

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

Možnosti využití průmyslového odpadu v injektážních  
maltách

Possibilities of utilization of industrial waste in a injection  
grout

Student:

Radek Papesch

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zita Lebedová

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Papesch**  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb  
Téma: **Možnosti využití průmyslového odpadu v injektážních maltách**  
**Possibilities of utilization of industrial waste in a injection grout**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popis složek malty a jejich vlastností se zaměřením na zadání práce
3. Experimentální část – ověření vlastností navržené receptury
4. Vyhodnocení experimentální části
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

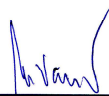
1. Normy ČSN EN
2. Český normalizační institut, Praha, 2006: Přísady do betonu, malty a injektáží malty
3. Český normalizační institut, Praha, 2007: Přísady do betonu, malty a injektáží malty – zkušební metody
4. Masopust, J.: Speciální zakládání staveb, I. díl VUT Brno, 2004
5. Turček, P. a kol.: Zakládání staveb, Jaga group s.r.o

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zita Lebedová**

Datum zadání: 30.10.2009

Datum odevzdání: 03.05.2010



Ing. Martin Vavro, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.  
děkanka fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 3. 5. 2010

.....

Podpis studenta

## Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

## **Anotace**

Jako téma mé bakalářské práce jsem si zvolil „Možnosti využití průmyslového odpadu v injektážních maltách“. V první části práce jsem se zabýval historií a současným stavem problematiky. V další části jsem se věnoval popisu složek malty, jejich vlastností a využitím při injektážích. Poté následuje experimentální část prováděná v laboratoři stavebních hmot se závěrečným vyhodnocením.

## **Annotation**

As a topic of my bachelor work I choose „Possibilities of utilization of industrial waste in a injection grout“. The first part of my bachelor work deals with history and the present state of problems. The next part of my bachelor work is devoted to description of grout compound, their properties and utilization at grouting. After that follows the experimental part perform in laboratory of building materials with final evaluation.

**Obsah bakalářské práce**

Seznam použitého značení .....	1
1 ÚVOD .....	2
1.1 Historie .....	2
1.2 Současný stav problematiky .....	5
2 POPIS SLOŽEK MALTY A JEJICH VLASTNOSTÍ .....	6
2.1 Cementový potěr.....	6
2.2 Popílek .....	6
2.2.1 Klasický (granulační) popílek .....	7
2.2.2 Fluidní popílek .....	8
2.3 Slévárenské odprašky .....	10
2.4 Voda.....	12
3 INJEKTÁŽE .....	13
3.1 Historie .....	13
3.2 Vrtné práce .....	14
3.3 Rozdělení injektáží .....	15
3.4 Důležité prvky ovlivňující injektážní proces.....	16
3.5 Hlavní hlediska, která mohou při injektážích způsobit závady .....	17
3.6 Hutnicí injektáž.....	18
3.7 Technologie pro injektáž a vodní tlakové zkoušky .....	19
3.8 Vhodná doporučení při provádění injektážních prací.....	20
3.9 Vyhodnocení vodních tlakových zkoušek horninového prostředí .....	21
3.10 Kontrola provedených injekčních prací a kontrolní měření .....	22
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	23
4.1 Popis vstupních složek.....	23
4.2 Složení jednotlivých receptur .....	24
4.3 Zhotovení čerstvé cementové směsi a následující zkoušky.....	25
4.3.1 Stanovení fyzikálních vlastností.....	26
4.3.2 Stanovení mechanických vlastností .....	28
5. VYHODNOCENÍ.....	32
5.1 Vyhodnocení čerstvé maltové směsi .....	32
5.2 Vyhodnocení zatvrdlé maltové směsi.....	33
5.3 Vyhodnocení experimentální části .....	38

---

6 ZÁVĚR .....	40
Seznam tabulek a grafů .....	41
Seznam obrázků .....	42
Seznam použité literatury .....	43
Seznam příloh.....	44

**Seznam použitého značení**

A	průřezová plocha	[mm <sup>2</sup> ]
F	maximální zatížení na zkoušené těleso	[N]
R <sub>c</sub>	pevnost v tlaku	[MPa]
R <sub>f</sub>	pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
V	variační koeficient	[%]
X	výběrový průměr	[MPa]
b	šířka zkoušeného tělesa	[mm]
d	výška zkoušeného tělesa	[mm]
d <sub>1</sub>	rozlití v jednom směru	[mm]
d <sub>2</sub>	rozlití ve směru kolmém na d <sub>1</sub>	[mm]
l	vzdálenost mezi osami válců	[mm]
s	směrodatná odchylka	[-]
s <sup>2</sup>	výběrový rozptyl	[-]
t	teplota	[°C]
ρ	objemová hmotnost čerstvé směsi	[kg*m <sup>-3</sup> ]
φ	vlhkost	[%]



# 1 ÚVOD

Jedním z cílů řešení této práce, je ověřit možné využití vedlejších energetických produktů po spalování fosilních paliv, konkrétně popílku či odprašků, jako doplňkového materiálu používajícího se ke zpevnění. Nejvýznamnější podíl na využívání těchto odpadů představují asanační činnosti v dolech, při rekultivacích, sanacích, dále využití v oblasti stavebnictví, např. při výrobě cementu, betonových směsí, suchých maltových směsí apod.

## 1.1 Historie

### Ve světě

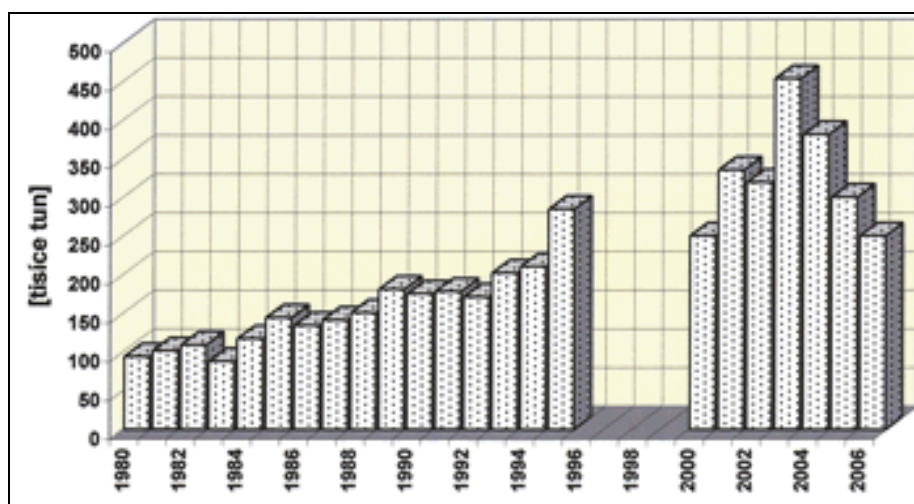
Výraz popílek byl poprvé využit při americkém zveřejnění výsledků výzkumného úkolu s použitím popílku Amerického betonářského institutu (ACI) v roce 1937. Podle dostupných údajů ACI se popílek poprvé využil jako přísada do pojiva při stavbě Hooverovy přehradě ve Spojených Státech v roce 1929. Rozsáhlejšího užití se popílku poprvé dostalo při stavbě přehradě Hladový kůň ve 120 000 tunové konstrukci ve státě Montana v roce 1949, kdy byl využit jako náhrada části cementu. Poté se popílek dál využíval jako přísada v konstrukcích přehrad ve Spojených Státech: Canon Ferry, Palisades, Yellowtail dams atd.[20].

Po celou dobu svého používání je popílek žhavým tématem výzkumných týmů po celém světě, které se zaměřovaly jak na prokázání výhod materiálu z hlediska ekonomického, tak i vyřešení ekologických problémů při jeho skladování.

### V České republice

Historie popílku v České republice je spjatá především s jeho využíváním v dolech, a to již více jak 50 let. Na počátku se popílek dopravoval do důlních prostor ve vozech, samotná plavicí směs pro uzavírku důlního díla byla míchána v dole a do prostoru stavěné hráze mezi filtrační peření čerpána plavicím (kalovým) čerpadlem. Tento druh dopravy popílku, zacházení s ním a samotná stavba hráze byly málo výkonnými a na směny náročnými operacemi, takže množství v řádu desítek tisíc tun využitých popelovin nebylo nijak významné.

Metodou plavení popílkové směsi, kterou se zavedla doprava potrubím z povrchu do důlních prostorů, se výrazně zvýšily objemy splavovaných popelovin, především díky využití tlakového spádu a technologických vlastností plavicí směsi, která je dobře dopravitelná i na větší vzdálenosti. Výstavba plavicích zařízení probíhala na povrchových lokalitách dolů. Ze začátku to byla velice jednoduchá zařízení, která se ale postupem času zdokonalovala. V devadesátých letech minulého století již byla postavena výkonná plavicí zařízení na většině dolů [12].



Obr. č. 1 – Využití popílku pro represi a prevenci do podzemních dolů Ostravsko-karvinského revíru v letech 1980 – 2006. Z let 1995 – 1999 se nedochovala spolehlivá data

Tím došlo k významnému rozšíření využití plavicí popílkové směsi v důlních prostorách. Popílek už se nevyužíval pouze při stavbě hrází, tj. při uzavírání důlních děl, ale rovněž ke stavbě žeborů při ochraně chodeb dobývaných porubů či k vyplňování volných prostorů k ochraně povrchu.

Vhodným se stal tento materiál také k proplavování závalových prostor dobývaných porubů v rámci prevence a případně represe záparu uhlí, které zůstalo nevyužito z technologických důvodů v závalu. Využívání splavených popelovin se tak stále zvyšovalo a od roku 1995 do současnosti bylo každým rokem dopravováno do důlních prostorů ostravsko-karvinských dolů 250 - 450 tisíc tun popílku.

Hospodaření s popílkem jako prostředkem protizáparové prevence patřilo až do doby zavedení dusíkového hospodářství na všech dolech OKD, a. s., k neúčinnějším metodám.

Od 60. let minulého století zajišťovala a regulovala využívání popílku pro jednotlivé doly hasičská Báňská záchranná služba Ostrava. Poté převzala tuto roli OKD-BVZ (Báňská vývojová základna) a poté společnost FITE, a. s. Ke konci roku 1994 vedení OKD rozhodlo založit specializovanou společnost OKD, FLOTEX, a. s., jejímž úkolem bylo zabezpečit nakládání s popelovinami obchodně, dispečersky a legislativně a měla především pokrýt nároky jednotlivých důlních společností na dodávky popelovin a obchodně zajistit i ekonomický přínos z této činnosti pro OKD. V téže době byla vedením Česko-Moravských Dolů, a. s., založena společnost EKO-KARBO, a. s., která tyto úkoly zajišťovala pro ČMD, tj. Důl ČSM a Kladenské doly.

