

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

**Výzkum cementových směsí s přísávkou granulačních a
fluidních popílků**

**Research cement mixtures with additions of granulation
and fluid fly ashes**

Student: Bc. Radek Papesch

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Petr Martinec, CSc.

Ostrava 2011

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

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Papesch**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Výzkum cementových směsí s přísádky granulacních a fluidních popílků**
Research cement mixtures with additions of granulation and fluid fly ashes

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Historie využívání popílkových směsí
3. Popis vstupních složek a jejich vlastností
4. Plán jakosti pracovního postupu
5. Experimentální část
6. Vyhodnocení experimentální části
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Novotný, P. a kol.: Fluidní spalování tuhých a kapalných paliv a odpadů. Běchovice 1969
Rosik - Dalevska, P. a kol.: Waste recycling. Kraków 2005.
Kuraš a kol.: Odpady, jejich využití a zneškodňování. VŠCHT Praha 1994.
a jiné, dle pokynů vedoucího práce

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

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Martinec, CSc.**

Datum zadání: 28.02.2011

Datum odevzdání: 30.11.2011



Ing. Martin Vavro, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Prof. Ing. Petra Martince, CSc., s použitím literatury uvedené v diplomové práci. Beru na vědomí, že diplomová práce není mým výhradním autorským dílem a že může sloužit potřebám fakulty i bez mého předchozího souhlasu.

V Ostravě dne 30. 11. 2011



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové 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 užití své dílo – diplomovou 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.....30.11.2011.....



Podpis studenta

Obsah diplomové práce

Seznam použitých symbolik.....	1
Anotace.....	2
Annotation.....	2
1. ÚVOD	3
2. HISTORIE VYUŽÍVÁNÍ POPÍLKOVÝCH SMĚSÍ	4
2.1 Historie využívání ve světě	4
2.2 Historie využívání v České republice.....	5
2.3 Současná situace.....	6
3. POPIS VSTUPNÍCH SLOŽEK A JEJICH VLASTNOSTÍ	8
3.1 Cementový potěr C25j	8
3.2 Cement portlandský struskový CEM II/B – S 32,5 R.....	9
3.3 Vzdušné vápno CL 90 – Q	9
3.4 Energosádovec	10
3.5 Popílký	11
3.5.1 <i>Granulační popílek</i>	12
3.5.2 <i>Fluidní popílek</i>	13
3.6 Záměsová voda.....	15
4. PLÁN JAKOSTI PRACOVNÍHO POSTUPU	16
1. ČÁST – SMĚSI PRO INJEKTÁŽNÍ PRÁCE	17
4.1 Seznam vstupních složek	19
4.2 Složení jednotlivých receptur.....	19
4.3 Stanovení vlastností vstupních surovin	19
4.4 Zhotovení čerstvé cementové směsi a následující zkoušky	21
4.4.1 <i>Stanovení fyzikálních vlastností</i>	22
4.4.2 <i>Stanovení chemických vlastností</i>	25
4.4.3 <i>Stanovení mechanických vlastností</i>	30
2. ČÁST – SMĚSI PRO STABILIZOVANÉ PODKLADY	33
4.5 Seznam vstupních složek	37
4.6 Složení jednotlivých receptur.....	37
4.7 Zhotovení čerstvé popílkové směsi a následující zkoušky.....	38
4.7.1 <i>Stanovení fyzikálních vlastností</i>	38

4.7.2	<i>Stanovení mechanických vlastností</i>	40
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
1.	ČÁST – SMĚSI PRO INJEKTÁŽNÍ PRÁCE	41
5.1	Vyhodnocení vlastností vstupních surovin	41
5.2	Vyhodnocení fyzikálních vlastností čerstvé směsi	45
5.3	Vyhodnocení chemických vlastností	45
5.4	Vyhodnocení mechanických vlastností	49
2.	ČÁST – SMĚSI PRO STABILIZOVANÉ PODKLADY	55
5.5	Vyhodnocení fyzikálních vlastností	55
5.6	Vyhodnocení mechanických vlastností	57
6.	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	60
7.	ZÁVĚR	61
	Seznam tabulek	62
	Seznam grafů	63
	Seznam obrázků	64
	Seznam literatury	66
	Seznam příloh	68

Seznam použitých symbolik

t	teplota	[°C]
w	vlhkost	[%]
$w_{opt.}$	optimální vlhkost	[%]
R_c	pevnost v tlaku	[MPa]
R_f	pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
$F_{max.}$	maximální zatížení	[N]
l	vzdálenost	[mm]
b	šířka zkoušeného tělesa	[mm]
d	výška zkoušeného tělesa	[mm]
A	průřezová plocha	[mm ²]
V	objem	[l]
m	hmotnost	[g]
ρ	měrná hmotnost	[kg*m ⁻³]
d_1	rozlití v jednom směru	[mm]
d_2	rozlití ve směru kolmém na d_1	[mm]
ρ_v	objemová hmotnost	[kg*m ⁻³]
$\rho_{max.}$	maximální objemová hmotnost	[kg*m ⁻³]
X	výběrový průměr	[MPa]
s^2	výběrový rozptyl	[-]
s	směrodatná odchylka	[-]
V	variační koeficient	[%]
φ	úhel vnitřního tření	[°]
t	čas	[s]
Φ	tepelný tok	[W*g ⁻¹]
ΔH	reakční teplo pro 1 g vzorku	[J]
k	geometrický faktor	[-]
λ	tepelná vodivost vzorku	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]

Anotace

Jako téma mé diplomové práce jsem si zvolil „Výzkum cementových směsí s přísady granulovaných a fluidních popílků“. V první části se zabývám historií využívání odpadů až po současné využití jako produktu a celkovým stavem problematiky. V dalších částech jsem se věnoval popisu složek navrhovaných stavebních hmot (strusko – portlandský cement, cementový potěr, granulovaný a fluidní popílek, vápno, energosádovec, voda) a vytvoření plánu jakosti pracovního postupu. Praktická část prováděná v laboratoři stavebních hmot se týkala především stanovení chemických či fyzikálně – mechanických parametrů, s cílem nalézt vhodné receptury pro injektážní práce a stabilizované podklady v silničním stavitelství. Závěrem je zhodnocení jejich možného využití v praxi, včetně doporučení provedení dalších zkoušek.

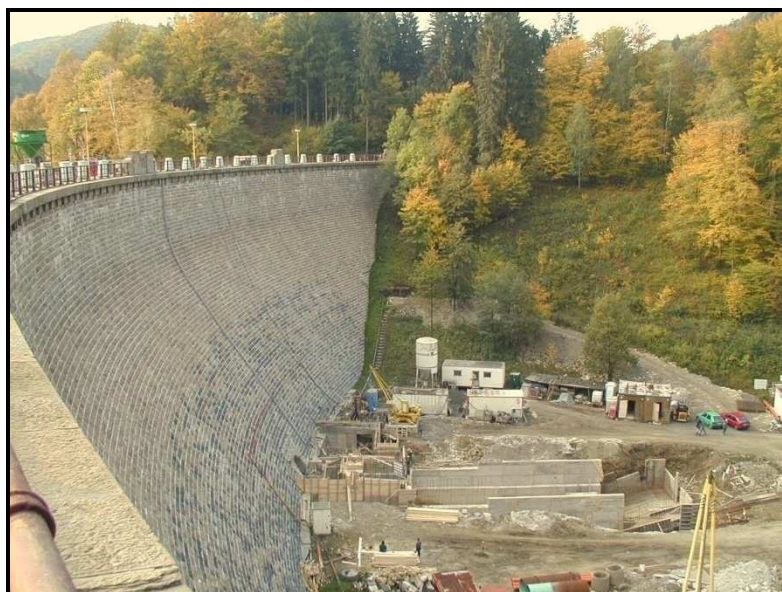
Annotation

As a topic of my diploma project I choose „Research cement mixtures with additions of granulation and fluid fly ashes“. The first part of my work deals with history of using industrial wastes to using them like a product and overall state of problems. The next part is devoted to description of proposed building materials (portland slag cement, cement screed, granulation or fluid fly ash, lime, gypsum, water) and making a plan of quality workflow. Practical part was performed in laboratory of building materials and was mostly involved in determination of chemical or physico – mechanical parameters and to find appropriate recipes suitable for grouting works and stabilized materials in road constructions. Final evaluation deals with possibility of using them in practise including recommendations for next practise finish.

1. ÚVOD

Jedním z cílů řešení této práce, je výzkum možného využití vedlejších energetických produktů po spalování fosilních paliv, konkrétně granulačních a fluidních popílků elektráren Dětmárovice a Třinec a také energosádrovce, jako materiálu využívajícího se při výrobě stavebních hmot vhodných pro injektážní práce a stabilizované podklady v silničním stavitelství. Důležitým bodem je nalezení vhodných receptur při využití co nejvyššího množství pojiva, které budou odpovídat aktuálním normovým požadavkům a které se stanou pro investory výhodným a hlavně levným stavebním artiklem. Nejvýznamnější podíl na jejich využívání představují ukončované důlní díla, rekultivace, sanace, injektážní práce či stabilizace podkladních vrstev vozovek. Samotné využití těchto produktů je především při výrobě stavebních hmot, jako jsou cement, betonové směsi, suché maltové směsi apod.

Obr. 1. Zpevňování vodního díla Bystřička nízkotlakou injektáží popílko – cementovými směsmi [38]



2. HISTORIE VYUŽÍVÁNÍ POPÍLKOVÝCH SMĚSÍ

2.1 Historie využívání ve světě

Historie popílků spadá do přibližně 2. století před naším letopočtem, kdy už staří římané využívali ve stavebnictví pozitivních vlastností sopečných popílků bohatých na křemičitany. V novodobé historii byl však termín popílek použit poprvé při zveřejňování výsledků amerického výzkumného projektu zabývajícího se jeho možným využitím v roce 1937. Podle dostupných údajů Amerického betonářského institutu byl popílek použit poprvé jako přísada do pojiva při výstavbě Hooverovy přehrady ve spojených státech v roce 1929. Mnohem rozsáhlejšího využití se však popílků dostalo až při výstavbě přehrady Hladový kůň ve státě Montana roku 1949, kde ve 120 000 tunové konstrukci plnil funkci náhrady části cementu. Úspěšnost projektu umožnilo jeho další využití jako přísady v konstrukcích dalších přehrad ve Spojených státech: Canon Ferry, Palisades či Yellowtail dams.

Ověřování možnosti využívání popílků je po celou dobu žhavým tématem, kterým se zabývají výzkumné týmy po celém světě. Především se jednalo o prokazování výhod jeho využití z hlediska ekonomického či ekologických problémů doprovázejících jeho ukládání.

