [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	1300	130 (10 hm.%)	-
<b>B</b>	1300	195 (15 hm.%)	-
<b>C</b>	1300	260 (20 hm.%)	-
<b>D</b>	1300	325 (25 hm.%)	-

**Tabulka č.20:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a baucis L160 složku B

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	7	0,62	2,67
<b>B</b>	7	0,42	2,72
<b>C</b>	7	0,14	1,34
<b>D</b>	7	-	-
<b>A</b>	14	1,03	3,47
<b>B</b>	14	1,35	4,52
<b>C</b>	14	1,19	4,61
<b>D</b>	14	-	-
<b>A</b>	28	1,12	3,93
<b>B</b>	28	3,01	8,45
<b>C</b>	28	3,36	8,79
<b>D</b>	28	-	-



**Obrázek č.41:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující slévárenský písek a baucis L160 složku B



**Obrázek č.42:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující slévárenský písek a baucis L160 složku B

#### Vyhodnocení:

U směsí s baucisem lze vidět, že se zde vyskytuje stejný trend jako u směsí s vodním sklem. S rostoucí dobou zrání rostou i pevnosti jednotlivých směsí a opět po 28 dnech zrání dosahuje nejvyšších pevností směs C, i když se na začátku jevila jako nejhorší. U směsí D nebyly provedeny zkoušky pevností, jelikož tato směs byla při odformování na hranici soudržnosti z důvodu značného rozmočení použitým alkalickým aktivátorem. To mohlo být způsobeno tím, že baucis pravděpodobně obsahuje jen asi 8 % alkálií a větší množství vody ve srovnání se sodným vodním sklem. Pevnosti všech směsí jsou uvedeny v tabulce č.20 a na obrázcích č.41 a 42.

#### 4.6.3 Možnosti alkalické aktivace slévárenského odpadního písku hydroxidem sodným

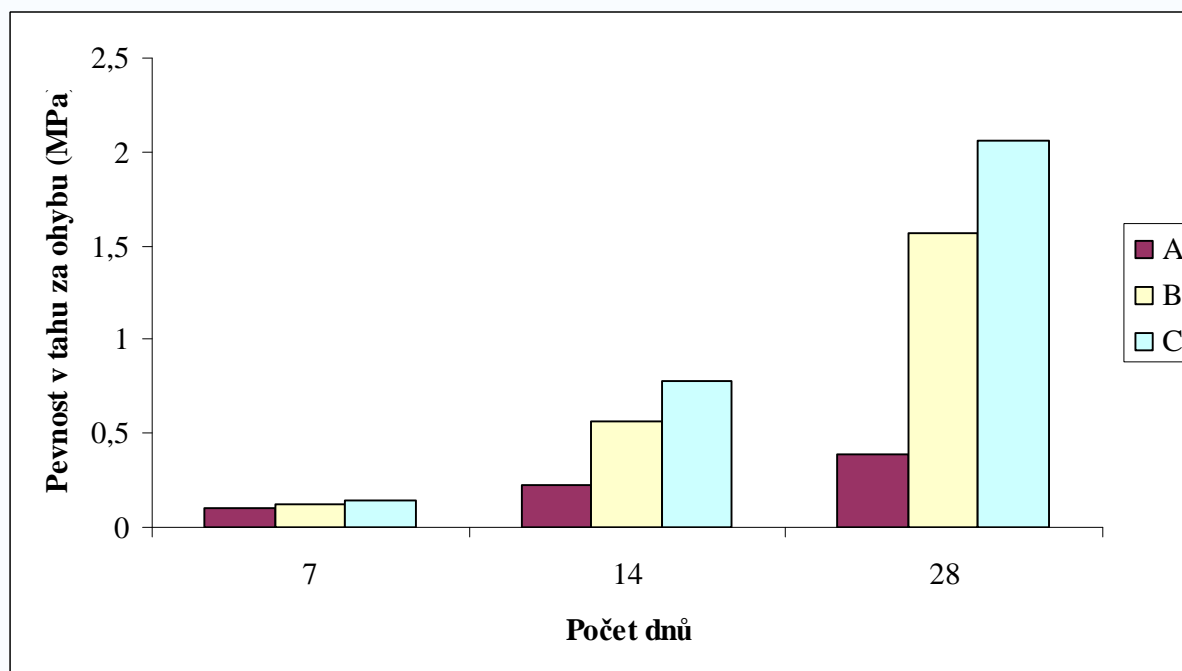
Tato kapitola studuje vliv množství hydroxidu sodného obsaženého ve slévárenském písku na mechanické vlastnosti směsí. Byly připraveny směsi odpadního slévárenského písku s různými koncentracemi hydroxidu sodného a to 10 hm. %, 15 hm. %, 20 hm. % a 25 hm. %. V tabulkách č.21 a 22 jsou kromě výsledných pevností (v tahu za ohybu a pevností v tlaku) připravených vzorků uvedena i jejich složení. Vývoj pevností testovaných směsí je graficky znázorněn na obrázcích č.43 a 44.