Od roku 1995 se postupně zvyšovala spotřeba popelovin v dolech OKD, z počátečních přibližně 120 000 tun v roce 1995 na 200 000 tun v roce 1999. Od roku 2003 je zaznamenáno snížení množství splavených popílků do důlních prostor na současných cca 250 000 tun ročně. Příčinou je zvýšení koncentrace těžby, menší množství provozovaných porubů, a tím i uzavíraných důlních děl. Nižší proplavování závalových prostor v rámci protizáparové prevence je spjata také se zavedením metody inertizace dusíkem [23].



Obr. č. 2 – Silo na popílek



Obr. č. 3 – Zařízení pro míchání směsi



Obr. č. 4 – Plavení popílku

## 1.2 Současný stav problematiky

V České republice se výroba energií využívajících fosilních paliv (především hnědého uhlí) podílí nejvyšší měrou na celkové produkci. V teplárnách a elektrárnách se spaluje převážně tuzemské hnědé uhlí, těžené v podpovrchových a povrchových dolech v severozápadní a severovýchodní části ČR. Celková odbytová těžba tohoto uhlí se pohybuje v posledních čtyřech letech v hodnotě 60 000 tun. S tím je spojena vysoká produkce tuhých zbytků po spalování nebo doprovodných produktů z odsíření kouřových spalin. Vytváření skládek, na které se ukládaly průmyslové odpady vznikající různorodou činností průmyslu, byly běžnou skutečností. Na území České republiky se nachází několik takovýchto hald. Tyto odpady však mohou být dále využívány díky svým pozitivním vlastnostem. Popílek má dle svého obsahu více či méně výrazné pucolánové vlastnosti, které jej činí vhodným materiálem pro stavební účely. Přistoupením na variantu o využívání tohoto materiálu by se stalo řešením pro požadované omezování těžby přírodních zdrojů, např. kameniva a vápence [21].

Účelné a cílevědomé využívání produktů po spalování lze hodnotit za rozumné nejen z pohledu podnikatelského záměru provozovatele energetického zdroje, ale i z hlediska hospodářského. Vedlejší energetické produkty jsou sice začleňovány jako odpady, jejich následné druhové materiálové využití je však výhodné. Základní systémové a výhledové řešení využití vedlejších odpadních produktů zahrnuje především jejich velkoobjemové technologické zpracování nebo úprava, která je přímo zařazuje do průmyslové oblasti stavebnictví.

K jejich možnému využití jako zpevněných zásypových materiálů, je důležité ověřit jejich vlastnosti tak, aby splňovali veškeré legislativní požadavky.

## 2 POPIS SLOŽEK MALTY A JEJICH VLASTNOSTÍ

### 2.1 Cementový potěr

Jedná se o směs minerálního plniva o zrnitosti 0 – 0,7 mm, portlandského cementu a přísad zlepšující zpracovatelské a užité vlastnosti výrobku. Cement je nejpoužívanějším hydraulickým pojivem. Je to jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Svou pevnost a stálost zachovává po zatvrdnutí také ve vodě. Jeho výroba je založena na společném semletí slínku s přísadami.

### 2.2 Popílek

Jedná se o odpadní materiál vznikající při spalování těžného uhlí pro potřebu výroby energie v elektrárnách. Popílek se vyznačuje více či méně výraznými pucolánovými vlastnostmi, které z něj činí vhodný materiál pro stavební účely. Vlastnosti popílku závisí především na druhu spalovaného uhlí, zrnitosti a podmínkách spalování, stejně jako na chemickém a mineralogickém složení paliva. Po fyzikální stránce představuje popílek, barvy světle hnědé až tmavě šedé, velmi jemný prach o zrnitosti 1 až 400 mikronů, se sklovitou strukturou a ve většině případů s oblémi tvary zrn, což je výsledkem náhlého ochlazení při procesu spalování. Chemickým složením je popílek tvořen především oxidy křemíku, hliníku, vápníku, železa, hořčíku, síry a alkalických oxidů a také zbytky hořlavých materiálů.

Při podrobnějším popisu popílků je kladen důraz na dvě vlastnosti, které značně ovlivňují jeho použitelnost: obsah pucolánově aktivního  $\text{SiO}_2$  a  $\text{CaO}$  a zrnitost. Zjistilo se, že menší velikostí zrna u popílku (např. 25 mikronů) se pozitivně ovlivňuje jeho pucolánová vlastnost, proto jsou tyto jemné frakce upřednostňovány před frakcí hrubší. Dle pucolánové aktivity u popílku je stanovena jeho schopnost vytvářet za přítomnosti  $\text{CaO}$  zatvrdlou směs. Na pucolánovou aktivitu má přímý vliv také obsah křemíku a hliníku, zrnitost, ztráta žháním a obsah alkálií ( $\text{Na}_2\text{O}$ ).

aktivní příměsi - jsou to látky, které se svým složením aktivně podílejí na vývinu pevnosti cementového tmele. Můžeme je, dle způsobu působení, rozdělit na latentně hydraulické látky a hydraulicky aktivní (pucolánové) látky. U látek latentně hydraulických (látky anorganické), nedochází k samovolnému tuhnutí či tvrdnutí, jejich hydraulické vlastnosti ale mohou být nastartovány pomocí budičů. Podle charakteru budiče rozeznáváme typy alkalické (s pH větším než 7) a síranové (vzniká díky nim ettringit). Jedním z nejznámějších představitelů je vysokopecní struska. Látky hydraulicky aktivní (pucolánové) jsou rovněž anorganické látky, u nichž nedochází k samovolnému tuhnutí a tvrdnutí, nejsou ani latentně hydraulické, ale obsahují určité množství amorfního  $\text{SiO}_2$ , který je schopen reakce s  $\text{Ca(OH)}_2$ , přičemž vzniká C-S-H gel. Dle původu je rozdělujeme na přírodní (křemelina, tufy, trasy) a umělé (popílký, mletý cihlářský střep) [16].

Základní rozdělení popílků je určeno jeho chemickým složením či obsahem CaO.

### 2.2.1 Klasický (granulační) popílek

Jedná se o popílký vznikající „klasickým“ způsobem spalování paliva při teplotě přibližně 1400 až 1600 °C . Vyznačují se obsahem hlavně  $\beta$ -křemene a mullitu ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Zároveň obsahují sklovitou fázi v množství obvykle vyšším než 50 %, která se zásadním způsobem, při normální či zvýšené teplotě (autoklavování), podílí na reaktivitě popílků s CaO nebo cementem. Za hydrotermálních podmínek vstupuje do reakce ve velmi malé míře i mullit.

Hlavními požadovanými vlastnostmi jsou především nízké ztráty při sušení vzorku - pod 1 %, ztráta žíháním pod 4 %, obsah  $\text{SiO}_2$  alespoň 40 %, maximální obsah celkové síry 3 % a chloridů 0,1 %, zároveň dodržení limitních hodnot obsahu radioaktivních nuklidů < 150 Bq/kg či vodní výluhy bez přítomnosti toxických látek a těžkých kovů.

Na rozdíl od normálních teplot (30-40 °C), kdy se reakcí CaO či cementu s popílkem klasické technologie spalování účastní pouze ionty, které obsahuje jeho skelná fáze, při podmínkách hydrotermálních se účastní reakce s  $\text{Ca(OH)}_2$  zároveň i přítomný  $\beta$ -křemen a v menší míře také mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

Popílek jako takový není hydraulický, což znamená, že není schopen reakce s vodou. Mísí-li se však s hydroxidem vápenatým, obsaženým např. v cementu, reaguje a výsledkem jsou stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Vlastnosti této reakce jsou závislé na typu a druhu popílku a jsou označovány jako pucolanita. Popílků uložené delší dobu ve vlhkém prostředí mohou mít tento pucolánový účinek do jisté míry ovlivněn či porušen.

Dle normy ČSN EN 197-1 je možné vyrábět cementy s přísadou popílku (křemičitého nebo vápenatého). V České republice se vápenatý popílek v podstatě nevyskytuje. Křemičitý popílek je jemný prášek složený převážně z kulatých sklovitých částic s pucolánovými vlastnostmi, obsahující hlavně aktivní  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Z mineralogického hlediska má asi 90 % popílku amorfni podobu, 10 % je pak podoby krystalické. Chemické složení je u jednotlivých popílků značně odlišné, závisí hlavně na druhu a kvalitě uhlí a na podmínkách spalování.

Díky vhodnému chemickému a mineralogickému složení popílku a jeho jemnosti, se při výrobě cementu využívá vlastností jak pucolánových tak i latentně hydraulických. Nejvýhodněji se využívají popílků, jejichž jemnost se přibližuje jemnosti cementu [22].

### 2.2.2 Fluidní popílek

Některé typy elektráren nebo tepláren využívají technologii fluidního spalování za působení atmosférického tlaku. Rozemleté palivo s přísadou vápence popřípadě dolomitu se při teplotě  $860\text{ }^\circ\text{C}$  spaluje v cirkulující vrstvě. Během průběhu procesu rozpojování se z paliva uvolňovaný  $\text{SO}_2$  váže na  $\text{CaSO}_4$ . To je významné především z ekologického hlediska, protože v opačném případě by oxid siřičitý unikl do atmosféry, díky čemuž následně vznikají velmi škodlivé tzv. kyselé deště. Při těchto vylepšených provozech následkem přenosu kouřových plynů z prostoru ohniště nastává separace jednotlivých frakcí směsi, jemné částice ve formě úletu jsou spalinami odnášeny a hrubší podíly ve spalovacím prostoru zůstávají. Úlety tuhých látek jsou z kouřových plynů odstraňovány klasickými technologickými postupy, využitím cyklónů anebo filtrů. Díky tomuto způsobu spalování proto produkuje zpravidla každá fluidní spalovací jednotka popílků dvojího druhu: popílek ložový (z prostoru ohniště) a popílek cyklónový nebo také filtrový (získaný z úletu).



Popílký ložové a cyklónové se výrazně odlišují jak ve fyzikálních vlastnostech (zrnitost, měrný povrch, sypaná hmotnost, hustota), tak ve složení chemickém a mineralogickém, přestože pocházejí ze stejného technologického procesu fluidního spalování a odsiřování. Podobně jako u klasického popílku se i u obou druhů popílků fluidních negativně projevují kolísavé vlastnosti, především chemického složení a měrné hmotnosti či ostatních parametrů, které jsou způsobeny nestabilním procesem spalování a proměnlivými vlastnostmi vstupních složek (uhlí a odsiřovací činidla).

Výslednou činností je tedy směs popela skládajícího se z původního paliva, odsiřovacího nezreagovaného činidla ( $\text{CaO}$  se zbytky  $\text{CaCO}_3$ ), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s  $\text{CaO}$  a nespáleného paliva. Při fluidních procesech jsou teploty spalování nižší než při spalování klasickém, díky čemuž je nezreagovaný oxid vápenatý přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna, které je reaktivní. Fluidní popílký jsou též specifické nižším obsahem taveniny.