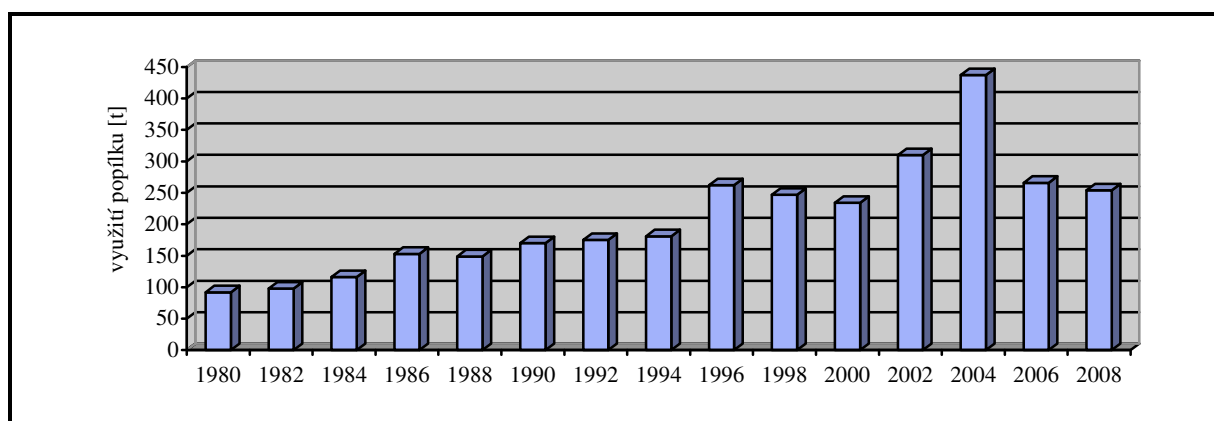
Obr. 2. Hooverova přehrada



2.2 Historie využívání v České republice

Historie popílků v České republice je spjatá zejména s jeho ukládáním do podzemních prostor, a to již více jak 60 let. V počátcích byl popílek dopravován do důlních prostor pomocí vozů, plavící směs určená pro uzavírku důlního díla byla v dole namíchána a do prostorů stavěné hráze čerpána kalovým čerpadlem. Takováto doprava byla málo výkonnou a na směnu náročnou operací, takže množství využívaných popelovin nebylo nijak významné. Po zavedení metody plavení popílkových směsí, byl za pomoci dopravy potrubí z povrchu do podzemních prostor výrazně zvýšen objem splavovaných popelovin. Využíván byl především tlakový spád a technologické vlastnosti plavící směsi, dopravitelné i na větší vzdálenosti. Na povrchových lokalitách dolů se rozšiřovala výstavba jednoduchých plavících zařízení, která se postupně zdokonalovala. Na počátku devadesátých let 20. století již byla většina dolů těmito výkonnými plavícími zařízeními vybavena, díky čemuž se rozšířilo možné využití plavící popílkové směsi v podzemí. Nejednalo se už pouze o stavbu hrází, tj. uzavírání důlních děl, ale také o stavbu žebířů sloužících k ochraně chodeb dobývaných porubů nebo k zaplňování volných prostorů chránících povrch. Vhodnou se tato směs stala také k proplavování závalových prostor při dobývání porubů z důvodu preventivní ochrany či represe záparu uhlí, které kvůli technologickým důvodům zůstalo nevyužito v závalu. Spotřeba splavovaných popelovin se tak nadále zvyšovala, přičemž od roku 1995 bylo do podzemních prostor Ostravsko – karvinských dolů dopravováno 260 – 440 tisíc tun popílku. [42]

Graf 1. Využití popílku jako prevence v podzemních dolech Ostravsko – karvinského revíru mezi lety 1980 - 2008



Nejdůležitější právní normou, podle které je ukládání druhotných produktů do podzemí řízeno, je Evropská směrnice 2003/33/ES. Byla stanovena přísnější kritéria pro

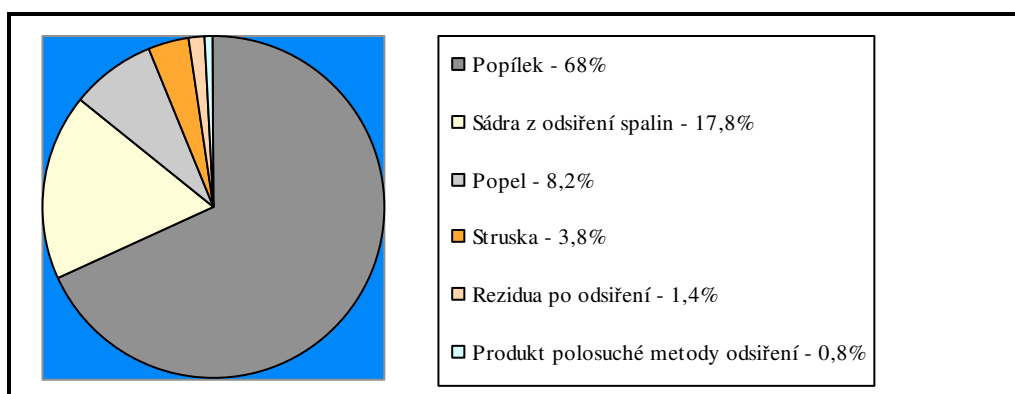
přijímání odpadů na skládky a do podzemních prostor. Do českého právního rámce byla tato směrnice EU realizována přijetím vyhlášky č. 299/2005 Sb., která hovoří o hospodárném využívání výhradních ložisek či povolování a ohlašování hornické činnosti prováděné hornickým způsobem [15]. Pro vyhodnocení rizik lokality, ve které se úložiště nachází, je vyžadováno 8 částí, které jsou součástí integrovaného hodnocení úložiště. Jedná se o:

- Geologické hodnocení
- Geomechanické hodnocení
- Hydrogeologické hodnocení
- Geochemické hodnocení
- Hodnocení vlivu na zdraví lidí a složky životního prostředí
- Hodnocení provozní fáze
- Hodnocení z dlouhodobého hlediska
- Hodnocení vlivu přijímacích povrchových zařízení

2.3 Současná situace

S rostoucí životní úrovní obyvatel dochází také k růstu spotřeby komodit a energií, se kterou souvisí růst průmyslové výroby, spotřeby energií a především problémy s rostoucím množstvím různých druhů odpadů (viz. graf 2.).

Graf 2. Produkce odpadů z termických procesů v Evropské unii v roce 2006



Výroba energií využívající fosilní paliva představují v České republice nejvyšší podíl na celkové produkci. Teplárny a elektrárny spalují především tuzemské hnědé uhlí, které se

těží v povrchových a podpovrchových dolech, s čímž je spojena vysoká produkce tuhých zbytků a doprovodných produktů z odsíření kouřových spalin. Tuhých zbytků po spalování uhlí je v ČR vyprodukováno okolo 10 mil. tun, využito je však jen asi 25% z daného objemu. Důvodem je nedostačující vývoj technologických postupů, které by odpadní látky využívaly jako surovinovou základnu pro výrobu konečných výrobků a nedostačující péče o životní prostředí, kdy se producentům odpadu/produktu vyplatí uložení na skládku. Tyto průmyslové odpady se tedy běžně ukládají na skládky, avšak díky svým pozitivním vlastnostem mohou být dále využívány. Výhodným pro stavební účely jej činí především jeho více či méně výrazné pucolánové vlastnosti. Akceptováním varianty jeho možného využití by se stalo předpokladem pro omezování těžby přírodních zdrojů, např. kameniva a vápence.

Účelné využívání produktů vznikajících po spalování je možné považovat za rozumné nejen z hlediska podnikatelského záměru provozovatele energetického zdroje, ale také z pohledu hospodářského. Prioritní systémové či výhledové řešení jejich možného využití představuje zejména jejich velkoobjemová technologická úprava a zpracování, typická pro průmyslovou oblast stavebnictví. K jejich možnému doporučení jako zpevněných zásypových materiálů, je vždy důležité ověřit jejich výsledné vlastnosti tak, aby byla splněna veškerá legislativní nařízení.

Stabilizace/Solidifikace

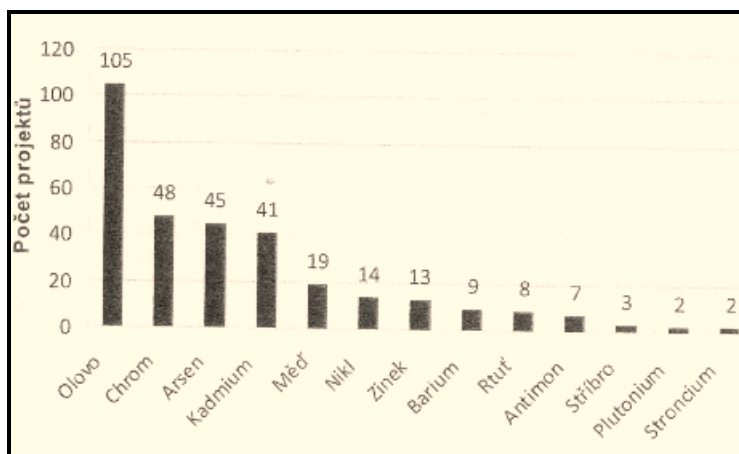
Jednotícím prvkem požadavků pro využití odpadů a jejich hodnocení jako rekultivačně sanačních nebo výplňových stavebních hmot je imobilizace polutantů ve výsledných produktech. Základními procesy, které umožňují dosažení těchto cílů jsou především solidifikace a stabilizace. Stabilizace je chemický proces, který vede ke snížení nebezpečnosti polutantů, převedení na nejméně rozpustné, nejméně pohyblivé či nejméně toxické sloučeniny. Při tomto procesu nemusí docházet ke změnám ve fyzikálních vlastnostech odpadu. Solidifikace provází stabilizaci a napomáhá ke snížení vlivů prostředí na stabilizovaný materiál. Solidifikace ještě nemusí zaručit stabilizaci kontaminantů. Nejčastěji používaným pojivem používaným při projektech využívající technologii solidifikace/stabilizace je portlandský cement. Jeho výhoda spočívá v hydrataci, která z odpadu vytvoří pevný monolit. U některých kontaminantů, převážně těžkých kovů, dojde následkem hydratační reakce k převedení volných iontů do méně rozpustných forem. Převedení do pevné monolitické formy také snižuje propustnost a povrch, který je kontaktu

s pronikajícími roztoky vystaven, čímž dojde k výraznému snížení možnosti migrace nebezpečných látek.