**Tabulka č.21:** Složení testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a hydroxid sodný

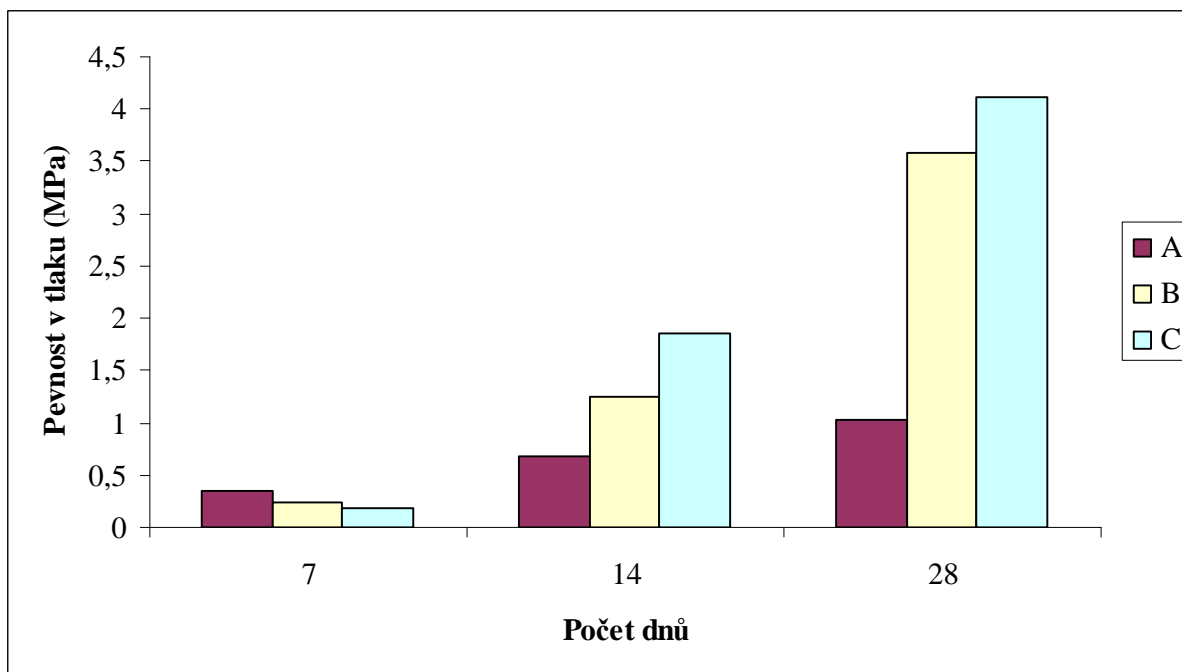
	Slévárenský písek [g]	Hydroxid sodný [g]	Voda [ml]
<b>A</b>	1400	140 (10 hm.%)	-
<b>B</b>	1400	210 (15 hm.%)	-
<b>C</b>	1400	280 (20 hm.%)	-
<b>D</b>	1400	350 (25 hm.%)	-