Pro využívání fluidního popílku jako možné přísady do cementu neexistují zatím normové předpisy. Fluidní popílký mají na rozdíl od popílků klasických vyšší obsah měkce páleného reaktivního vápna (10 až 30 %) a také docela vysoký obsah  $\text{SO}_3$  (6 až 15 %), díky němuž může v pojivu vzniknout ettringit. Oproti popílkům klasickým, kterých se užívá v cementářském průmyslu pro výrobu některých cementů, nejsou s fluidními popílký doposud v českém cementářském průmyslu výraznější zkušenosti a ani žádná z českých cementáren tento typ popílku zatím nijak významně nevyužívá [22].



Tabulka č. 1 – Charakteristické chemické složení popílků

	Popílek Tisová filtr	Popílek Tisová ložový	Popílek Hodonín filtr	Popílek Hodonín ložový	Popílek Opatovice
Složka	Obsah [% hmotnosti]	Obsah [% hmotnosti]	Obsah [% hmotnosti]	Obsah [% hmotnosti]	Obsah [% hmotnosti]
SiO <sub>2</sub>	35,0	72,6	32,5	43,2	51,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,3	10,0	16,0	19,5	27,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	1,5	6,7	3,3	5,15
FeO	0,3	0,6	0,4	1,1	1,60
TiO <sub>2</sub>	5,4	2,5	0,6	0,7	1,57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2
CaO	21,5	8,5	24,5	17,2	2,07
MgO	1,6	0,9	3,4	2,0	1,03
MnO	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
K <sub>2</sub> O	0,5	0,3	0,8	1,1	1,82
Na <sub>2</sub> O	0,1	/	< 0,1	< 0,1	0,26
C	1,8	1,4	1,3	1,2	0,44
S	2,5	1,5	4,0	3,2	0,095
Ztráta žháním	2,57	0,88	4,49	5,31	4,84

### 2.3 Slévárenské odprašky

Slévárenské odprašky jsou průmyslovým odpadem, vznikajícím v pecích při výrobě odlitků z šedé a tvárné litiny. Plyny z pecí obsahují tuhé částice, které jsou zachycovány, poté dochází ke kondenzaci a zachycení v elektrostatických odlučovačích. Jde o suchý a sypký materiál, jehož zrna mají kulovitý tvar a maximální velikost cca 0,1 mm. Zatříděním, dle katalogu odpadů se jedná o odpad nebezpečný. Cílem využití odprašků v maltách je zlepšení jejich určitých vlastností nebo k docílení vlastností speciálních [18].

Tabulka č. 2 – Charakteristické chemické složení slévárenských odprašků

Prvek	Průměrný obsah
Železo	51%
Mangan	5,29%
Zinek	4,96%
Olovo	6680%
Chrom	2590 mg/kg
Měď	1550 mg/kg
Nikl	297 mg/kg
Vanad	145 mg/kg
Antimon	77 mg/kg
Arsen	60 mg/kg
Kadmium	42 mg/kg
Kobalt	17 mg/kg
Rtuť	4,65 mg/kg
Selen	2,2 mg/kg
Thalium	< 2,0 mg/kg

U železitých odprašků byla pro rozlišení mineralogického složení provedena rentgenová difrakční analýza (RDA) s diferenciální termickou analýzou (DTA). V odprašcích nejsou obsaženy žádné organické látky jako ropné produkty nebo pojiva.

### Problém odprašků

Při hutnické výrobě železa vzniká celá řada odpadů. Nejvíce jich vzniká během provozů hutních podniků, zpracováním přírodních nebo druhotných surovin, např. na koksovňě, ve vysoké peci, ocelárně a slévárně. Společným znakem probíhajících vysokoteplotních procesů v hutích je vznik prachových úletů, tzv. odprašků, které jsou zachycovány v čistírnách plynu a skrápěním z nich vznikají kaly. V této formě dochází většinou ke skládkování těchto jemnozrnných hutních odprašků a kalů, obsahujících 35 až 70 % železa. Znovu využití těchto odpadů je komplikováno výskytem těžkých kovů, především zinku, olova a kadmia. Právě kvůli velkému měrnému povrchu jemných částic odprašků, je nejvyšší obsah těchto prvků zachycen právě v těchto jemných podílech [19].

Recyklaci těchto odpadů můžeme podrobit pouze jeho hrubé frakce, které lze aglomerovat. Při recyklaci jemných podílů odpadů ve formě odprašků, dochází ke zvýšení koncentrace nepotřebných prvků v produktech a patří proto v hutním provozu k nejproblematictějším odpadům, s čímž souvisí také problematické skládkování, které většinou nesplňuje dnešní požadavky na nakládání s nebezpečným odpadem.

## 2.4 Voda

Plní dvě základní funkce:

- hydratační (hydratací cementu vytváří tuhou strukturu cementového kamene)
- reologická (umožňuje vytvoření čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami)

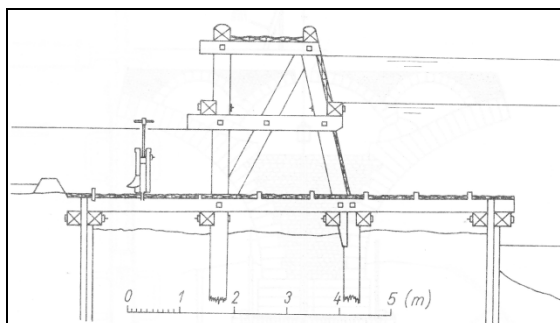
Technologicky se voda rozděluje na záměsovou (dávkuje se při mísení čerstvého betonu) a ošetřovací (dávkována po zatuhnutí).

Pro výrobu čerstvé maltové směsi je vhodná pitná voda z vodovodního řádu.

### 3 INJEKTÁŽE

#### 3.1 Historie

Provádění injektáží, tj. vhnění tekutých směsí do horninového prostředí, které po určité době zatvrdnou, je jednou z několika možných variant pro pozměňování vlastností daného prostředí, která je používána již několik desetiletí. První injekční práce spadají do počátku 19. století, kdy Francouz Bérigny přišel se svým vynálezem na řešení těsnění podloží jezu v Dieppe.



Obr. č. 5 – Podélný řez jezem v Dieppe. Vlevo od jezového tělesa je „nárazové“ injekční čerpadlo (Bérigny, 1832)

V tehdejší ČSFR se první injektážní práce prováděli při stavbě přehrady Janov, na 53 metrů vysoké betonové hrázi z let 1912-1914. Jednou z prvních velkých injektáží bylo v Evropě utěšňování horniny pod přehradou u Tambachu v Německu (příloha č. 1). V 60. letech byla vyvinuta metoda tryskové injektáže, která se u nás poprvé využila při utěsnění přehrady Josefův Důl v roce 1979 [3].

Postupy prováděných injektážních prací byly během své doby využívání všesměrně rozvinuty a v dnešní době je známa široká škála injektážních médií a technologií injektování. Průběh podávání injektážního média do horninového prostředí a jeho vnikání do úzkých puklin a pórů je velmi složitým procesem, který je předurčen místními geologickými podmínkami a požadovaným účinkem na kterém závisí také volba vhodných injektážních prostředků (nejvíce injektážím vyhovují zrna maximální velikosti 40  $\mu\text{m}$  – jemně mletý cement), tak aby byla zajištěna požadovaná změna vlastností injektovaného prostředí. Použitá směs by měla

splňovat nároky na jednoduchou zpracovatelnost, odolnost vůči rozrušování, cenovou přijatelnost a šetrnost vůči životnímu prostředí.

### 3.2 Vrtné práce

Jedná se o důležitou část při provádění injektážních prací. Při těchto činnostech je třeba splnit dané požadavky na:

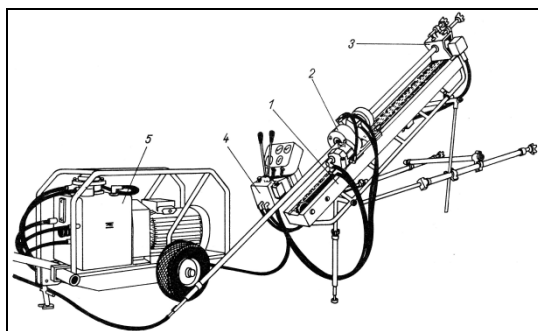
- vhodnou volbu nástroje a vrtné soupravy dle druhu horniny tak, aby práce mohly být provedeny v nejkratší možné době (příloha č. 2)
- provedení vrtu v daném směru a sklonu s minimálními odchylkami od projektu
- minimalizovat náklady na odvrtání

Při provádění vrtů do skalních hornin nesmí dojít k znečištění směsi vrtným kalem. Proto se volí takový způsob, při kterém vzniká minimální množství kalu. Díky tomuto požadavku volíme rotační jádrové vrtání, při kterém se využívá tzv. jádrovák, což je komplet jádrovnice a příslušenství na konci opatřený vhodným typem korunky – roubíkové, diamantové, speciální (příloha č. 3).

Při vrtání v nesoudržných zeminách se využívá těchto technologií:

- rotační technologie s jílocementovým či jílovým výplachem
- rotační technologie dvojí vrtnou kolonou se současným pažením vrtu
- rotačně příklepná technologie se současným pažením vrtu
- zarážení pažnic

Při provádění těchto vrtných prací se využívají rotační vrtné soustavy pro jádrové vrtání a vrtání na plnou čelbu a vibrační beranidla (příloha č. 4). Typickým příkladem moderní soupravy pro provádění injekčních vrtů je např. souprava Diamec 250 [3].



Obr. č. 6 – Vrtná souprava Diamec 250

1 – posuvný rám, 2 – vrtná hlava, 3 – hydraulické svěry, 4 – řídicí panel, 5 – hnací agregát

### 3.3 Rozdělení injektáží

Účinně provedená injektáž se vyznačuje částečným, nejlépe však úplným vyplněním všech dutin, trhlin či pórů vhaněnou směsí. Tímto procesem dochází ke zvýšení pevnosti, únosnosti a nepropustnosti injektovaného prostředí.

Hlavním cílem *zpevňovací injektáže* je vyplnění dutin a trhlin hmotou, která dokáže vzájemně spojit jednotlivé části daného prostředí. Zabránění pronikání kapalných a plyných složek prostředím díky vyplněným dutinám a pórům je základem injektáží *těsnících*. Tento efekt je však pouze jedním z mnoha projevů injektování, mezi které dále patří například skutečnost, že injektážní hmota je do prostředí dodávána v tekuté formě, určité rychlosti a tlaku, čímž vzniká v injektované oblasti napětí, které se šíří do okolního prostředí či následná přeměna do pevné fáze, což je složitý fyzikálně - chemický proces [15].