Metody testování solidifikovaných a stabilizovaných směsí probíhá porovnáváním základních charakteristik směsí, resp. nových stavebních výrobků. Metody můžeme rozdělit na tři základní skupiny:

- zkoušky chemických vlastností
- zkoušky fyzikálně – mechanických vlastností
- analýza mikrostruktury

Graf 3. Nejčastěji stabilizované kovy a jejich zastoupení v projektech [1]



3. POPIS VSTUPNÍCH SLOŽEK A JEJICH VLASTNOSTÍ

3.1 Cementový potěr C25j

Tato směs minerálního plniva o zrnitosti 0 – 0,7 mm, portlandského cementu a přísad zlepšuje výsledné zpracovatelské a užitné vlastnosti výrobku. Jemně mletý portlandský cement je nejběžnějším anorganickým hydraulickým pojivem, tuhnoucím po smíchání s vodou v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Pevnost a stálost je po zatvrdnutí zachována také pod vodou. Výroba spočívá v semletí slínku s přísadami. Důležitou součástí je proces homogenizace. Použit byl cementový potěr společnosti Cemix (technický list viz. příloha [1]).

3.2 Cement portlandský struskový CEM II/B – S 32,5 R

Tento druh cementu využívající se v silničním stavitelství při výrobě silničních betonů či pro zpevnění a stabilizace zemin se vyrábí semletím portlandského slínku, granulované vysokopecní strusky (max. 35%), případně doplňujících složek usnadňujících výrobu, případně upravující vlastnosti cementu. Portlandský slínek se vyrábí pálením surovinové směsi obsahující především oxidy CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. Granulovaná vysokopecní struska vzniká při rychlém ochlazení struskové taveniny, která vzniká jako vedlejší produkt při tavení železné rudy ve vysoké peci. Hlavním důvodem použití SPC při výstavbě zemních těles či podkladních vrstev je jeho vliv na zvýšení pevnosti v prostém tlaku a zlepšení mrazuvzdornosti. Použit byl strusko – portlandský cement společnosti Heidelberg (Českomoravský cement, technický list viz. příloha [2]).

Tab. 1. Technické parametry strusko – portlandského cementu [43]

CEM II/B – S 32,5R	Požadavek normy ČSN EN 197-1	Skutečná hodnota
Pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	≥ 10	15
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	$\geq 32,5 \leq 52,5$	30
Počátek tuhnutí [min.]	≥ 75	190
Konec tuhnutí [min.]	/	250
Objemová stálost [mm]	≤ 10	0,9
Obsah SO ₃ [%]	$\leq 3,5$	2,3
Obsah chloridů [%]	$\leq 0,1$	0,01
Ztráta žháním [%]	/	0,90
Nerozpustný zbytek [%]	/	4,1

3.3 Vzdušné vápno CL 90 – Q

Jedná se o vápno vzdušné, bílé, nehašené, velmi jemně mleté, které je připraveno výpalem z velmi čistých vápenců (min. 97% CaCO₃) a poté semleto na požadované

parametry. Použito bylo vápno III. třídy společnosti Kotouč Štramberk (technický list viz. příloha [3]).

Tab. 2. Technické parametry vzdušného vápna [44]

Vápno CL 90 Q	Požadavek normy EN 459-1	Skutečná hodnota
CaO + MgO [%]	≥ 90	$\geq 94,5$
Z toho MgO [%]	$\leq 5,0$	$< 1,0$
Obsah SO ₃ [%]	$\leq 2,0$	$< 0,3$
Obsah CO ₂ [%]	$\leq 4,0$	$< 3,5$
Vydatnost [dm ³ /10kg]	> 26	> 26
Zbytek nad sítím 0,2 mm [%]	/	0,5
Zbytek nad sítím 0,09 mm [%]	/	4,5
Reaktivita T _{60°C} [min]	/	$< 6,5$

3.4 Energosádrovec

Jedná se o vedlejší produkt odsíření spalin metodou mokré vápencové vypírky. Hlavní složkou je dihydrát síranu vápenatého (CaSO₄*2H₂O), obsaženy jsou také příměsy popílků zachycených při odsířování plynů a minerální látky z vápence, který byl k odsíření použit. Použit byl energosádrovec společnosti ČEZ elektrárny Dětmarovice a.s.

Tab. 3. Technické parametry energosádrovce [45]

Energosádrovec	Skutečná hodnota
Obsah CaSO ₄ *2H ₂ O [%]	≥ 90
Vlhkost [%]	≤ 10
Obsah chloridů [%]	$\leq 0,1$
Obsah oxidu hořečnatého [%]	$\leq 0,2$
Hodnota pH	5 – 8
Hmotnostní aktivita Ra 226 [Bq/kg]	≤ 300 Bq/kg
Index hmotnostní aktivity I	$\leq 2,0$

3.5 Popílký

Jedná se o nejjemnější podíl zbytků vznikající při spalování uhlí o zrnitosti 0 – 1 mm, které jsou zachytávány v odlučovačích. Jedná se o heterogenní materiál s rozdílnými chemickými, fyzikálními, mineralogickými, morfologickými a technologickými vlastnostmi závislé na:

- kvalitě spalovaného uhlí – především zde hraje roli obsah hořlavin, popelovin a vody. Výhřevnost uhlí se odvíjí dle intenzity a délky trvání karbonifikace a tedy množství obsaženého uhlíku. Nejstarší uhlí se nazývá antracit (90 – 95% C), mladším je černé uhlí (80 – 90% C), nejmladšími je hnědé uhlí (70% C), lignit (60% C) a rašelina (50% C)
- technologii využitého spalovacího procesu – roli zde hraje především typ spalovacího zařízení (výtavný, granulační a fluidní kotel), lišící se především teplotou spalování.

Tab. 4. Charakteristika kotlů pro spalování uhlí [9]

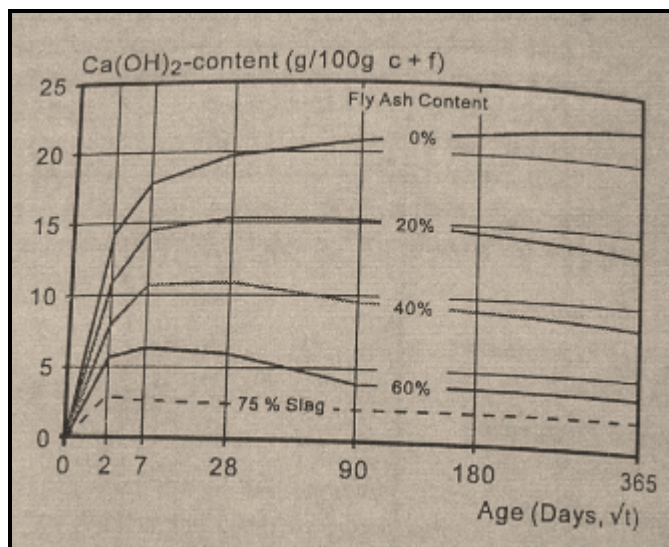
Technologie spalování	Teplota spalování [°C]	Druh uhlí	Optimální zrnitost [mm]
Výtavné ohniště	1350 - 1550	černé	0 – 0,2
Granulační ohniště	950 – 1100, 1100 - 1250	hnědé	0 - 2
Fluidní ohniště	800 - 850	černé, hnědé	1,6 – 6,5

Porovnání průměrného chemického složení popílků vznikajících při klasickém a fluidním spalování je uvedeno v tabulce číslo 5.

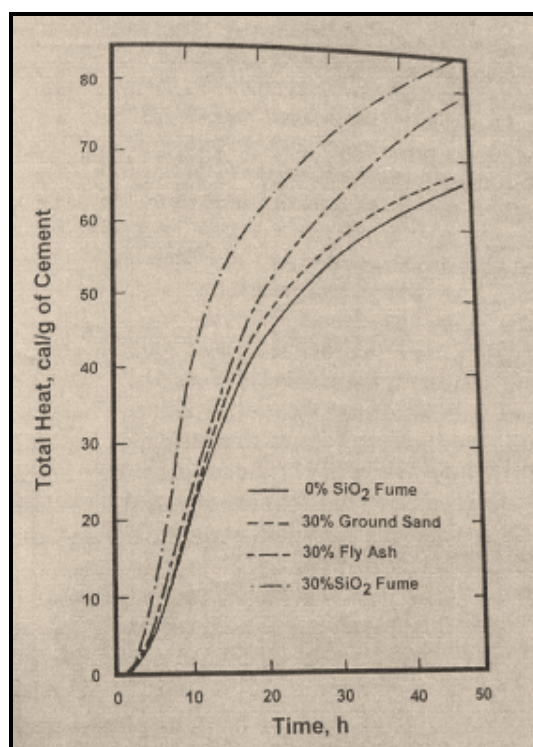
Tab. 5. Chemické složení popílků vznikajících při klasickém a fluidním spalování [1]

Popílek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Klasický	52,22	28,01	3,09	1,38	2,37	9,66	0,6	0,51	1,59
Fluidní	42,34	19,44	18,21	2,49	1,55	5,79	5,26	0,37	1,41

Obr. 3. Množství vápna vytvořeného v popílkové maltě s různým procentuálním zastoupením popílků vyhodnocené při DTA/TG analýze [14]



Obr. 4. Celkový vývin tepla u cementových směsí s příměsemi během hydratace vyhodnocené při DTA/TG analýze [14]



3.5.1 Granulační popílek

Jedná se o zbytkový materiál vznikající po spalování práškového černého nebo hnědého uhlí při teplotách přibližně 1400 – 1600°C. Skládá se převážně z částic křemičitanového skla,

kteře jsou zachycovány z plynných spalin v mechanických odlučovačích a elektrofiltrech, které bývají k velkým topeništím připojeny. Tato sklovitá fáze v množství větším než 50% se při normální či zvýšené teplotě podílí zásadním způsobem na reaktivitě popílků s CaO nebo cementem. Při podmínkách hydrotermálních vstupuje do reakce s Ca(OH)_2 i přítomný β - křemen a v malé míře také mullit. Jedná se o heterogenní směs částic různého tvaru, velikosti a chemického složení, závislých především na technologii spalování a kvalitě spalovaného uhlí. Většinou se jedná o kulovité částice pokryté krystalky různého tvaru. V popílku jsou velké procentuální zástupy oxidu křemičitého – SiO_2 , dále pak oxid vápenatý – CaO a oxid hlinitý Al_2O_3 . Mineralogické složení se vyznačuje především přítomností β - křemene a mullitu ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Základními požadavky, které jsou na granulární popílky kladeny jsou především nízké ztráty během sušení vzorku ($\leq 1\%$), ztráta žíháním ($\leq 4\%$), obsah SiO_2 ($\geq 40\%$), maximální obsah chloridů ($\leq 0,1\%$) či síry ($\leq 3\%$), dodržení limitních hodnot radioaktivních nuklidů ($\leq 150 \text{ Bq/kg}$) či výluhy bez přítomnosti toxických látek a těžkých kovů.