**Tabulka č.22:** Výsledné pevnosti testovacích směsí obsahujících slévárenský písek a hydroxid sodný

	Počet dnů	$\sigma_{Po}$ (MPa)	$\sigma_{Pd}$ (MPa)
<b>A</b>	7	0,1	0,35
<b>B</b>	7	0,12	0,24
<b>C</b>	7	0,14	0,18
<b>D</b>	7	-	-
<b>A</b>	14	0,23	0,68
<b>B</b>	14	0,56	1,24
<b>C</b>	14	0,78	1,86
<b>D</b>	14	-	-
<b>A</b>	28	0,39	1,02
<b>B</b>	28	1,57	3,59
<b>C</b>	28	2,06	4,12
<b>D</b>	28	-	-



**Obrázek č.43:** Vývoj pevností v tahu za ohybu pro směsi obsahující slévárenský písek a hydroxid sodný



**Obrázek č.44:** Vývoj pevností v tlaku pro směsi obsahující slévárenský písek a hydroxid sodný

#### Vyhodnocení:

Z experimentu je patrné, že všechny směsi byly i po 14 dnech zrání stále na hranici soudržnosti a vykazovaly velice nízké pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku. Stejně jako u předešlých směsí i u alkalické aktivace hydroxidem sodným dosahovala nejvyšších pevností směs C. Pevností veškerých směsí jsou uvedeny v tabulce č.22 a na obrázcích č. 43 a 44.

Z provedených zkoušek se tedy jeví, že jako nejlepší obsah alkalického aktivátoru vzhledem k množství slévárenského písku je obsah 20 hm. % u všech testovaných aktivátorů.

#### 4.7 Možnosti alkalické aktivace slévárenských odprachů sodným vodním sklem

V předešlé kapitole bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku bylo dosaženo použitím sodného vodního skla jako alkalického aktivátoru slévárenského písku. Z tohoto důvodu se tato kapitola zabývá možnostmi alkalické aktivace slévárenských odprachů právě tímto vodním sklem. Testovací směs byla připravena tak, aby obsahovala 10 hm. %, 15 hm. %, 20 hm. % a 25 hm. % sodného vodního skla. Množství slévárenských odprachů bylo vždy stejné a měnilo se pouze množství sodného vodního skla.

U takto připravených směsí byl studován vliv množství sodného vodního skla obsaženého v slévárenských odprašcích na mechanické vlastnosti směsí. V tabulce č.23 jsou uvedena složení testovacích směsí.

**Tabulka č.23:** Složení testovacích směsí obsahujících slévárenské odprachy a sodné vodní sklo

<b>Slévárenské odprachy [g]</b>	<b>Vodní sklo [g]</b>	<b>Voda [ml]</b>
1300	130 (10 hm.%)	200
1300	195 (15 hm.%)	200
1300	260 (20 hm.%)	200
1300	325 (25 hm.%)	200

### **Vyhodnocení:**

Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku nemohly být provedeny, jelikož veškeré připravené směsi se nedaly odformovat. Při vložení homogenizovaných surovin do forem směs jevila dobrou konzistenci, avšak po jednom dni zrání se stala velice sypkou a drolivou. Do budoucna by se možná dalo tomuto problému zamezit zvýšením koncentrace alkalického aktivátoru nebo přidáním většího množství vody. Toto však nebylo předmětem této práce, proto se tomu nevěnovala další pozornost.

## 5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat možnosti využití slévárenských odprachů jako druhotného materiálu pro nejrůznější aplikace zaměřené především na stavební průmysl. Pro komplexnost řešení byly testovány jak slévárenské odprachy tak slévárenské písky.