Při *hutnicí injektáži* je dané horninové prostředí, které proinjektovanou zónu obklopuje, hutněno. Nedochozí k nahrazování ztráty objemu či vyplňování volných dutin v horninovém prostředí. Tento účel se používá při injektážích *kompenzačních*, kdy dochází k vytvoření umělého, převážně injektážní hmotou tvořeného tělesa tvaru čočky nebo plomby, které jsou rovněž doprovázeny objemovými změnami [15].

Dle způsobu plnění můžeme injektáže rozdělit na tlakové a beztlakové. Tlakové injektáže provádíme za pomoci injektážních čerpadel (příloha č. 5) u horizontálních vrtů a beztlakovou injektáž samospádem či použitím elektrického čerpadla volíme pro vrty se sklonem 30 až 45 stupňů.

Dle místa provádění se mohou injektáže rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřním injektováním rozumíme vyplnění nežádoucí nesouvislosti uvnitř daného prvku (trhlina, betonová konstrukce apod.). Vnější injektování znamená uložení směsi vně konstrukce či v okolní základové zemině.

### 3.4 Důležité prvky ovlivňující injektážní proces

Podle složení vrstev či množství puklin v hornině se zvolí vhodný směr a délka injekčních vrtů, případně tloušťka obálky injektované horniny (např. kolem výrubu, sloje). Volí se ideální vzdálenost injekčních vrtů, množství injekčních stupňů a velikosti tlaků v kombinaci s vhodně zvolenou injekční směsí.

Rychlost šíření směsi v hornině je určena zejména povahou a velikostí injektovaných dutin, na druhu možné výplně a stupni zvodnění. Velikostí použitého tlaku, kterým se daná směs vhání do prostředí, se musí překonat veškeré odpory a ztráty vzniklé třením. Pro cementové suspenze platí, že rychlost proudění je přímo úměrná použitému injekčnímu tlaku a propustnosti horninového prostředí. Při vhánění injektážní směsi je na částice horniny vyvíjen injektážní (pórový) tlak a díky proudění daného média také tlak hydrodynamický. Příčinou je vznik objemového rozpínání. Tento projev je ukončen po úplném zatvrdnutí hmoty, čímž se stav napětí v daném prostředí trvale uzavře. Příčinou objemového rozpínání je fakt, že projevy injektáže nezasahují pouze do oblasti, ve které byla přítomna injektážní hmota, ale částečně také mimo ni [14].

Přetlak v hornině, který je charakterizován pórovým tlakem se zvyšuje s klesající propustností horniny, zvyšující se přilnavostí injekční hmoty, rostoucí stagnační konstantou a specifickým množstvím injekční směsi.

S rostoucí proinjektovanou směsí roste také velikost oblasti, kde pro danou injekční hmotu platí Darcyho filtrační zákon.

Injekční tlak by se měl během provádění injektáží vhodně přizpůsobovat aktuální situaci daného prostředí, v potaz se také musí vzít součinitel propustnosti horniny, stagnační konstanta a specifické množství injekční hmoty. Akční rádius roste se zvětšujícím se

injekčním tlakem, se zvyšující se tekutostí směsi a s rostoucí dobou injektování. Při vysoké hodnotě vodního součinitele řídne cementový kámen, protože tuhne v přebytku vody. Se zmenšující se velikostí zrn injekční směsi klesá sedimentace směsi a tím se zvyšuje dosah injektáže při shodné propustnosti.

Pro zatvrdnutí injektované směsi je nutná doba, která se odvíjí od vlastností použité směsi a vlastnostmi horninového prostředí, především teploty a velikostí zvodnění. Při výskytu podzemní vody se musí ověřit chemické složení, tak aby směs v dutinách či puklinách dokázala ztuhnout. Rychlost proudící vody musí být taková, aby nedocházelo k odplavování cementových zrn do velkých vzdáleností [14].

### 3.5 Hlavní hlediska, která mohou při injektážích způsobit závady

- Při vrtání se může projevit *deformace injektované horninové oblasti*. Většinou dochází k sedání nebo po provedené tlakové injektáži ke zdvihání povrchu terénu v nadložních částech podzemních objektů, což může mít negativní důsledky, kdy zvýšenými tlaky dochází k dalšímu rozrušování a rozevírání puklin, nakypřování nadložní vrstvy, čímž se mění zvodnění daného prostředí. Zvyšujícím se tlakem může rovněž dojít u hornin s menší pevností k roztrhnutí
- Možné *zabránění přirozeného pohybu podzemní vody*, díky čemuž může být ohrožena funkce studní
- U hornin sedimentárních s vrstevnatou texturou může vlivem vyššího injekčního tlaku nastat tzv. *klakáž*, což znamená násilné roztržení, a *úniku vhněné hmoty mimo injektážní oblast*. Vhodné určení klakážního tlaku vychází z hloubky prováděné injektáže (vliv geostatického tlaku způsobeného hmotností nadložních hornin), fyzikálně mechanických vlastností hornin, viskozitě injekční směsi či propustností horninového prostředí)
- Při použití např. urychlovacích přísad nebo plyných emulzí v injekčních směsích může být *podzemní voda kontaminována výluhem z těchto směsí*
- Může dojít k *sedání nebo naklonění objektů na povrchu*, které jsou podepřeny zpevněnou horninou, vlivem dotvarování proinjektovaného tělesa, tzv. Creepovými jevy



- Použité cementové směsi nemusí splňovat dlouhodobé požadavky na *odolnost vůči agresivnímu prostředí*
- Pokud je injekční tlak vyšší než původní tlak geostatický, může u *skalních hornin* dle jejich pevnosti v tahu docházet k *trhání*
- Při unikání vhaněné směsi může být zpochybněna vhodnost použité injektáže, může dojít k *vyplnění inženýrských sítí, sklepů a studen* a tím ke ztrátě jejich funkčnosti
- Nevhodné zbytky média, složené z cementu a vody, mohou v klidném prostředí *sedimentovat*, čímž vznikají oblasti *zabraňující následnému pronikání vhaněné směsi*
- V okolí trysky se vlivem značné filtrační rychlosti injekční směsi *porušuje struktura hornin*. V takovéto narušené oblasti se mohou vytvářet trhliny, které se mohou dále rozšiřovat vlivem následného vtlačování injekční směsi [14]

### 3.6 Hutnicí injektáž

Hutnicí injektáž je možné použít pro zeminy, které jsou ohroženy ztekucením nebo zhroucením, pro krasové horniny, nesoudržné šterkovité a písčité zeminy či pro objekty antropogenního původu. Této technologii se využívá, je-li zajištěno, že při hutnění nenastanou negativní objemové změny, pokud dané prostředí není ohroženo seizmickými účinky a pokud je možné hutnění opakovat. Pokud mechanické principy (hutnění vibrační) nespĺňují požadované cíle a injektovací zařízení je možné nasadit, pak je možné použít metodu hutnicí injektáže.

Směsi, které se nejvíce hodí pro hutnicí injektáž, jsou tzv. *Binghamovy kapaliny* (příloha č. 6), vyznačující se zvýšenou viskozitou a dostatečnou propustností horninovým prostředím. Mají omezený dosah, čímž je zabráněno širokému rozšíření a nedochází tak k nekontrolovaným únikům injektážní hmoty. Větším třením mezi částicemi injekční hmoty a horninovým prostředím se zvyšuje vliv tlaku a proudění média, které vytvářejí tzv. *expanzní efekt*. K použití se nejvíce hodí hmoty skládající se ze směsi jemného písku, cementu (případně popílků) a vody. Pokud chceme dosáhnout modifikace některých vlastností čerstvé nebo zatvrdlé směsi, je možné použít vhodných přísad (plastifikátorů). Zkouška konzistence musí prokázat maximální sednutí hustoměrného kužele 7,5 cm, pokud by tato podmínka nebyla splněna, nedojde k požadovanému *expanznímu efektu* (v dnešní době už tato norma není

platná, používá se norma nová č. 1015-4, ve které se k sednutí používá hustoměrný váleček, pokud by se využilo staré normy je třeba výsledné sednutí přepočíst na normu novou) [15].

Správnou hutnicí injektáží nastává několik vzájemně provázaných změn:

- injektážní oblast je materiálově změněna, horninové nesoudržné a málo stabilní prostředí je zpevněno a stává se soudržným
- zhutněny jsou rovněž okolní neproinjektované oblasti horninového prostředí
- dochází ke změně stavu působícího napětí (u neproinjektovaného prostředí je zvýšeno napětí mezi jednotlivými částicemi, což má za následek zvýšení smykové pevnosti hmoty, injektovaná oblast má smykovou pevnost ovlivněnou zejména soudržností)

Souhrnem můžeme konstatovat, že prostředí upravené pomocí hutnicí injektáže zvyšuje svou tuhost a stabilitní schopnost, což jsou efekty, pro které je tato injektáž nejčastěji uplatňována. Ostatní efekty jsou sice známy, nicméně kvůli nedostatečnému stupni jejich poznání je jejich praktické využití méně obvyklé.

### **3.7 Technologie pro injektáž a vodní tlakové zkoušky**

Použitím vhodného zařízení je přímo ovlivněna kvalita dosažených výsledků. Pokud chceme většinu prací mechanizovat, čímž se sníží pracnost, počet pracovníků a tím i ekonomické nároky na provedení, je třeba provedení dobrého průzkumu horniny využívající tlakových a injekčních zkoušek. Na závěr injekčního procesu je třeba provést nezbytné kontroly prací. Použitá technologie se volí vždy dle vlastností injektážní hmoty.

Mezi zařízení používající se při injektážích patří především:

- upínací hlavy, obturátory (slouží k vodotěsnému uzavření vrtu, pro určení propustnosti horniny), (příloha č. 7)
- samotné zařízení pro tvorbu injekční směsi (pro cementové směsi je vhodná aktivační míchačka (příloha č. 8), poté se směs přečerpá do pomaloběžných míchaček (příloha č. 9) pro udržení směsi v pohybu)
- injekční čerpadla (poháněná hydraulickými čerpadly, s pečlivou regulací chodu, která umožňují regulovat rychlost injektování, sledovat množství injektážní směsi či automaticky zastavit čerpadlo při dosažení maximálního injekčního tlaku)

- tlakové měřiče (pro stanovení propustnosti podkladu, kdy musíme znát velikost tlaku, kterým se voda do puklin vhání)
- hadice, šroubení a kohouty
- injekční stanice, tvořená sestavou jednotlivých strojů (příloha č. 10)

Podávání injektované směsi má probíhat plynule, bez poklesů tlaku, snižování či zvyšování množství či úplného přerušení dodávání hmoty, které mohou negativně ovlivnit proudění injektovaným prostředím. U hutnicích injektáží by měl tlak, kterým se vhání hmota do injektovaného prostředí, u vstupu dosáhnout hodnoty 8-10 MPa. Zvýšení rozpínavého (expanzního) efektu můžeme docílit vhodným navržením průměru vrtu a rychlostí vhaněné hmoty [3].