Granulární popílek není sám o sobě hydraulický, to znamená, že není schopen reakce s vodou. Je-li ale smíchán s Ca(OH)_2 , který je obsažen např. v cementu reaguje za vzniku produktů, které jsou stejné jako při reakci cementu s vodou. Schopnost této reakce je označována jako pucolanita.

Norma ČSN EN 197 – 1 umožňuje vyrábět cementy s přísadou popílků (křemičitého nebo vápenatého). Vápenatý popílek se v České republice v podstatě nevyskytuje.

3.5.2 *Fluidní popílek*

Možnost spalování uhlí jakožto zdroje elektrické energie, známe řadu let. Tento proces je doprovázen vznikem exhalací a tuhých zbytků po spalování. Velká část elektráren nyní přechází na technologii fluidního spalování tuhých paliv, při kterém se mleté uhlí (lignit) spaluje s přísadou vápence jako sorbentu při teplotách 800 – 850 °C, což je optimální pro absorpci SO_2 vznikajícím vápnem. Tuhé zbytky tedy představují směs minerálního podílu paliva s produktem odsíření a přebytku sorbentu vypáleného na volné vápno. Pokud se jako sorbent využívá dolomitický vápenec, vyznačují se tuhé zbytky vyšším obsahem oxidu

hořečnatého, což je pro oblast stavitelství nevhodné. Nízká teplota fluidního spalování také vede k potlačení tvorby oxidů dusíku NO_x a je tedy řazena do tzv. technologie čistého uhlí.

Fluidní popílků se vyznačují především vyšším obsahem CaO , který se při spalovacím procesu přidává nejčastěji ve formě vápence na odsíření. Krystalická fáze je tvořena především těmito mineralogickými tvary: anhydrit CaSO_4 , portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, kalcit CaCO_3 , křemen SiO_2 , hematit Fe_2O_3 , magnetit Fe_3O_4 a další.

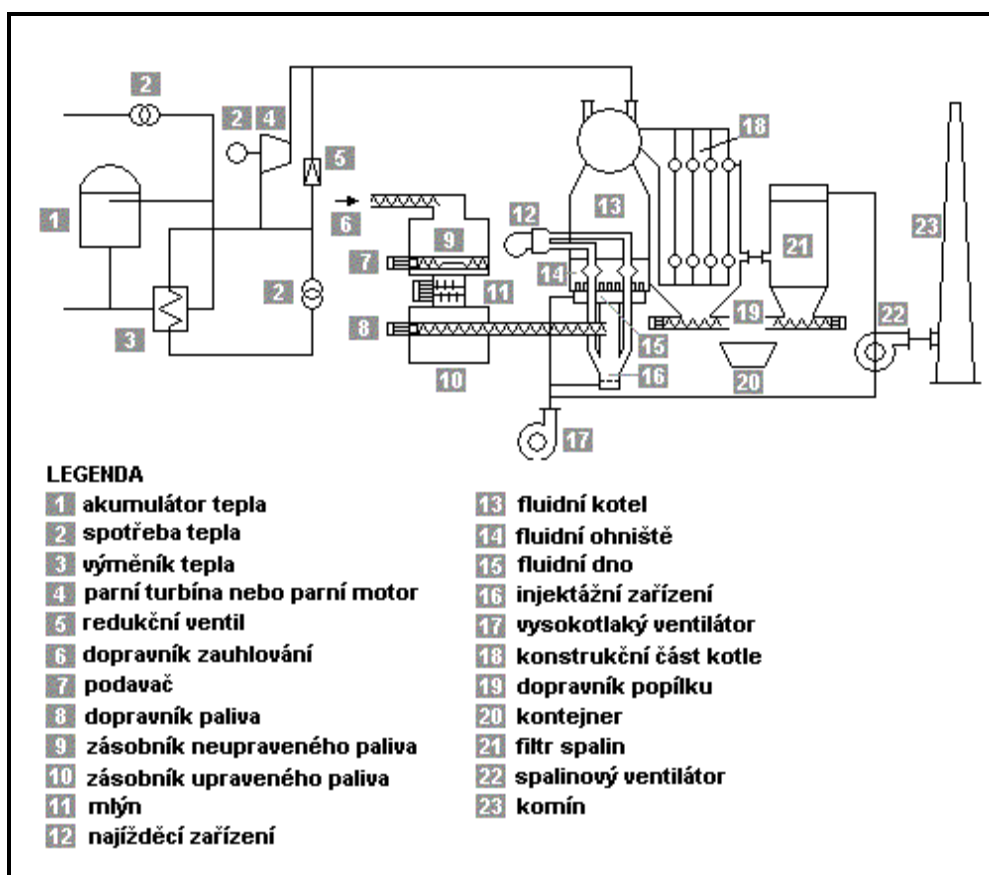
Chemické složení vzniklých popílků je v přímém vztahu ke složení původního uhlí, které bylo spalováno.

Tab. 6. Charakteristické chemické složení fluidních popílků vznikajících při spalování černého a hnědého uhlí [9]

Chemická složka	SiO_2	Al_2O_3	FeO	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Černé uhlí [%]	50 - 57	25 - 30	3,5 - 8,0	0 - 1	2 - 4	1,5 - 3,0	2,5 - 5,0	0,2 - 2,0	0,5 - 1,2
Hnědé uhlí [%]	43 - 60	19 - 34	3,0 - 6,0	1 - 7	4 - 6	0 - 2	0 - 2	0,5 - 1,0	0 - 5

Obecně lze pod pojem fluidní spalování zařadit každou oxidační reakci, která je uskutečněna ve fluidní vrstvě. Finálním účelem hoření hmoty je přeměna chemické energie na energii tepelnou. Celý proces je řízen s účelem na dosažení nejpříznivější účinnosti této energetické přeměny. Schopností, která činí tuto spalovací techniku specifickou a od klasických způsobů spalování odlišnou je univerzálnost spalovacího pojiva, které může být pevné, kapalné i plynné, případně mohou být tyto paliva spalována ve fluidní vrstvě současně v libovolném poměru.

Obr. 5. Technologické schéma kotlů s fluidním spalováním [35]



3.6 Záměsová voda

Je využívána pro plnění dvou základních funkcí:

- hydratační (hydratací cementu dochází k vytvoření tuhé struktury cementového kamene)
- reologické (umožňuje vytvořit čerstvou směs ve spojení s jejími složkami)

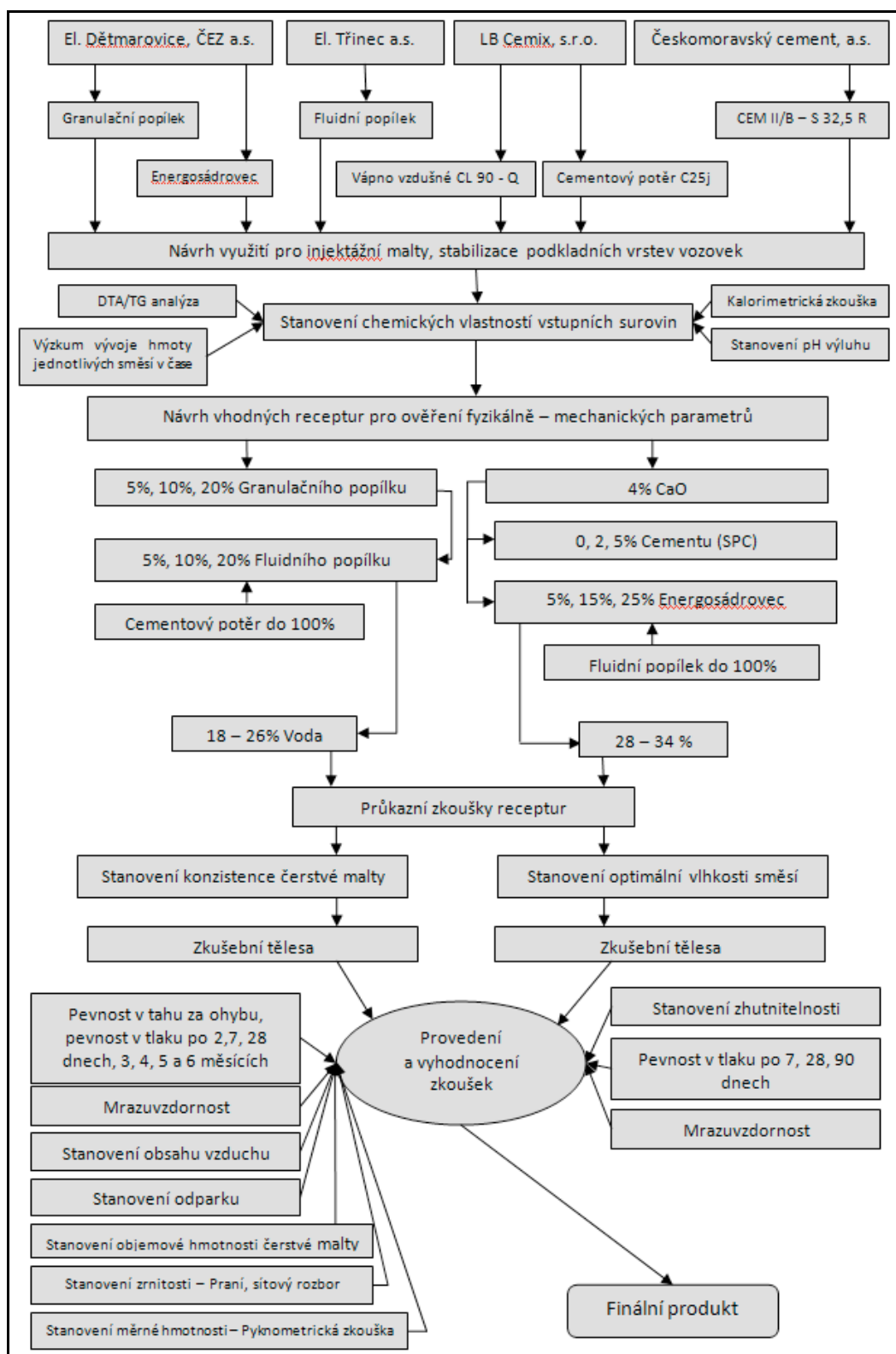
Technologicky můžeme vodu rozdělit na:

- záměsovou (je dávkována při mísení čerstvé směsi)
- ošetřovací (je dávkována po zatuhnutí)

Při přípravě receptur s vhodným vodním součinitelem byla použita pitná voda z vodovodního řádu.

4. PLÁN JAKOSTI PRACOVNÍHO POSTUPU

Obr. 6. Plán pracovního postupu



Model procesu a činností diplomové práce je uveden v příloze [4].