Po chemické analýze vstupních surovin byly namíchány směsi s portlandským cementem a daným slévárenským odpadem. Pro srovnání byla namíchána směs obsahující pouze portlandský cement a 50 hm. % normovaného písku. Z naměřených a vyhodnocených dat vychází, že největších pevností dosahovaly právě směsi tvořené portlandským cementem a normovaným pískem (5,97 MPa v tahu z ohybu a 56,35 MPa v tlaku po 28 dnech zrání). Těmito pevnostem se z námi studovaných směsí nejvíce přibližovaly ty, které obsahovaly portlandský cement a slévárenský písek, konkrétně potom směs C, která dosahovala 4,73 MPa v tahu za ohybu a 40,01 MPa v tlaku po 28 dnech zrání. Nižších pevností dosahovaly směsi s obsahem portlandského cementu, slévárenského písku a slévárenského odprachu v poměru 1:1, konkrétně směs C dosahovala 3,73 MPa v tahu za ohybu a 36,28 MPa v tlaku po 28 dnech. Nejnižších pevností dosahovaly směsi portlandského cementu a samotných slévárenských odprachů. Zde lze tvrdit, že tato kombinace není příliš vhodná.

Další experiment byl proveden stejně jako ten předešlý s tím, že portlandský cement byl nahrazen cementem hlinitanovým. Z naměřených hodnot vyplývá, že u pevností v tlaku přetrvával stejný trend jako u portlandského cementu, kde nejvyšších hodnot z námi testovaných odpadních materiálů dosahovaly směsi se slévárenským pískem a následně pevnosti klesaly podle trendu uvedeného výše. Na rozdíl od předešlého však nejvyšších pevností v tahu za ohybu dosahovaly směsi se slévárenským odprachem, což platilo pouze pro směsi C a D. S rostoucím obsahem odprachů pak tyto pevnosti prudce klesaly a vzorky se držely na hranici soudržnosti viz směsi E a F. To bylo pravděpodobně způsobeno skutečností, že bylo dosaženo optimálního vyztužení rozptýlenou kulovou výztuží ve vzorcích C a D. Pevnosti byly hodnoceny až po 28 dnech zrání při laboratorních podmínkách volně na vzduchu. V počátečních fázích zrání a to až do 14. dne byly vzorky většinou neodformovatelné.

Ze shrnutí těchto dvou experimentů lze konstatovat, že anorganické kompozity tvořené hlinitanovým cementem dosahovaly vyšších pevností, jak v tahu za ohybu tak i v tlaku, než ty na bázi portlandského cementu. Celkově lze však konstatovat, že všechny směsi až na výjimky (viz směsi s vyšším obsahem slévárenských odprachů) dosahovaly obstojných hodnot pevností v tahu za ohybu i pevností v tlaku pro některé aplikace (protihlukové zábrany, kabelové a svodové žlaby, atd.) Výhodou u těchto kompozitů se jeví skutečnost, že pevnosti můžeme regulovat snižováním či zvyšováním dávky především slévárenských odprachů.

Dále se práce zabývala možnostmi alkalické aktivace slévárenského písku, kde jako alkalického aktivátoru bylo použito sodného vodního skla, baucisu L160 složkou B a hydroxidu sodného.

U směsí alkalicky aktivovaných sodným vodním sklem byly po 7 dnech zrání pevnosti velice nízké, kdy dosahovaly maximálně 1 MPa v tahu za ohybu a 4 MPa v tlaku. Po delší době zrání však pevnosti dosahovaly vyšších hodnot, konkrétně pak nejvyšších hodnot po 28 dnech zrání dosahoval vzorek C ( 1,72 MPa v tahu za ohybu a 9,03 MPa v tlaku) s 20 hm. % přídatkem sodného vodního skla.