### **3.8 Vhodná doporučení při provádění injektážních prací**

- je třeba vyloučit ze směsí látky s vysokou toxicitou tak, aby následný výluh nebyl nebezpečný pro své okolí
- musí se zajistit vhodná tekutost směsi, aby byla dobře čerpatelná a měla vysoký akční rádius
- po svém zatuhnutí a zatvrdnutí v pórech, dutinách a trhlinách musí injektážní médium splňovat požadavky minimálních pevností a nepropustností, objemovou stálost nebo odolnost vůči agresivnímu prostředí
- po svém zatvrdnutí by měla být hmota dostatečně pružná, aby byla schopná odolávat možným přetvořením horninového prostředí
- správné zvolení injekčního tlaku na základě provedené vodní tlakové zkoušky, aby bylo zajištěno dostatečné proniknutí směsi do potřebných vzdáleností
- zvýšení odolnosti cementové směsi je možné upravit volbou cementu nebo přidáním jemně mletého popílku (při nahrazení až 30 % cementu popílkem se zásadně neprojevuje pokles pevnosti)
- při silném proudění podzemní vody je k vyplnění dutin a širších trhlin vhodné použít plynné emulze, což jsou chemicky upravené suspenze, které ve směsi vytvářejí vzduchové bublinky, díky čemuž nevznikají při injektážích ucpávky a směs snáze proniká do pórů
- pro těsnící injektáž velmi jemných trhlinek v mokřím prostředí je vhodná vodná disperze z plastického bentonitu, tato disperze je však náchylná k vyplavování, proto

se doporučuje takovéto vrty zainjektovat cementovým mlékem. Tím se zabrání vyplavení bentonitu z trhlinek

- na dotěsnění menších pórů, do kterých již stabilní injektáž cementové směsi nepronikne, se používá jílová suspenze. Musí však být zaručena podstatně větší jemnost jílových částic oproti zrnům cementu. Toho se docílí plavením a rozemíláním jílu v mlýnech
- pro pronikání do prachovitých zemin či jemnozrnných písků jsou vhodné plastické gely, na principu gelovatění vodního skla je založeno tuhnutí koloidních roztoků. Pevnost takovýchto gelů je však velmi malá a proto jsou vhodné převážně pro dotěsňování [14]

Množství vehnané injektážní směsi v čase je ovlivněno těmito aspekty:

- hloubka, ve které se daná hornina injektuje (množství a tlak vháněné směsi v čase můžeme zvyšovat s rostoucí hloubkou)
- výška hladiny podzemní vody vůči oblasti injektování
- možný dosah použitého zdroje injektování
- veličiny vzájemného výměnného vztahu mezi horninou a injekční směsí (počítá se s parametrem propustnosti horniny pro danou směs a tzv. zpomalujícím gradientem)

### 3.9 Vyhodnocení vodních tlakových zkoušek horninového prostředí

Těmito zkouškami získáváme množství výsledků (příloha č. 11), které vypovídají o propustnosti horniny (příloha č. 12), povaze puklin a jejich výplně. Propustností se rozumí určení množství spotřeby vody v jednotlivých hloubkách pod zemským povrchem. Hodnotu propustnosti uvádíme v l/min/m při působícím tlaku. U puklin je třeba zjistit druh a stabilitu výplně a maximální velikost tlaku, při kterém ještě nenastává deformace podloží. Dále se stanoví výška tlaku pro provozní injektáž. Pro zjištění jakým způsobem se mění propustnost horniny se zvětšující se hloubkou, se provádí použitím stejného tlaku ve všech etážích srovnávací tlaková zkouška vrtu. Výsledkem je grafická závislost spotřeby vody na tlaku (příloha č. 13), kterou vyhodnocujeme srovnáním s typickými průběhy závislostí [14].

Díky injekčním zkouškám se stanoví směsi vhodné k použití, potřebné vzdálenosti a hloubky injekčních vrtů nebo velikost injekčního tlaku (volí se v závislosti na tíži nadložních vrstev).

Těmito zkouškami však nelze stanovit konzistenci (hustotu) směsi. Při zacementování odzkoušených etáží je při tlakové zkoušce zamezeno unikání vody vzhůru a tím je možné etáž zkoušet až na mez porušení. Ideálními délkami jsou 3 m pro zkušební a 5 m pro provozní injektáž. Pokud je v místě vrtu poruchové pásmo je potřeba zkrátit délku etáže. Je důležité si však uvědomit, že podobně jako jiné kontrolní metody, ani vodní tlakové zkoušky nepřinášejí stoprocentně spolehlivé výsledky.

### **3.10 Kontrola provedených injekčních prací a kontrolní měření**

Provedením vodní tlakové zkoušky se přibližně stanoví množství a velikosti puklin v injektovaném prostředí. Poté je možné vhánět do zkušebních vrtů připravenou injektážní směs. Srovnáním naměřených výsledků z jednotlivých zkoušek lze stanovit ideální stupeň konzistence směsi. Zatřídění horniny z pohledu propustnosti se určí na základě specifických ztrát vody.

Provedením mikroseismického měření se kontroluje stupeň proinjektování, spočívá ve stanovení modulů pružnosti horniny před a po injektáži. Seismografy je potřeba umístit vždy na stejná místa. Dále je možné provést vizuální posouzení nebo kontrolu přetváření zabezpečovaného díla. Hornina, která prošla injektáží, musí splňovat základní požadavek na dokonalé spojení vháněné směsi s porušenou částí a její pevnost musí být stanovena dle přípustných deformačních změn [14].

Kvalita provedené těsnicí injektáže je kontrolována po 28 dnech od skončení prací pomocí vodní tlakové zkoušky v kontrolních vrtech. Na tzv. hlubinném bodu (příloha č. 14), který je v injektovaném vrtu umístěn o něco dříve, se měří deformace horniny. Pro správné vyhodnocení injektážních činností je však také potřeba velkého množství naměřených údajů, mezi které patří např. spotřeba použité injekční hmoty, množství vody spotřebované při provádění vodní tlakové zkoušky, počet, vzdálenosti a hloubky injekčních vrtů či hodnota injekčního tlaku [14].

Odlišnou možností kontroly proinjektované horniny je použití tzv. rentgenové difraktometrie. Vyhodnocením výsledků dlouhodobé zkoušky tzv. spektrální analýzy mohou být zjištěny pevnostní charakteristiky nebo mohou být odhaleny rozdíly ve struktuře zpevněné horniny.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Stanoveným cílem bylo ověření vlastností popílko(odpraško)-cementových směsí. Především jejich pevnostních charakteristik a mrazuvzdornosti v závislosti na přidávaném množství popílků (odprašků), které by bylo následně možno využít při navrhování jednotlivých druhů směsného materiálu pro specifické injektážní práce. Jako hlavní složka, ke které byla přidávána 5%, 10% a 20% část popílků či odprašků, byl zvolen jemný cementový potěr třídy C25.

### 4.1 Popis vstupních složek

Cementový potěr Cemix 25 jemný s velikostí zrna 0 – 0,7 mm (příloha č. 15).

Příměsí – pro ověřovací zkoušky bylo (jako náhrada cementového potěru) vybráno několik druhů průmyslových odpadů rozdělených dle způsobu výroby, během které vznikaly. Byly vybrány tyto vzorky:

- granulační popílek z elektrárny Dětmorovice – granulační topeniště, odsíření mokrou vápencovou metodou, popel úletový
- fluidní popílek z elektrárny Třinec – fluidní topeniště, popel úletový
- slévárenské odprašky firmy Giff, Frýdlant nad Ostravicí – elektrostatické odlučovače

Tyto typy příměsí byly složeny z jemných frakcí následujících velikostí:

granulační popílek – velikost zrna 45 mikronů

fluidní popílek – maximální velikost zrna 100 mikronů

odprašky – velikost zrna 70 mikronů



Obr. č. 7 – popílek granulační



Obr. č. 8 – popílek fluidní



Obr. č. 9 – odprašky

Tabulka č. 3 – Chemické složení popílků

	Popílek Dětmarovice	Popílek Třinec
Složka	Obsah [% hmotnosti]	Obsah [% hmotnosti]
SiO <sub>2</sub>	52,4	44,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,2	22,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,4	6,1
FeO	0,3	0,3
TiO <sub>2</sub>	1,0	1,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1	< 0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4	0,7
CaO	4,0	11,8
MgO	2,8	4,3
MnO	0,1	< 0,1
K <sub>2</sub> O	2,8	2,4
Na <sub>2</sub> O	0,3	/
C	4,5	4,2
S	0,8	2,2
Ztráta žháním	3,37	3,67

Tabulka č. 4 – Chemické složení odprašků

Slévárenské odprašky, Firma Giff	
Prvek	Průměrný obsah
Železo	45,62%
Zinek	10,12%
Mangan	5,67%
Olovo	3,5%
Chrom	2112 mg/kg
Měď	1803 mg/kg
Kadmium	372 mg/kg
Nikl	288 mg/kg
Vanad	167 mg/kg
Antimon	79 mg/kg
Arsen	56 mg/kg
Kobalt	19 mg/kg
Rtuť	3,85 mg/kg
Selen	2,1 mg/kg
Thalium	< 2,0 mg/kg

Voda – pro ztekucení směsi se použila pitná voda z vodovodního řádu teploty cca 18 °C.