Metodika řešení

Vytyčeným cílem práce bylo navrhnout a ověřit vlastnosti popílko – cementových směsí. Především se jednalo o jejich fyzikálně mechanické a také fyzikálně chemické vlastnosti v závislosti na přidávaném množství popílků, které by bylo následně možné využít při návrhu receptur vhodných pro specifické injektážní práce resp. stabilizace podkladů v silničním stavitelství. Hlavní složkou směsí pro injektáže byl cementový potěr, který byl postupně nahrazován 5, 10 a 20% složkou granulacních a fluidních popílků. Hlavní složkou směsí pro stabilizace podkladů byl fluidní popílek v různém procentuelním zastoupení, vždy s malým podílem vápna, strusko – portlandského cementu a energosádrovce. Největší riziko v sobě skrývaly popílků, protože se jedná o druhotný materiál, který může mít proměnné vlastnosti. Toto riziko bylo minimalizováno tím, že byly používány suroviny z jednoho odběru, tudíž se mohly předpokládat stejné vlastnosti.

1. ČÁST – SMĚSI PRO INJEKTÁŽNÍ PRÁCE

Výsledkem účinně provedené injektáže je částečné, nejlépe však úplné vyplnění všech dutin, trhlin a pórů pomocí vtháněné směsi. Jedná se o proces, kdy se čerpá kapalina různé viskozity do nestabilních a neúnosných zemin, nesoudržných hornin či do betonu s cílem zvýšené hutnosti, pevnosti, trvanlivosti a nepropustnosti těchto materiálů. Nově vzniklý kompozit se vyznačuje zlepšenými fyzikálními vlastnostmi. Injektáže také umožňují zajistit stálou polohu nerovnovážných objektů[16].

Dle účelu je možné rozdělit injektáže na:

- Zpevňovací
- Hutnicí
- Těsnicí
- Kompenzační

V České republice je problém potřebného zpevnění podloží stavebních prací anebo zaplnění vzniklých dutin patrný vždy po zásahu republiky rozsáhlými záplavami či povodněmi, při kterých dochází ke značnému poškození podloží základů. Možné využití

představují také sanační práce vodních děl, přehrad, při likvidaci starých podpovrchových prostor, inženýrských staveb, přivaděčů, kanalizace apod. Z důvodu velkých objemů potřebných při následných sanačních pracích jsou hledány cesty, jak snížit výslednou cenu za tyto práce při zajištění potřebných parametrů a vlastností směsi dle aktuálních norem. První část mé práce se proto zaměřuje na výzkum možného využití druhotných produktů, konkrétně granulačních a fluidních popílků elektrárny Dětmarovice, pro výrobu nových injektážních hmot. Cílem je především dosáhnout snížení ekonomických nároků na vyráběné směsi a díky možnému využití popílků příznivě ovlivnit problém jejich likvidace.

Obr. 7. Injektování dutin v hrázi přes injektážní vrty [38]



Další možné využití injektáže při zpevňování zemin a hornin:

- Stabilizace či sanace svahových sesuvů
- Zvýšení únosnosti zeminy v základové spáře
- Homogenizace podzákladů

Při zpevňování hornin a zemin jsou nejčastěji užívány tyto technologie:

- Trysková injektáž u zemin
- Mikropilotáž a hřebíkování pomocí injektovaných samozávrtných tyčí
- Zpevňovací injektáž zemin pomocí ocelových jehel

4.1 Seznam vstupních složek

- Cementový potěr Cemix třídy 25 jemný
- Granulační popílek elektrárny Dětmarovice – granulační topeniště, odsíření mokrou vápencovou metodou, úletový popel
- Fluidní popílek elektrárny Třinec – fluidní topeniště, úletový popel
- Voda – pro ztekucení směsi se použila pitná voda z vodovodního řádu teploty cca 18°C

4.2 Složení jednotlivých receptur

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

4.3 Stanovení vlastností vstupních surovin

Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky – ČSN EN 1097-7

Stanovení měrné hmotnosti představovalo zaznamenání jednotlivých druhů hmotností v průběhu zkoušky a jejich následného zpracování pomocí vzorce. Z důvodu práce s popílky se k doplnění pyknometru nepoužívala voda ale technický líh.

Tab. 7. Měrná hmotnost vstupních surovin

	označení	m_1 – prázdný pyknometr [g]	m_2 – pyknometr + voda [g]	m_3 – pyknometr + líh [g]	m_4 – pyknometr + líh + vzorek materiálu [g]
Cementový potěr	1.	28,7	77,4	67,6	70,5
Granulační popílek	2.	27,3	79,0	68,7	71,3
Fluidní popílek	3.	27,0	78,9	68,6	71,2

Vyhodnocení výsledků měrné hmotnosti probíhalo dle následujícího vzorce:

$$\rho = \frac{m}{m - (m_4 - m_3)} \cdot \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Obr. 8. Pyknometrická zkouška



Fotky z průběhu pyknometrické zkoušky jsou uvedeny v příloze [5].

Zrnitostní rozbor včetně provedení praní – ČSN EN 933-1

Postup zkoušky

Praní – Stanovení obsahu jemných částic

Zkušební navážka se vložila do nádoby a přidalo se dostatečné množství vody tak, aby byl materiál zcela pod vodou, vzorek se promíchal a postupně se nalíval na síto o velikosti

0,063 mm tak dlouho, dokud neprotékala čirá voda. Zůstatek nad sítím se vysušil a zaznamenala se jeho ustálená hmotnost.

Prosévání

Propraný a suchý materiál se nasypal na síta, která byla sestavena vzestupně dle velikosti ok do sloupce (0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2 mm). Na horní síto se usadilo víko a pod dolní síto dno. Navážka se postupně sype na horní síto. Po uzavření dochází k mechanickému střásání, po jehož ukončení jsou postupně odebírána jednotlivá síta, ručně se dokončuje prosévání a zaznamenávají se hmotnostní zůstatky na jednotlivých sítích. Částice propadlé na dno se označují jako propad P.

Prováděna byla také detailní zrnitostní zkouška extrémně jemných částic pomocí přístroje Analysette 22 – Nanotec plus firmy Fritsch. Přístroj umožňuje měření extrémně jemných částic. Lze pracovat s dispergací mokrou i suchou.

Měřicí rozsah:

0,01 – 2 000 mikronů, za mokra.

0,1 – 2 000 mikronů, za sucha

4.4 Zhotovení čerstvé cementové směsi a následující zkoušky

Výroba záměsí byla prováděna v laboratořích stavebních hmot VŠB – TUO. Míchání jednotlivých receptur probíhalo v laboratorním prostředí při teplotě $20 \pm 3^\circ\text{C}$ s relativní vlhkostí 30%. Vzorek čerstvé malty byl připraven na předepsanou hodnotu rozlití na střešacím stolku BetonSystem RS-15, která zajišťovala vhodnou konzistenci pro provádění injektážních prací. Po konzultaci s odborníky zabývající se touto problematikou byla hodnota rozlití stanovena na 230 mm. Množství potřebné vody k dosažení dané konzistence bylo stanoveno na základě provedených pokusných záměsí. Směs byla vytvořena v míchačce BetonSystem MI-CM5A, přičemž doba a rychlost míchání odpovídala normě ČSN EN 1015-2, tj. míchání po dobu 90s pomalou rychlostí. Z dostupných důvodů se nejednalo o míchačku aktivační [viz. příloha 6], jejíž použití je důležité pro správnou aktivaci injektážní malty, což představuje mechanická desintegrace cementových zrn a homogenizace vstupních surovin a

zajištění vhodné tekutosti, což jsou atributy, které jsou zásadním předpokladem vedoucím k provedení účinné injektáže [10].

Vhodně namíchané směsi byly ihned ukládány do forem o rozměrech 40x40x160mm, při kterém došlo vždy v polovině plnění ke zhutnění 15 údery. Naplněné formy určené pro pevnostní a mrazuvzdorné zkoušky se zarovnal špachtlí, zakryly naolejovaným sklem a uložily do vlhkostní skříně s předepsanou vlhkostí 95% a teplotou cca 20°C. Po dvou dnech od namíchání směsi se vzorky odformovaly a opět uložily do vlhkostní skříně. Při vyhodnocování pevnostních vlastností se vycházelo ze zjištěných hodnot sil, při kterých došlo k porušení tělesa. Byly používány lisy firmy BetonSystem pracující s maximálním zatížením 10kN pro pevnost v tahu za ohybu a 300kN pro pevnost v tlaku, které byly řádně zkalibrovány.

4.4.1 Stanovení fyzikálních vlastností

Stanovení konzistence čerstvé malty – ČSN EN 1015-3

Konzistence čerstvé směsi je určena jejím průměrem rozlití, kdy se za pomoci kovového kužele umístí na desku střešacího stolku, který se postupně zvedá a volně padá z předepsané výšky.

Postup zkoušky

Před každou zkouškou se deska a kužel očistí vlhkou tkaninou a otře do sucha. Kovový kužel, umístěný ve středu desky střešacího stolku se naplní maltou ve dvou vrstvách, které se rozprostřou 10 údery dusadla. Setře se přebytečná malta a přibližně po 15 sekundách se kužel zvedne kolmo vzhůru a malta se 15 nárazy konstantní frekvence jednoho zdvihu za sekundu rozlije na desce. Průměr vzniklého koláče je měřen ve dvou na sebe kolmých vrstvách a výsledek zapsán s přesností na 1 mm.

Obr. 9. Rozlití cementové směsi na stříšacím stolku



Tab. 8. Předepsané hodnoty rozlití dle ČSN EN 1015-2

Objemová hmotnost čerstvé malty [kg/m^3]	Hodnota rozlití [mm]
> 1 200	175 ± 10
> 600 až $\leq 1\ 200$	160 ± 10
> 300 až ≤ 600	140 ± 10
≤ 300	120 ± 10

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

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

Postup zkoušky:

- nádoba se naplní maltou ve čtyřech vrstvách, přičemž každá je zhutněna 10 údery dusadla
- zarovná se povrch, očistí vnější část nádoby a připevní víko pomocí svorek k nádobě
- prostor mezi víkem a maltou se vyplní vodou a uzavřou se ventily
- do vzduchové komory je natlačen vzduch
- po dosažení rovnovážného stavu se odečte hodnota tlakoměru s přesností na 0,1%

Obr. 10. Tlakoměrný přístroj



Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty – ČSN EN 1015-6

Stanoví se jako poměr hmotnosti dané směsi ku objemu.

Tab. 9. Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

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

Postup zkoušky

Při plnicí metodě se měřicí nádoba naplní maltou až po její okraj. Povrch malty se zarovná a nádoba očistí. Stanoví se hmotnost m_1 prázdné měřicí nádoby a m_2 nádoby naplněné maltou s přesností na 1g.