Pro směsi alkalicky aktivované baucisem L160 složkou B přetrvával stejný trend jako výše tzn., že po 7 dnech zrání byly pevnosti velice nízké, ale po delší době opět vzrostly a směs s 20 hm. % přídavkem aktivátoru vykazovala nejvyšší hodnoty ( 3,36 MPa v tahu za ohybu a 8,79 MPa v tlaku).

Hydroxid sodný se jako alkalický aktivátor slévárenského písku příliš neosvědčil, jelikož všechny směsi dosahovaly velice nízkých pevností.

Z provedených experimentů lze usuzovat, že jako nejlepší přídavek alkalického aktivátoru se jeví 20 hm. %. Směsi jsou ze začátku sice měkké a vykazují špatné mechanické vlastnosti, avšak po delší době zrání jejich pevnosti rostou. Jako nejvhodnější aktivátor lze použít sodné vodní sklo a baucis L160 složku B, který vykazoval dobré vlastnosti již při 15 % přídavku. Zde se nabízí otázka zda by se vývoj pevností nedal urychlit mírným zahřátím naformovaných tělísek na teploty 40 – 80 °C, což jistě stojí za další experiment. Výsledné produkty by po tepelné úpravě mohly být využívány jako materiály odolávající vysokým teplotám například vložky do komínů, kde by nebyla na závalu ani jejich černá barva.

Při alkalické aktivaci slévárenských odprachů sodným vodním sklem se však nepodařilo odformovat testované směsi z formy, jelikož se i přes počáteční dobrou konzistenci čerstvé směsi stále drolily. Alkalická aktivace samotných odprachů se ukázala jako neefektivní, proto se v tomto případě dá uvažovat pouze o použití odprachů v kombinaci s jiným materiálem jako je například slévárenský písek a podobně.

Celkově lze konstatovat, že slévárenské písky i odprachy je možné využít pro mnoho aplikací převážně ve stavebnictví. Jen je potřeba zvolit vhodné pojivo a poměr přidávaných druhotných surovin. Je pochopitelné, že každá aplikace by si vyžádala mnoho dalších testů, jako jsou například testy vyluhovatelnosti do okolí, v němž je výrobek z těchto materiálů aplikován.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VETIŠKA, Aleš. ALEŠ VETIŠKA A KOLEKTIV. *Teoretické základy slévárenské technologie* -. 2. uprav. vyd. Praha: SNTL, 1974, 370 s.
- [2] SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. STANISLAV SLOVÁK, Karel Rusín. *Teorie slévání*. vyd. 1. Praha: SNTL, 1990, 231 s. ISBN 80-03-00400-4
- [3] DVOŘÁK, Milan. MILAN DVOŘÁK A KOLEKTIV. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7 (Vysoké učení technické v Brně : brož.).
- [4] RUSÍN, K. Slévárenské formovací materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991. 392 s. ISBN 80-03-00278-8
- [5] RUSÍN, Karel a Jan ŽÁK. RUSÍN, Karel. *Slévání a spojování materiálu*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1980, 276 s.
- [6] BRABENEC, Rudolf a Václav KOUTECKÝ. RUDOLF BRABENEC, Václav Koutecký. *Příprava výroby ve slévárnách*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1955, 479 s.
- [7] HLAVÁČ, Jan. HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1988, 516 s
- [8] PACÁK, J. Stručné základy organické chemie. Praha: SNTL, 1978. ISBN 04-601-78
- [9] COLLEPARDI, Mario. MARIO COLLEPARDI. *The new concrete*. S.l.: Grafiche Tintoretto, 2006, 421 s. ISBN 88-901469-4-X..
- [10] NOVÁK, J. Nauka o materiálech 10 (Stavební materiály I).Praha: ČVUT, 1999. 1.vyd. 178 s. ISBN 8001016196
- [11] JIRÁSEK, Jakub; VAVRO, Martin. Nerostné suroviny a jejich využití [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2011-02-20]. Anorganická pojiva. Dostupné z WWW: <[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html)>. ISBN 978-80-248-1378-3
- [12] AÏTCIN, Pierre-Claude . Vysokohodnotný beton. červen 2005. Praha 4 ČKAIT: [s.n.], 2005. 320 s. ISBN 80-86769-39-9
- [13] PYTLÍK, P. Technologie betonu. 2nd ed. Brno: VUTIUM, 2000. P. 9–56. ISBN 80- 214-1647-5.