## 4.2 Složení jednotlivých receptur

Pro vypracování experimentální části této práce byly navrženy následující receptury:

vzorek č. 1 – referenční vzorek – 100 % cementového potěru

vzorek č. 2 – 5 % granulačního popílku, elektrárna Dětmarovice + 95 % cementového potěru

vzorek č. 3 – 10 % granulačního popílku, elektrárna Dětmarovice + 90 % cementového potěru

vzorek č. 4 – 20 % granulačního popílku, elektrárna Dětmarovice + 80 % cementového potěru

vzorek č. 5 – 5 % fluidního popílku, elektrárna Třinec + 95 % cementového potěru  
vzorek č. 6 – 10 % fluidního popílku, elektrárna Třinec + 90 % cementového potěru  
vzorek č. 7 – 20 % fluidního popílku, elektrárna Třinec + 80 % cementového potěru  
vzorek č. 8 – 5 % odprašků, slévárna Giff + 95 % cementového potěru  
vzorek č. 9 – 10 % odprašků, slévárna Giff + 90 % cementového potěru  
vzorek č. 10 – 20 % odprašků, slévárna Giff + 80 % cementového potěru

### 4.3 Zhotovení čerstvé cementové směsi a následující zkoušky

Výroba směsí byla prováděna v Laboratoři stavebních hmot FAST VŠB-TUO. Míchání směsí probíhalo v laboratorním prostředí při teplotě  $20 \pm 3$  °C a relativní vlhkostí cca 35 %. Vzorek čerstvé malty byl připraven na předepsanou hodnotu rozlití. Hodnota rozlití byla stanovena na základě zkušenosti firem provádějících injektážní práce. Množství vody, potřebné pro dosažení dané konzistence bylo stanoveno na základě provedených pokusných záměsí. Dávka vody pro směs vhodnou k injektážím byla vždy stanovena tak, aby rozlití směsi pomocí střešovacího stolku Beton System RS-15 dle normy ČSN EN 1015-3 bylo 230 mm. Směs byla zhotovena v míchačce Beton System MI-CM5A (příloha č. 16). Doba a rychlost míchání odpovídala normě ČSN EN 1015-2, tj. míchání po dobu 90 s pomalou rychlostí.

Optimálně namíchané směsi byly ukládány do forem o rozměrech 40x40x160 mm, jejich obsah byl zhutněn ve dvou vrstvách vždy 15 úderů dusadla z nenasákavého materiálu čtvercového průřezu, jehož každá strana byla  $12 \pm 1$  mm.

Naplněné formy určené pro pevnostní zkoušky a zkoušku mrazuvzdornosti se zarovnal špachtlí, přikryli naolejovaným sklem a uložily do vlhkostní skříně s předepsanou vlhkostí 95 % a teplotou cca 20 °C (příloha č. 17). Po dvou dnech od namíchání směsi došlo k odformování těles a uložení do vlhkého prostředí. Při stanovení pevnostních vlastností se vycházelo z naměřených hodnot sil, při kterých došlo k porušení tělesa. Byly používány lisы firmy Beton System s maximálním zatížením 10 kN pro pevnost v tahu za ohybu a 300 kN pro pevnost v tlaku s kalibrací do 5. 3. 2010.



### 4.3.1 Stanovení fyzikálních vlastností

#### Stanovení konzistence čerstvé malty – ČSN EN 1015-3

Konzistence čerstvé směsi je stanovena průměrem rozlité zkušební směsi umístěné pomocí kovového kužele na desce střešacího stolku, který se zvedá a poté volně padá z předepsané výšky.

#### Postup zkoušky

Před každou zkouškou se deska a kužel očistily vlhkou tkaninou a otřely do sucha. Kovový kužel, umístěný ve středu desky střešacího stolku se naplnil maltou ve dvou vrstvách, které se rozprostřely 10 údery dusadla. Setřela se přebytečná malta a přibližně po 15 sekundách se kužel zvedl kolmo vzhůru a malta se 15 nárazy konstantní frekvence jednoho zdvihu za sekundu rozlila na desce. Průměr vzniklého koláče byl změřen ve dvou na sebe kolmých vrstvách a výsledek zapsán s přesností na 1 mm.



Obr. č. 10 – Rozlité cementové směsi na střešacím stolku

#### Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě - ČSN EN 1015-7

Princip této metody spočívá v propojení známého objemu vzduchu o známém tlaku s neznámým objemem vzduchu ve vzorku cementové směsi v uzavřené nádobě. Při provádění zkoušky byl použit tlakoměrný přístroj firmy Form – Test o objemu 1 l.

### Postup zkoušky

- nádoba se naplnila maltou ve čtyřech vrstvách, přičemž každá byla zhutněna 10 údery dusadla
- zarovnal se povrch, očistila vnější část nádoby a připevnilo víko pomocí svorek k nádobě
- prostor mezi víkem a maltou se vyplnil vodou a uzavřely se ventily
- do vzduchové komory se natlačil vzduch
- po dosažení rovnovážného stavu se odečetla hodnota tlakoměru s přesností na 0,1 %



obr. č. 11 – Tlakoměrný přístroj

### Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty – ČSN EN 1015-6

Stanoví se jako poměr hmotnosti k objemu.

### Postup zkoušky

Při plnicí metodě se měřicí nádoba naplnila maltou až po okraj nádoby. Povrch malty se zarovnal a nádoba očistila. Stanovila se hmotnost  $m_1$  prázdné měřicí nádoby a  $m_2$  nádoby naplněné maltou s přesností na 1 g.

Výpočet se provádí dle vzorce

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$m_1$ – hmotnost prázdné měřicí nádoby	[g]
$m_2$ – hmotnost naplněné měřicí nádoby	[g]
$V_v$ – objem měřicí nádoby	[l]

Tabulka č. 5 – Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Konzistence při použití	Hodnota rozlití v mm	Postup
Hustá malta	< 140 mm	Plnění a hutnění vibrační metodou
Platická malta	140 až 200 mm	Plnění a hutnění vibrační metodou nebo rázovou metodou
Řídká malta	> 200 mm	Plnicí metoda

### 4.3.2 Stanovení mechanických vlastností

#### Pevnost v tahu ohybem – ČSN EN 1015-11

Jedná se o stanovení pevnosti třibodovým zatěžováním až do porušení zkušebních trámečků.

#### Postup zkoušky

Těleso se uložilo symetricky na dva ocelové podpěrné válce vzdálené od sebe 100 mm kolmo na směr plnění. Zatěžování probíhalo pomocí jednoho břemene umístěného uprostřed rozpětí. Nárůst síly se postupně zvyšoval rovnoměrnou rychlostí  $50 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$  až do porušení zkušebního vzorku, zaznamenala se maximální síla porušení.

Výpočet se provádí dle vzorce

$$R_f = \frac{3}{2} * \frac{F * l}{b * d^2} \quad [\text{MPa}]$$

F – maximální zatížení na zkoušené těleso [N]

l – vzdálenost mezi osami válců [mm]

b – šířka zkoušeného tělesa [mm]

d – výška zkoušeného tělesa [mm]



obr. č. 12 – Zkouška pevnosti v tahu ohybem

### Pevnost v tlaku – ČSN EN 1015-11

Pevnosti se zkouší na zlomcích trámečků po zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

#### Postup zkoušky

Očištěné zlomky byly vystředěny bočními plochami v rozmezí  $\pm 0,5$  mm na destičkách zkušebního stroje a délkově se orientovaly tak, aby koncové plochy trámečku přesahovaly přibližně o 16 mm pomocné destičky. Pomocné destičky jsou vyrobeny z oceli rozměru 40x40 mm a tloušťky 10 mm. Nárůst síly se rovnoměrně zvyšoval rychlostí  $400 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$  až do porušení zkušebního vzorku, zaznamenala se maximální síla porušení.

Výpočet se provádí dle vzorce

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

F – maximální zatížení na zkoušené těleso [N]

A – průřezová plocha tělesa, na kterou zatížení působí [ $\text{mm}^2$ ]



Obr. č. 13 – Zkouška pevnosti v tlaku

### Mrazuvzdornost – ČSN 72 2452

Při stanovení mrazuvzdornosti malty byla zkušební tělesa vystavena střídavému zmrazování a rozmrazování požadovaným počtem zmrazovacích cyklů.

#### Postup zkoušky

Po 28 dnech od namíchání a uložení do forem se vzorky změřily, zvážily a ponořily na 24 hodin do vodní lázně teploty  $+20\pm 3$  °C. Ihned po nasycení vodou byly zmrazovány. Zmrazování a rozmrazování probíhalo v cyklech (v našem případě bylo zvoleno 25, 50, 75 a 100 cyklů). Pro zmrazovací etapy byla zvolena teplota -18 °C a pro následné rozmrazení vodní lázní teplota +20 °C. Po ukončení zmrazovacího cyklu se tělesa zvážila, změřila, zjistila se jejich objemová hmotnost a zaznamenala každá vzniklá porucha. Poté se vzorky zkoušely na lisech pro stanovení pevností v tahu za ohybu a tlaku.



Obr. č. 14 – Zkouška mrazuvzdornosti

Zkouška mrazuvzdornosti se ukončí:

- po ukončení předepsaného počtu zmrazovacích cyklů
- po ukončení zmrazovací etapy, při které byl zjištěn pokles pevnosti v tahu za ohybu větší než 25 % proti pevnosti v tahu za ohybu první porovnávací sady
- po zmrazovacím cyklu, při kterém byl zjištěn pokles dynamického modulu pružnosti  $E_d$  větší než 25 % proti hodnotě  $E_d$  zjištěného na první porovnávací sadě
- jsou-li tělesa zjevně mrazem rozrušena

## 5. VYHODNOCENÍ

### 5.1 Vyhodnocení čerstvé maltové směsi

Objemová hmotnost jednotlivých směsí je přibližně stejná, avšak množství vody potřebné pro dosažení dané konzistence se značně liší. Nejvyššího množství vody potřebují k optimálnímu ztekucení směsi s přísadky odprašků a fluidních popílků. Obsah vzduchu se snižuje v závislosti na množství přidávané příměsi, která má u všech tří typů průmyslových odpadů daleko menší velikost zrn než je zrnitost plniva malty, díky čemuž dochází k lepšímu obalení zrn cementu a zmenšení množství vzduchu ve směsi.

Tabulka č. 6 – Složení jednotlivých popílko-cementových směsí a jejich základních vlastností

Vzorek číslo	Cementový potěr C25	Průmyslový odpad	Voda	Poměr vody k pevné složce	Objemová hmotnost	Obsah vzduchu
	[g]	[g]	[g]	[%]	[kg*m <sup>-3</sup> ]	[%]
1.	3000	0	570	19	2041	5,4
2.	2850	150	540	18	2041	4,9
3.	2700	300	540	18	2045	3,9
4.	2400	600	540	18	2050	2,4
5.	2850	150	600	20	2075	4,4
6.	2700	300	660	22	2076	3,0
7.	2400	600	780	26	2079	2,0
8.	2850	150	600	20	2042	4,2
9.	2700	300	705	23,5	2048	3,8
10.	2400	600	900	30	2016	1,8

## 5.2 Vyhodnocení zatvrdlé maltové směsi

Ověřovací zkoušky pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku, byly na zatvrdlých zkušebních vzorcích prováděny po 2, 7 a 28 dnech od namíchání.

Při zkoušce mrazuvzdornosti byly pevnosti provedeny do rozpadu vzorku, maximem však bylo 100 cyklů.

Před vynesemím výsledných pevností do grafů byly pevnosti opraveny výpočtem statistické charakteristiky náhodného výběru (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient) tak, aby všechny pevnosti odpovídající směsi vždy ležely v intervalu  $X \pm 3s$ .