Výpočet probíhá dle následujícího vzorce:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v}$$

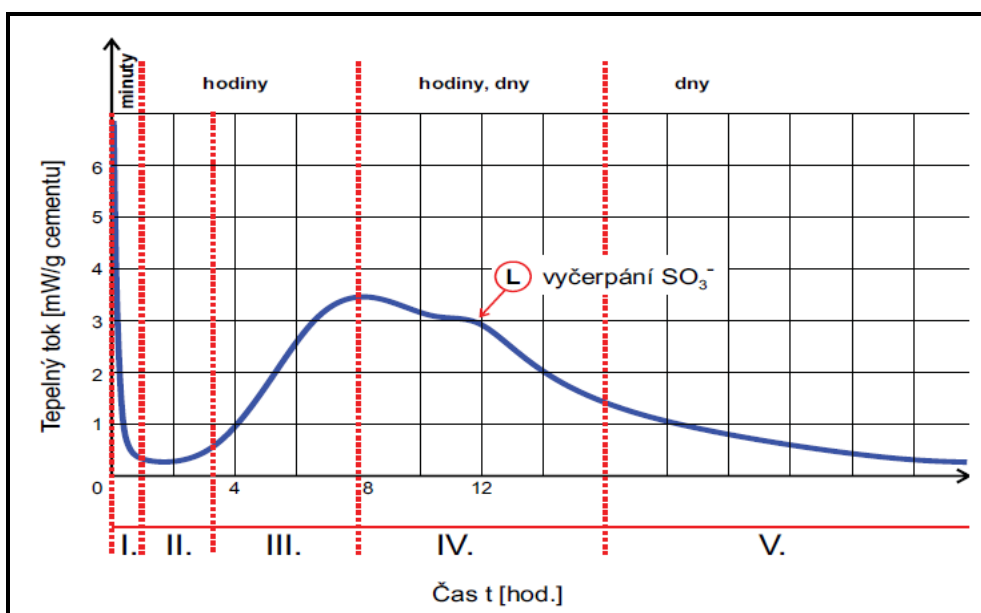
ρ_m – objemová hmotnost čerstvé malty	[kg*m ⁻³]
m_1 – hmotnost prázdné měřicí nádoby	[g]
m_2 – hmotnost naplněné měřicí nádoby	[g]
V_v – objem měřicí nádoby	[l]

4.4.2 Stanovení chemických vlastností

Kalorimetrická zkouška

K relativně rychlému zkoumání vlastností reaktivních materiálů je možné využívat semi – adiabatického mikrokolorimetru DIK04 společnosti Elsys (viz. příloha [7]), který je součástí vybavení školní laboratoře. Pro ověření možného využití popílků v injektážích směsích však bylo provedeno porovnání jednotlivých receptur pomocí přesného izotermického kalorimetru TAM Air (parametry přístroje jsou uvedeny v příloze [8]). Při hydrataci cementu dochází k silné exotermní reakci, která je podle Younga dělena do celkem 5 fází:

- Vysoký nárůst teplot při počátečním procesu (0 – 15 minut)
- Období útlumu (15 minut – 4 hodiny)
- Období akcelerace (4 – 12 hodin)
- Období zpomalení (12 – 24 hodin)
- Období s nepatrným vývinem tepla (> 24 hodin)

Graf 4. Křivka hydratace portlandského slínku při vodním součiniteli $w = 0,5$ [7]

Vyhodnocení průběhu hydratační křivky je uvedeno v příloze [9].

Kalorimetr Tam Air dokáže díky velmi citlivému sledování tepelného toku měřit kinetiku hydratace vzorku. Obsahuje vzduchový termostat, díky kterému je teplo odváděno od vzorku a zároveň minimalizuje vlivy venkovní teploty.

Obr. 11. TAM Air 8 – Channel Calorimeter



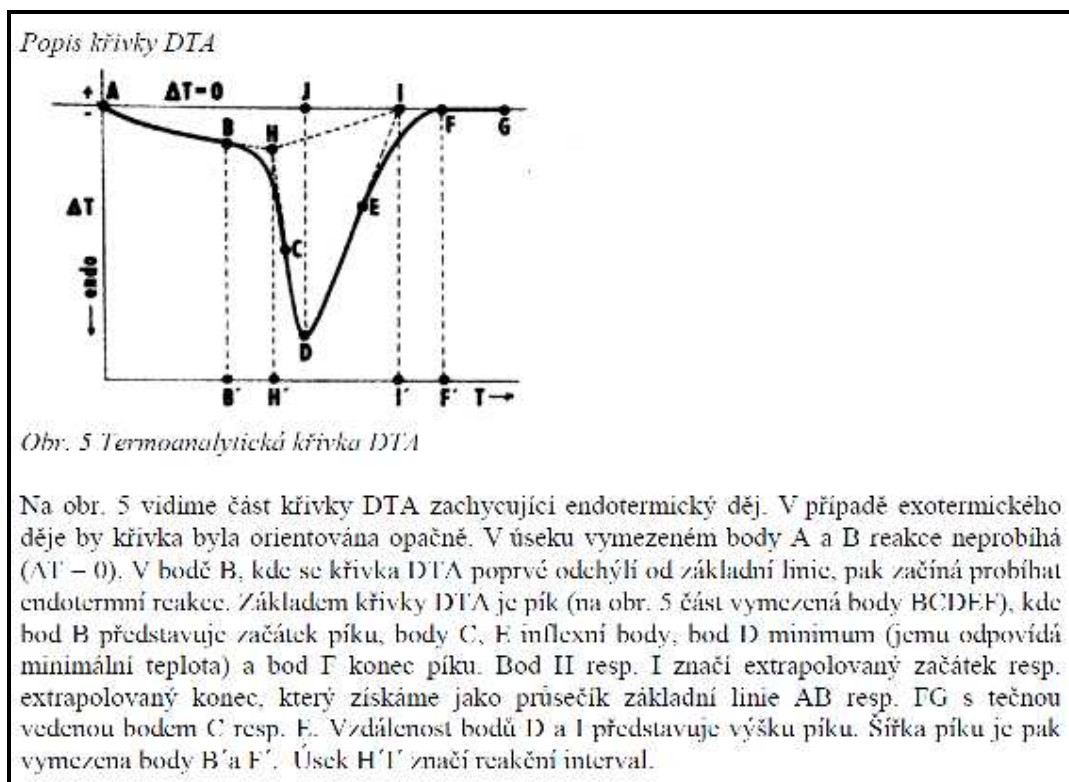
Princip měření spočívá v umístění testovacích vzorků do ampulí, které jsou vloženy do kalorimetru. Každý měřený vzorek má v přístroji referenční materiál, který ve výsledku umožňuje velmi přesně stanovit vyráběné či spotřebované teplo v samotném vzorku, přičemž všechny ostatní tepelné změny jsou vyloučeny. Každý proběhnutý proces, při kterém

se vyrobí nebo spotřebuje teplo je spjat se vznikem teplotního gradientu, díky kterému vzniká napětí přímo úměrné tepelnému toku. Tento tepelný tok je zaznamenáván nepřetržitě v čase.

Diferenciální termická analýza (DTA)/Termogravimetrie (TG)

DTA – Jedná se o dynamickou, tepelně analytickou metodu, při které jsou studovány energetické změny vzorku v závislosti na postupně zvyšované teplotě. Analýza má úzký vztah ke zkoušce kalorimetrické. Významným rozdílem je, že ke sledování změny tepelného zabarvení při určité teplotě dochází za statických podmínek, kdežto u DTA metody se jedná o podmínky dynamické. Ke srovnání je v přístroji vedle vzorku analyzovaného umístěn také vzorek inertní látky, která je současně zahřívána. Při zahřívání probíhají ve vzorku endotermní a exotermní reakce. Endotermní reakce se vyznačují spotřebou tepla, vůči inertní látce se tedy vzorek ochlazuje (dehydratace, dehydroxylace, disociace). Při reakci exotermní se naopak teplo vydává a vzorek se zahřívá (oxidace, krystalizace). Jednotlivé změny jsou přístrojem zaznamenávány vynášením exotermních a endotermních píků a vyhodnocovány pomocí vzniklé křivky DT. Analýza se provádí pomocí příruček, tabulek a vzájemným srovnáním s křivkami známých látek uvedenými v literatuře.

Obr. 12. Popis křivky DTA [46]

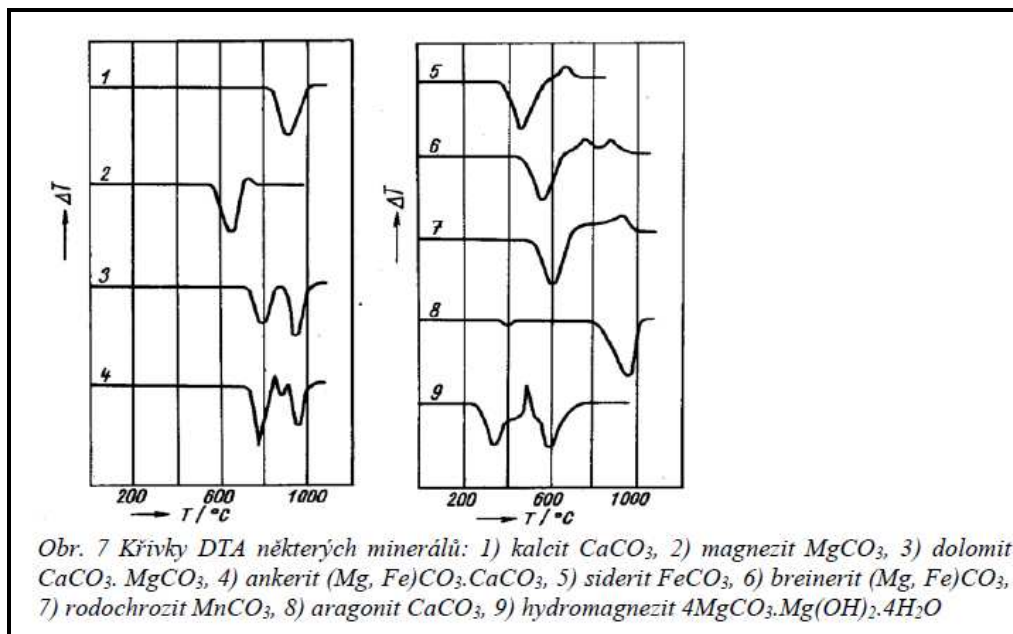


Závislost mezi plochou píku a reakčním teplem lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$A = \frac{m * \Delta H}{k * \lambda}$$

A – plocha píku	[mm]
m – hmotnost vzorku	[g]
ΔH - reakční teplo pro 1 g vzorku	[J]
k – geometrický faktor	[-]
λ - tepelná vodivost vzorku	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]