- 
- [14] KOTLÍK P.: *Stavební materiály historických objektů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 1999. Str. 15-40. ISBN 80-7080-347-9
- [15] DELLA M. Roy: Alkali-activated cements, Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, The Pennsylvania State University 1988, no. 29, pp. 249-254.
- [16] Pacheco-Togal, F., Castro-Gomas, J., Jalali, S.: Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, 2007, pp. 3-6
- [17] Opravil, T., Brandštetr, J., Havlica J., Frank, V. Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. In: *Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře*. Brno, 20. března 2008, s. 80-86, ISBN 978-80-214-3582-7
- [18] Talling B., Brandstetr J.: *Prezent state and Future of Alkali-Activated Slag Concretes, Trondheim Conference 1989*, pp. 1520-1545.
- [19] Palomo A., Grutzeck MW, Blanco MT: *Alkali Activated fly ashes*. A cement for the future. *Cem Coner Res* 1999, 29: 1323-9.
- [20] Antoš, P., Koutník, P. Alkalické aktivátory metakaolinu. In: *Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře*. Brno, 20. března 2008, 5-10 s, ISBN 978-80-214-3582-7.
- [21] *Geofond.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-04-28]. PÍSKY SLÉVÁRENSKÉ. Dostupné z WWW:<[http://www.geofond.cz/dokumenty/nersur\\_rocenky/rocanerudy99/html/sle\\_pisky.html](http://www.geofond.cz/dokumenty/nersur_rocenky/rocanerudy99/html/sle_pisky.html)>.
- [22] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. BOHUMIL KRATOCHVÍL, Václav Švorčík, Dalibor Vojtěch. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [23] BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. *RECYKLACE SLÉVÁRENSKÝCH ODPADŮ : regenerace formovacích směsí*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. 58
- [24] Fečko, P., Kušnierová, M., Lyčková, B., Čáblík, V., Farkašová, A., Popílký, Ostrava 2003, 23 s, ISBN 80-248-0327-5
- [25] Huřa J.: *Příprava a vlastnosti geopolymérů na bázi metakaolinu alkalickou aktivací*. Diplomová práce. Brno: VUT, FCH 2005
- [26] Bartoňová P. *Příprava lehkých kompozitů na bázi metakaolinu a energosádrovce*. Bakalářská práce. Brno: VUT, FCH 2007.
- [27] Rolf Breitenbücher, *Strasse + Autobahn*, č. 4/2006, str. 205 – 209

---

[28] SPIRATOS, N. [ET AL.]. *Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology, and practice*. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2003, 322 s. ISBN 0-9731507-1-8.

[29] BETON SYSTEM. *Technický list: Zkušební pracoviště DESTTEST 4310 COMPACT A*.

[30] Drašnar, J.; et al. Difrakce rentgenového záření na krystalech, 2002. Museum Mineral.cz. [http://www.museum.mineral.cz/mineraly/ucebnice/obecna\\_min/o\\_351.php](http://www.museum.mineral.cz/mineraly/ucebnice/obecna_min/o_351.php) (accessed April 29, 2011).

[31] BLÁHA, J., et al. Příručka pro práci v laboratořích technologie silikátů. Praha : VŠCHT Praha, 1987. 177 s

[32] SOMMER, Lumír, et al. *Základy analytické chemie II*. Brno: VUTIUM, 2000. 348 s.

[33] KLOUDA P.: *Moderní analytické metody*, druhé upravené doplněné vydání, Ostrava 2003, ISBN 80-86369-07-2, p. 84–89