Použité vzorce:

$$\text{Výběrový průměr: } X = \frac{1}{n} \sum x_i * n_i \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{Výběrový rozptyl: } s^2 = \frac{1}{n-1} \sum n_i * (x_i - X)^2$$

$$\text{Směrodatná odchylka: } s = \sqrt{s^2}$$

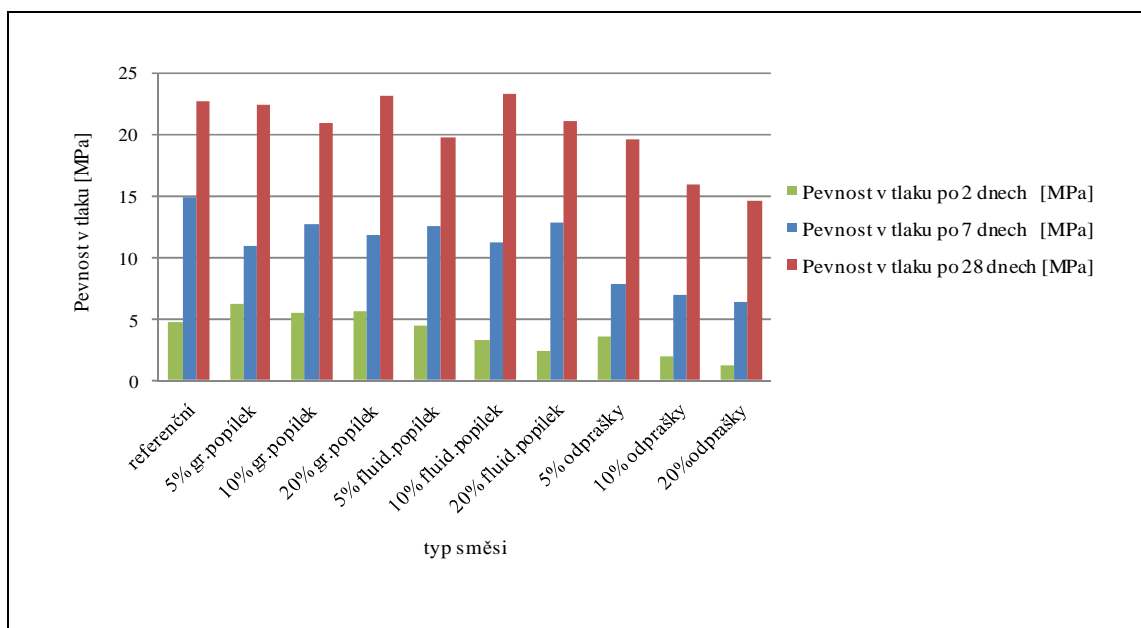
$$\text{Variační koeficient: } v = \frac{s}{X} * 100 \quad [\%]$$

Výpočet pro první směs (referenční vzorek) je uveden v příloze č. 18.



## Pevnost v tlaku

Graf č. 1 – Nárůst pevností v tlaku u jednotlivých vzorků po 2, 7 a 28 dnech



Tabulka č. 7 – Naměřené pevnosti v tlaku po 2, 7 a 28 dnech

Pevnost v tlaku [MPa] (průměrná opravená hodnota)	Pevnost v tlaku [MPa] po 2 dnech	Pevnost v tlaku [MPa] po 7 dnech	Pevnost v tlaku [MPa] po 28 dnech
Druh vzorku			
referenční	4,67	14,87	22,70
5% gr. popílek	6,20	10,88	22,37
10% gr. popílek	5,39	12,61	20,86
20% gr. popílek	5,61	11,80	23,09
5% fluid. popílek	4,44	12,55	19,65
10% fluid. popílek	3,19	11,20	23,24
20% fluid. popílek	2,35	12,76	20,97
5% odprašky	3,49	7,81	19,56
10% odprašky	1,90	6,87	15,95
20% odprašky	1,16	6,39	14,51

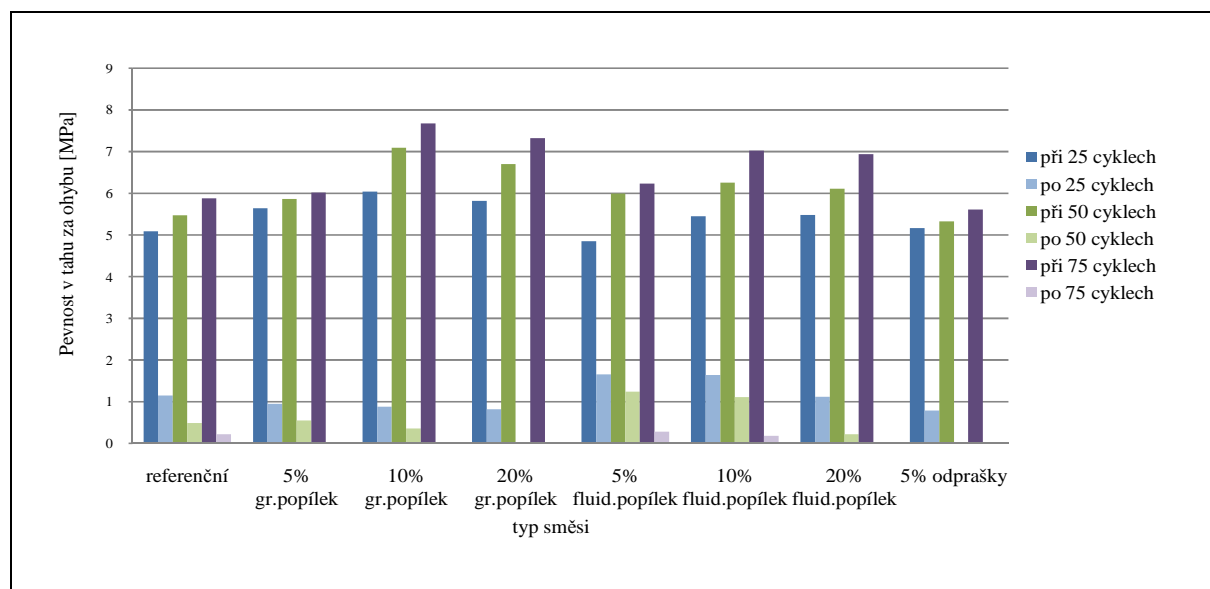
U směsí s přísádky granulačního popílku pozorujeme vyšší počáteční pevnosti než u referenčního vzorku. Tato vlastnost může být do jisté míry způsobena vyšším obsahem

sklovité fáze, která ovlivňuje zásadním způsobem reaktivitu popílků s CaO. Nicméně při zkoušce po 28 dnech tyto vzorky vykazují nižší pevnostní hodnoty než vzorek referenční, ale snížení není výrazné. Naproti tomu směsi s přidavkem fluidního popílku vykazují nižší počáteční pevnosti, ale výsledné 28 denní pevnosti jsou vyšší než referenční vzorek, což může být způsobeno vyšším obsahem volného CaO. U odprašků pozorujeme s jejich rostoucím procentuálním zastoupením daleko nižší počáteční pevnosti i pevnosti po 28 dnech. Nicméně je známo vylepšení pevnostních charakteristik po delší době zrání (cca 3 měsíce). Další možností pro dosažení vyšších počátečních pevností je použití vhodného plastifikátoru. V současné době jsou v laboratoři stavebních hmot uloženy vzorky pro ověření pevností po 4 a 6 měsících.

Závěrem se dá říci, že oba dva druhy popílku jsou vhodné jako náhražka části cementového potěru. U obou popílků by bylo vhodné ještě ověřit jejich 30% zastoupení v maltové směsi.

### Mrazuvzdornost

Graf č. 2 – Rozdíl mezi naměřenými pevnostmi v tahu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti a referenčních vzorků z vlhkostní skříně



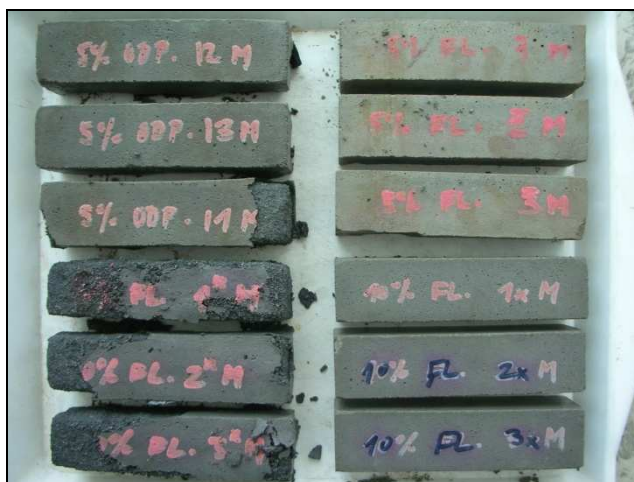
Naměřené hodnoty pevností v tahu po zkoušce mrazuvzdornosti jsou uvedeny v příloze č. 19.

Při zkoušce mrazuvzdornosti měli být vzorky vystaveny stu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů rozdělených do 4 etap. Poslední etapy nakonec nebylo potřeba, kvůli značnému rozkladu všech vzorků.

Po provedených 25 cyklech se výsledné pevnosti všech směsí od referenčního vzorku nijak zvlášť neodlišovali a dokonce vzorky s 5% a 10% fluidním popílkem referenční pevnosti předčily o cca 25 %. U směsí s 20% zastoupením klasických a fluidních popílků a také u 5% odprašků vznikají jemné trhlinky na povrchu velikosti do 5 mm a hloubky maximálně 1 mm. U 20% fluidů se navíc začínají drolit rohy.

Po 50 cyklech pevnosti referenční směsi předčily opět 5% a 10% fluidní směsi a směsi s přídatkem 5 % popílku granulačního. Směsi s 20% zastoupením fluidních popílků klesly vůči referenční směsi o více než 50 %, pevnosti směsí s 20% zastoupením granulačních popílků a 5% odprašků už nejsou měřitelné, navíc u těchto vzorků už místo vzniku trhlin začali opadávat celé stěny.

Provedených 75 cyklů vydrželi vedle referenčního vzorku už pouze směsi 5% a 10% fluidního popílku, nicméně už s velmi nízkými avšak srovnatelnými pevnostmi.



Obr. č. 15 – Vzorky po 50 zmrazovacích cyklech

Součinitel mrazuvzdornosti malty je poměr aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků zmrazovaných k aritmetickému průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků porovnávacích druhé sady.

Malta se považuje za mrazuvzdornou na ten počet zmrazovacích cyklů, při kterých úbytek pevnosti zmrazovaných vzorků proti pevnostem porovnávacích vzorků není větší než 25 % pevnosti porovnávacích vzorků.