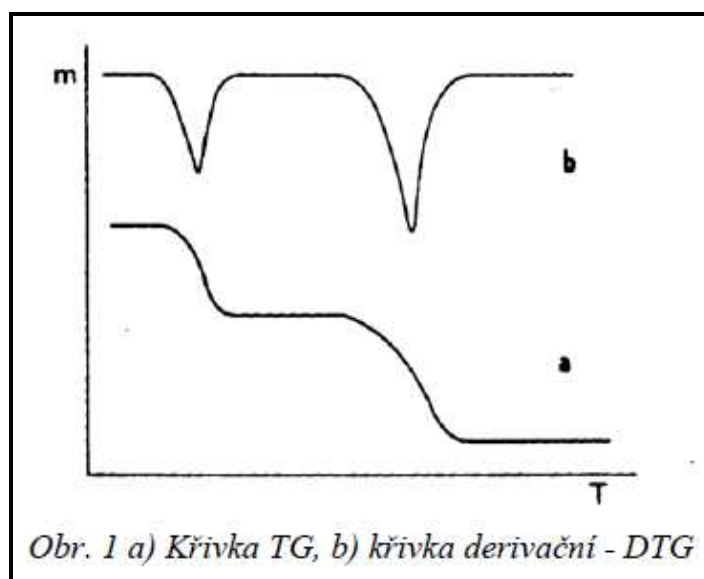
Obr. 13. Křivky DTA některých minerálů [46]



Obr. 14. Přístroj SDT Q600 pro DTA/TG analýzu



Obr. 15. Křivka TG a křivka derivační [46]



TG – Analýza je založena na studování a zaznamenávání hmotnostních změn při zahřívání vzorku. Při vyhodnocování je podkladem TG křivka studovaného materiálu vyjadřující změnu hmotnosti v závislosti na teplotě resp. čase. Při určité teplotě dochází k uvolnění krystalové vody, na základě křivky můžeme studovat typ a její množství. Pro přesnější určení teplot, při kterých dochází k hmotnostním změnám je zaznamenávána také první derivace TG křivky. Křivková minima odpovídají inflexím křivky TG a vyznačují místa, ve kterých docházelo k nejintenzivnějším změnám hmotnosti.

Stanovení pH výluhu

Při zkoušce stanovení pH u čerstvých směsí (ihned po namíchání) se vzniklá suspenze přefiltrovala přes filtrační papírek tak, aby byl roztok bez znečištění surovinami a nedošlo tak k poškození sondy pH metru. Sonda se následně umístila do kádinky s roztokem, narůstající hodnota pH se nechala ustálit a poté se zapsala. Obdobný průběh mělo stanovování pH u zatvrdlých směsí po 3 měsících. Lišila se pouze přípravou vzorků po danou zkoušku, kdy nejdříve muselo dojít k rozemletí ztvrdlé hmoty v kulovém mlýnu. Poté se vzniklý prášek smíchal s vodou a nechal se po 3 dny vyluhovat. Po přefiltrování se z čistého roztoku stanovila hodnota pH. V našem případě se jednalo o stanovení pH pro referenční směs (100% cem. potěru) a směsi s 20 % zastoupením granuláčích a fluidních popílků.

Obr. 16. Vyluhování injektážních směsí



Stanovení odparku

Po smíchání cem. potěru, popílků a destilované vody zahřáté na 80 °C se vzniklá suspenze přelila do kádinky, zvážíla a následně vysušila při 60 °C až do pevného zbytku a opět zvážíla. Cílem zkoušky bylo stanovení množství chemicky vázané vody, které bude při hydratační reakci s popílkou využito [viz. příloha 10].

4.4.3 Stanovení mechanických vlastností

Pevnost v tahu ohybem – ČSN EN 1015-11

Pevnostní zkouška byla prováděna tříbodovým zatěžováním až do porušení zkušebních trámečků.

Postup zkoušky

Těleso bylo uloženo symetricky na dva ocelové podpěrné válce, které od sebe byly vzdáleny 100 mm, kolmo na směr plnění. Zatěžování probíhalo za pomoci jednoho břemene, které bylo umístěno uprostřed rozpětí. Nárůst síly se zvyšoval postupně při rovnoměrné rychlosti zatěžování $50 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ až do porušení zkušebního vzorku, následně se zaznamenala max. 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. 17. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu



Pevnost v tlaku – ČSN EN 1015-11

Zkouška pevnosti byla prováděna na zlomcích trámčků po zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

Postup zkoušky

Očištěné zlomky se vycentrovaly tak, aby ležely přesně na pomocných ocelových destičkách o rozměrech 40x40 mm a tloušťky 10 mm. Nárůst síly se rovnoměrně zvyšoval rychlostí 400 N.s⁻¹ až do porušení zkušební vzorku, následně se zaznamenala max. 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 [mm²]

Obr. 18. Zkouška pevnosti v tlaku



Mrazuvzdornost – ČSN 72 2452

Při stanovení mrazuvzdornosti malty byla zkušební tělesa vystavena střídavému působení mrazu a rozmrazování v požadovaných počtech zmrazovacích cyklů.

Postup zkoušky

Po 28 dnech od namíchání a uložení do forem byly vzorky změřeny, zváženy a ponořeny na 24 hodin do vodní lázně teploty $+20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Ihned po nasycení vodou byly vloženy do mrazicího boxu. Působení mrazu a rozmrazování probíhalo postupně v cyklech (v našem případě bylo zvoleno 25,50,75 a 100 cyklů). Při zmrazovacích cyklech byla zvolena teplota -18°C a při následném rozmrazení vodní lázní teplota $+20^{\circ}\text{C}$. Při ukončení každé zmrazovací etapy se tělesa zvážila, změřila, zjistila se jejich objemová hmotnost a zaznamenala každá vzniklá porucha. Následně se vzorky okamžitě zkoušely na lisech pro stanovení pevností v tahu za ohybu a tlaku.

Zkouška mrazuvzdornosti se ukončí při splnění jednoho z následujících bodů:

- je-li ukončen předepsaný počet zmrazovacích cyklů
- po ukončení zmrazovací etapy, díky které bylo zjištěno snížení pevnosti v tahu za ohybu větší než 25% proti pevnosti v tahu za ohybu porovnávací sady z vlhkostní skříňe
- po zmrazovacím cyklu, při kterém se zjistí pokles dynamického modulu pružnosti E_d větší než 25% proti hodnotě E_d zjištěného na porovnávací sadě
- vykazují-li tělesa zjevné porušení v důsledku mrazu

2. ČÁST – SMĚSI PRO STABILIZOVANÉ PODKLADY

V dnešní době je využíván v silničním stavitelství tzv. popílkový stabilizát, tedy směs tvořená převážně elektrárenským granulačním popílkem a malými podíly vápna, strusko – portlandského cementu, energosádrovce a vody k dosažení potřebné konzistence. Cílem výzkumné části práce bylo zjistit, zda jsou pro výrobu stabilizátu vhodné popílkové fluidní, pocházející z odlišného technologického procesu a odlišných vlastností. Při postupném přecházení elektráren na fluidní spalování a předpokládanému zvyšování objemů fluidního popílku při procesu vznikajícím, jsou hledány cesty na jeho velkoobjemové využití a předejití tím k jeho ukládání na skládky.

Zemní těleso pozemní komunikace je prováděno dle normy ČSN 73 61 33 o návrhu a provádění zemního tělesa. Tato norma popisuje možné využití jednotlivých druhů materiálů, způsob výstavby zemního tělesa a nároky na provedení potřebných laboratorních zkoušek.

Zemní těleso je možné rozdělit podle vrstev na:

- Podloží násypu
- Zemní těleso
- Aktivní zóna
- Zemní pláň

Konstrukční vrstvy vozovky pozemních komunikací jsou definovány v souboru norem (Stavba silnic) dle jednotlivých vrstev. Součástí je také norma ČSN 73 61 25, týkající se stabilizovaných podkladů, která se stala podkladem pro výzkum možného využití popílků v

kombinaci s vápnem, cementem a energosádrovcem do podkladních vrstev pozemních komunikací. Tyto vrstvy je možné rozdělit na:

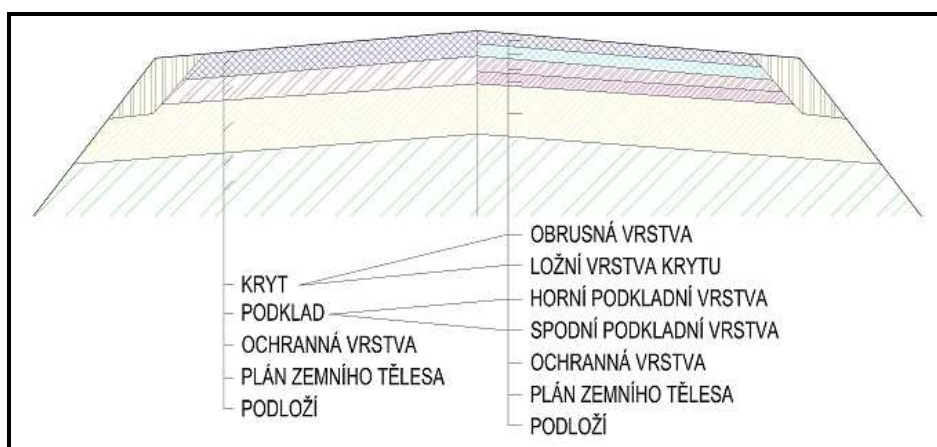
- Krytovou
- Podkladní
- Ochrannou

Tab. 10. Složky, jejich použití a normové nároky pevností jednotlivých vrstev

Druh materiálu	Zeminy - Popílký		Kamenivo		
Druh pojiva	Vápno	Cement			
Možné použití	Podložní ochranná vrstva	Podkladní vrstva			
		Spodní	Horní		
Druh vrstvy vozovky	ZZV	S III, II, I	KSC II, I	VB II, I	PB III, II, I
Pevnost v prostém tlaku [MPa]	1,0	1,0; 1,8; 2,5	7,0; 8,0	12,5; 15,0	20 - 25

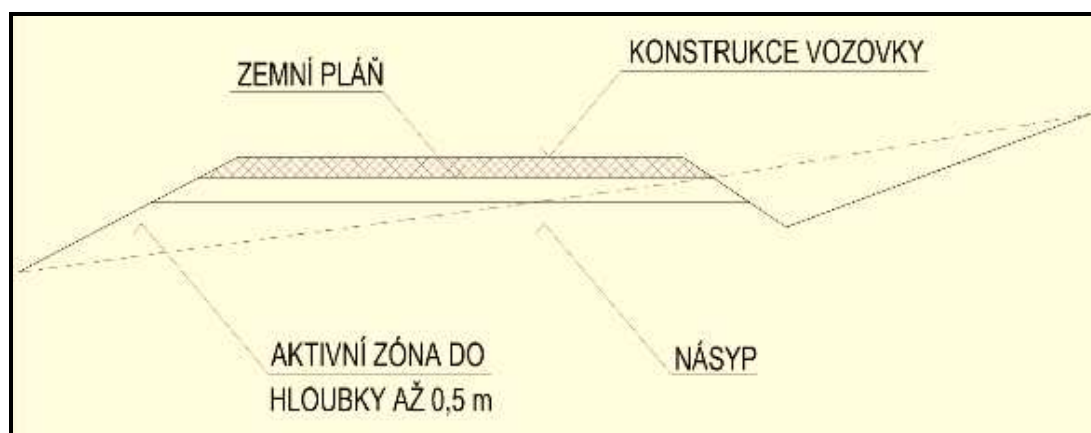
ZZV – zeminy zlepšené vápnem, S – stabilizované zeminy, KSC – kamenivo zpevněné pomocí cementu, VB – válcovaný beton, PB – podkladní beton

Obr. 19. Grafické schéma návaznosti jednotlivých vrstev konstrukce vozovky [2]



Funkce vozovky je výrazně ovlivněna podložím, které představuje především horní část zemního tělesa, tato část je ovlivněna účinky zatížení a klimatu a je označována jako aktivní zóna.