Tabulka č. 8 – Součinitelé mrazuvzdornosti vůči porovnávacím vzorkům

	25	50	75
referenční	23%	9%	4%
5% gr.popílek	17%	9%	/
10% gr.popílek	14%	5%	/
20% gr.popílek	13%	/	/
5% fluid.popílek	35%	20%	4%
10% fluid.popílek	33%	17%	2%
20% fluid.popílek	21%	4%	/
5% odprašky	16%	/	/

Při výpočtu součinitelů mrazuvzdornosti jednotlivých směsí vidíme už po prvních 25 cyklech obrovský pokles pevností v tahu za ohybu vůči pevnostem referenčních směsí z vlhkostní skříně. Po 50 a 75 cyklech je součinitel mrazuvzdornosti velice nízký. Pro úplné posouzení chování pevností by proto bylo vhodné volit při příštích zkouškách menší rozměry intervalů jednotlivých zmrazovacích cyklů (10, 20, 25, 30).

### 5.3 Vyhodnocení experimentální části

Hlavním cílem této experimentální části bakalářské práce bylo ověřit vliv jednotlivých druhů průmyslových odpadů a jejich poměrného zastoupení ve směsi (klasické a fluidní popílky, slévárenské odprašky) na výsledné vlastnosti směsi. Zároveň byl sledován jejich vliv na vývoj pevností v tahu za ohybu a tlaku v různém čase (vzorky určené pro získání 4 a 6 měsíčních pevností, kterých bych chtěl využít v experimentální části mé diplomové práce, již byly namíchány a v současné době jsou uloženy ve vlhkostní skříni laboratoře stavebních hmot FAST).

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že pokud nejsou požadovány nároky na rychlý nárůst počátečních pevností, je možné zhotovit cementové směsi až s 20% náhradou cementové malty vhodným typem průmyslového odpadu (především granulačním nebo fluidním popílkem, ale i zkoumaným odpraškem), aniž by byly významně ovlivněny pevnostní charakteristiky v tahu za ohybu či tlaku. Použitím této náhrady se dá předpokládat jednoznačné snížení nákladů ve srovnání s referenční směsí. Snížení nákladů je dáno nízkou cenou použitých odpadů, popřípadě ziskem za zpracování odpadu.

#### popílky

Pokud chceme dosáhnout u popílko-cementových směsí vyšších počátečních pevností oproti pevnostem směsí bez popílku je potřeba snížit velikost vodního součinitele, což má následně vliv na zpracovatelnost. Na výsledných hodnotách pevností se vysokou měrou podílí použitá jemná frakce popílku, která vykazuje vyšší měrný povrch.

Obecně je známo, že negativní vliv agresivního prostředí na životnost injektážní malty lze omezit přidávkou popílku. Pozitivní účinek je pozorován především u popílkových směsí vystavených působení roztoků síranů. Toto téma by se dále dalo zkoumat například při diplomové práci.

#### odprašky

U zkoušených směsí s odprašky docházelo k nárůstu počátečních pevností pozvolna i přesto, že 2, 7 i 28 denní pevnosti vykazovaly nízkých hodnot, dle dostupných informací prováděných zkoušek jsou výsledné 120 denní resp. 180 denní pevnosti této směsi srovnatelné s pevnostmi referenční směsi po 28 dnech (směsi určené pro pevnostní zkoušky po 120 a 180

dnech byly v rámci mé bakalářské práce namíchány a ověření těchto pevností bude provedeno během měsíce května resp. července).

Kvůli přítomnosti odprašků ve zkoušených směsích byla pozorována retardace během tvrdnutí a to především během prvních 24 hodin, kdy čerstvě namíchaná směs tvrdne velice pomalu. Účinek retardace začíná ustupovat po 48 hodinách zrání směsi. Pokud bychom chtěli dosáhnout vyšších pevností už po 24 hodinách, je možné účinek retardace odstranit použitím urychlovacích prostředků. Přítomnost odprašků se projevuje přibližně po 7 dnech, kdy pevnosti směsí s 10 a 20 procenty odprašků již vykazují nižších rozdílů vůči směsi referenční (na rozdíl u pevností dvoudenních).

## 6 ZÁVĚR

Využití směsí s přísádky průmyslových odpadů je třeba vždy dobře uvážit, především dle místa použití a podmínek, které v těchto místech působí s vlastnostmi, kterých chceme docílit. Pro celkové doporučení možného využití průmyslových odpadů jako substituce cementu ve směsích je určitě vhodné provést řadu dalších zkoušek např. stanovení propustnosti, přilnavosti či roztažnosti, stanovení dob tuhnutí a tuhnutí při zvýšených teplotách nebo odolnost vůči agresivnímu prostředí. Vhodné by bylo provést také výzkum ekologické zátěže průmyslových odpadů na okolí, především pak po skončení jeho užité trvanlivosti. Známa je především snadnější vyluhovatelnost toxických kovů jako arsenu či chromu u klasických popílků na rozdíl od popílků fluidních, či extrémně vysoké hodnoty pH vodného výluhu materiálu. Tyto zkoušky mohou být předmětem experimentální části diplomové práce, kterou bych rád navázal na poznatky získané při řešení práce bakalářské.

## Seznam tabulek a grafů

Tabulka č. 1	Charakteristické chemické složení popílků	10
Tabulka č. 2	Charakteristické chemické složení železitých odprašků	11
Tabulka č. 3	Chemické složení popílků	24
Tabulka č. 4	Chemické složení odprašků	24
Tabulka č. 5	Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty	28
Tabulka č. 6	Složení jednotlivých popílko-cementových směsí a jejich základních vlastností	32
Tabulka č. 7	Naměřené pevnosti v tlaku po 2, 7 a 28 dnech	34
Tabulka č. 8	Součinitelé mrazuvzdornosti vůči referenčním vzorkům	37
Graf č. 1	Nárůst pevností tlaku u jednotlivých vzorků po 2, 7 a 28 dnech	34
Graf č. 2	Rozdíl mezi naměřenými pevnostmi v tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti a referenčních vzorků z vlhkostní skříně	35



**Seznam obrázků**

Obrázek č. 1	Využití popílku pro represi a prevenci do podzemních dolů Ostravsko-karvinského revíru v letech 1980 – 2006	3
Obrázek č. 2	Silo na granulační, fluidní popílek	4
Obrázek č. 3	Zařízení pro míchání a plavení směsi	4
Obrázek č. 4	Plavení popílku	4
Obrázek č. 5	Podélný řez jezem v Dieppe	13
Obrázek č. 6	Vrtná souprava Diamec 250	15
Obrázek č. 7	Popílek granulační	23
Obrázek č. 8	Popílek fluidní	23
Obrázek č. 9	Odprašky	23
Obrázek č. 10	Rozlití cementové směsi na střešacím stolku	26
Obrázek č. 11	Tlakoměrný přístroj	27
Obrázek č. 12	Zkouška pevnosti v tahu ohybem	29
Obrázek č. 13	Zkouška pevnosti v tlaku	30
Obrázek č. 14	Zkouška mrazuvzdornosti	30
Obrázek č. 15	Vzorky po 50 zmrazovacích cyklech	36

## Seznam použité literatury

- [1] Christian Kutzner; *Grouting of rock and soil*, Rotterdam 1996
- [2] M.P.Mooseley, K.Kirsch; *Ground improvement*, Spon Press, 2004
- [3] Ing. Jaroslav Verfel DrSc., *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*, Bratislava 1992
- [4] ČSN EN 1015-2 *Zkušební metody malt pro zdivo – Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt*
- [5] ČSN EN 1015-3 *Zkušební metody malt pro zdivo – Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*
- [6] ČSN EN 1015-6 *Zkušební metody malt pro zdivo – Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*
- [7] ČSN EN 1015-9 *Zkušební metody malt pro zdivo – Stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty*
- [8] ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Stanovení pevností zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*
- [9] ČSN 72 2452 – *Zkouška mrazuvzdornosti malty* + ČSN 72 2452 *Změna Z1*
- [10] EN 12715 *Provádění speciálních geotechnických prací – Injektáže*
- [11] [http://www.arism.cz/info/Sbornik\\_2006.pdf](http://www.arism.cz/info/Sbornik_2006.pdf)
- [12] <http://www.envirmine.cz/>
- [13] <http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/23.pdf>
- [14] <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2002/pics/20.pdf>
- [15] <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2006/pics/21.pdf>
- [16] [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce\\_4.2/Ondracek\\_Michal\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_4.2/Ondracek_Michal_CL.pdf)
- [17] [http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/4\\_2/Matulova\\_Pavla\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Matulova_Pavla_CL.pdf)
- [18] [http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/04\\_Fyzikalni%20a%20stavebne%20materialove%20inzenyrstvi/4\\_02\\_Nove%20stavebni%20hmoty/Marsalova\\_Jana.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/04_Fyzikalni%20a%20stavebne%20materialove%20inzenyrstvi/4_02_Nove%20stavebni%20hmoty/Marsalova_Jana.pdf)
- [19] [homen.vsb.cz/~wih15/Publikace/WiCiSe\\_PVC\\_ftx.doc](http://homen.vsb.cz/~wih15/Publikace/WiCiSe_PVC_ftx.doc)
- [20] <http://www.silmos.cz/file.php?id=1064>
- [21] <http://slon.diamo.cz/hpvt/2008/sanace/S06.pdf>
- [22] <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>
- [23] <http://www.zachranar.cz/>

## Seznam příloh

Příloha č. 1	Podélný řez levého svahu přehrady u Tambachu	13
Příloha č. 2	Tabulka vhodnosti jednotlivých druhů korunek v různých druzích hornin	14
Příloha č. 3	Typy korunek	14
Příloha č. 4	Druhy vrtných souprav	14
Příloha č. 5	Injektážní čerpadlo	15
Příloha č. 6	Tabulka vhodnosti použití jednotlivých injekčních směsí	18
Příloha č. 7	Obturátory	19
Příloha č. 8	Aktivační míchačka	19
Příloha č. 9	Pomalooběžná míchačka	19
Příloha č. 10	Injekční stanice	20
Příloha č. 11	Vedení dokumentace při vodních tlakových zkouškách	21
Příloha č. 12	Zkouška propustnosti	21
Příloha č. 13	Grafická závislost spotřeby vody na tlaku	21
Příloha č. 14	Hloubkové body pro měření deformací	22
Příloha č. 15	Cemix, Cementový potěr 25 jemný, technický list	23
Příloha č. 16	Laboratorní míchačka cementové kaše	25
Příloha č. 17	Vlhkostní skříň	25
Příloha č. 18	Výpočet statistických charakteristik náhodného výběru	33
Příloha č. 19	Naměřené pevnosti v tahu při zkoušce mrazuvzdornosti	35

### Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat své vedoucí bakalářské práce paní Ing. Zitě Lebedové za vedení a odbornému konzultantovi panu Ing. Stanislavu Starzycznému za cenné připomínky.