Obr. 20. Grafické schéma uspořádání konstrukčních vrstev pozemní komunikace [2]



Požadavky na možné využití stabilizátu v podkladních vrstvách pozemní komunikace popisuje norma ČSN 73 61 25 o stabilizovaných podkladech a jsou popsány v následujících tabulkách.

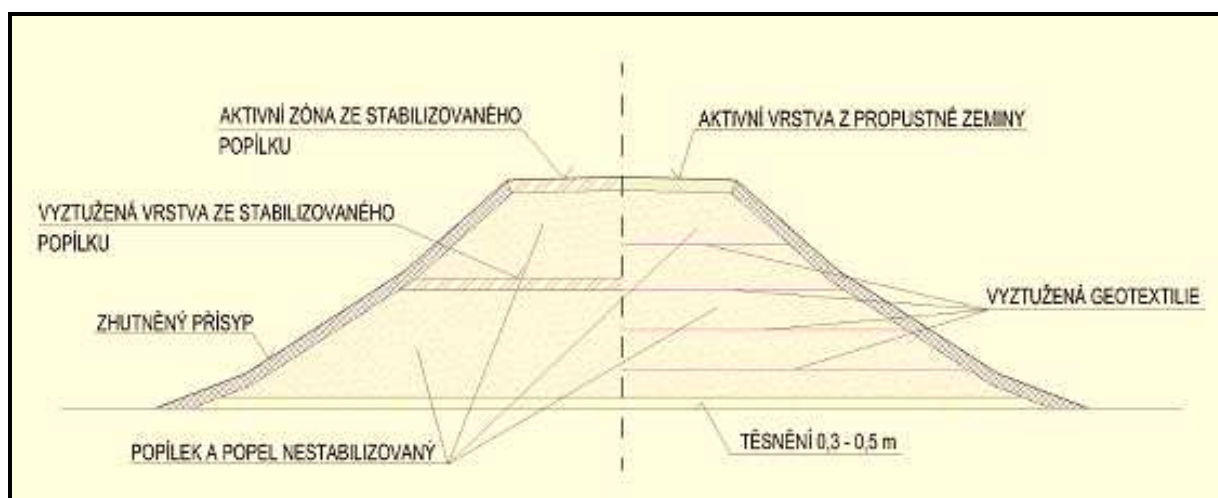
Tab. 11. Požadavky na teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování popílkového stabilizátu dle normy ČSN 73 61 25

Vrstva vozovky	Teplota působení mrazu [°C]	Počet cyklů odpovídající indexu mrazu oblasti (°C.den)		
		Do 350	350 – 600	Nad 600
Horní podkladní vrstva	-20	10	13	16
Spodní podkladní vrstva	-15	7	10	13
Ochranná vrstva	-10	5	7	10

Tab. 12. Požadavky na pevnost a odolnost proti mrazu popílkového stabilizátu dle normy ČSN 73 61 25

Třída stabilizace	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Mrazuvzdornost [MPa]
S I	2,5 – 4,0	Min. 3,5
S II	1,8 – 3,0	Min. 2,1
S III	1,0 – 1,8	Min. 1,2

Obr. č. 21 – Grafické schéma využití popílkového stabilizátu v konstrukci násypu



Technologický postup procesu výstavby

- Obr. 22. Solidifikační mísírna: Plnicí pásový dopravník, váha popílku, míchačka STASIS RTM-750 s odprašovacím filtrem [17]
- Obr. 23. Solidifikační mísírna SO-500.2: Násypka s pásovým podavačem a tenzometrickou vahou, váha vápna, plnicí pásový dopravník [17]
- Obr. 24. Rozprostírání stabilizátu na zhmtněnou pláň [17]
- Obr. 25. Navážení a rozprostírání materiálu druhé vrstvy [17]
- Obr. 26. Hutnění druhé vrstvy stabilizátu vibračním válcem STAVOSTROJ VV900.D [17]
- Obr. 27. Příprava provedení zatěžovací zkoušky, zhmtněné vrstvy stabilizátu [17]





4.5 Seznam vstupních složek

- Strusko portlandský cement CEM II/B – S 32,5 R
- Energosádrovec
- Vápno vzdušné CL 90 – Q
- Voda – pro ztekucení směsi se použila pitná voda z vodovodního řádu teploty 18°C
- Fluidní popílek elektrárny Třinec

4.6 Složení jednotlivých receptur

Tab. 13. Navrhované složení jednotlivých receptur

Označení vzorku	CaO [%]	Strusko - portlandský cement [%]	Fluidní popílek el. Třinec [%]	Energosádrovec [%]

V1	4	/	91	5
V2	4	2	79	15
V3	4	5	66	25

4.7 Zhotovení čerstvé popílkové směsi a následující zkoušky

Příprava záměsí byla prováděna v příslušných laboratořích stavebních hmot a mechaniky zemín v laboratorním prostředí teploty $20 \pm 3^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 30%. Příprava zkušebních těles spočívala v navázení jednotlivých surovin v daném procentuálním zastoupení, jejich ruční promíchání a homogenizaci s přidáním záměsové vody, jejíž množství bylo stanoveno tzv. Proctorovou zkouškou. Takto namíchaná směs byla vždy po třech vrstvách ukládána a následně zhutňována v kovovém hmoždíři, ze kterého byly následně vytlačeny zkušební tělesa, které se zvažily a uložily do vlhkostní skříně s min. 95% vlhkostí vzduchu. Po uplynuté době zrání se provedly tyto zkoušky:

- Pevnost v prostém tlaku po 7, 28 a 90 dnech zrání
- Mrazuvzdornost po 90 dnech

4.7.1 Stanovení fyzikálních vlastností

Zkouška zhutnitelnosti zemín – ČSN 72 10 15

Při zhutňování dochází k zatlačování zrn zeminy do mezer a pórů, ze kterých je následně vytlačována voda, což se projevuje zmenšením objemu zeminy a následnému zvětšení objemové hmotnosti. Roste úhel vnitřního tření φ , snižuje se pórovitost a tím dochází ke snižování citlivosti zeminy na vodu. Cílem bylo stanovit optimální vlhkost a maximální objemovou hmotnost pomocí Proctorovy zkoušky, při které je zjišťován vztah mezi vlhkostí a objemovou hmotností. Zkoušku je možné provádět na dvou typech zařízení:

- Proctor standard (2,5 kg/ 300mm)
- Proctor modifikovaný (4,5 kg/450mm)

Zkoušky se od sebe liší hmotností pěchu a výškou ze které dopadá.

Postup zkoušky

Nejdříve došlo k vysušení vstupních surovin na konstantní hmotnost. Následně došlo ke smíchání a přidání potřebného množství vody tak, aby vlhkost stabilizované směsi nepřekročila vlhkost optimální. Směs byla postupně ukládána ve 3 konstantních vrstvách do hmoždíře při rovnoměrném hutnění 25 úderů. Vzhledem k tomu, že jsem zkoušku prováděl přístrojem Proctor modifikovaný, jednalo se o pět hmotnosti 4,5 kg a dopadem 450 mm. Rychlost byla 20 – 30 rázů za 1 minutu. Po ukončení hutnění se sejmul kovový nástavec a vzorek se zvážil. Vzniklý váleček byl rozříznut na polovinu a ze středu se odebralo cca 100g pro stanovení vlhkosti. Postup byl při postupném zvyšování vlhkosti několikrát opakován. Zaznamenané hodnoty byly zaneseny do grafu v závislosti vlhkosti na objemové hmotnosti suché směsi. Při spojení vynesných bodů grafu dostáváme křivku, jejíž vrchol představuje hodnotu optimální vlhkosti směsi w_{opt} , s maximální objemovou hmotností suché směsi ρ_{max} .

Obr. 28. Proctor modifikovaný pro zkoušku zhutnitelnosti zemin



Detail Proctorova zařízení pro zkoušku zhutnitelnosti je uveden v příloze [11].

4.7.2 Stanovení mechanických vlastností

Zkouška pevnosti v tlaku – ČSN 72 10 15

Při této zkoušce se vychází z normy pro laboratorní stanovení pevnosti jemnozrnných zemin v prostém tlaku. Při této zkoušce se stanovovala pevnost v tlaku jednotlivých stabilizovaných směsí na válcových vzorcích. Vzorky byly zváženy, změřeny a uloženy do vlhkostní skříně s vlhkostí 95%, po uplynutí doby zrání se vzorky opět zvážily a byla provedena zatěžovací zkouška v tlaku. Z každé směsi se ukládali postupně tři zkušební vzorky do deformačního lisu a postupně zatěžovali až do porušení. Nárůst síly se postupně zvyšoval rovnoměrnou rychlostí 0,1 MPa za sekundu. Dosažené výsledky se zaznamenávaly s přesností 200 N.

Zkouška mrazuvzdornosti – ČSN 73 61 25

Cílem bylo zjistit účinek mrazu a vody na zkoušené vzorky. Válečky byly po 28 dnech uloženy ve vlhkém prostředí uloženy do vody až do ustálené hmotnosti (nasyčení vodou) a následně uloženy do mrazícího boxu se střídavou teplotou zmrazování -15°C a rozmrazování +22°C. Takto bylo na vzorcích provedeno 7 zmrazovacích cyklů, následně byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. ČÁST – SMĚSI PRO INJEKTÁŽNÍ PRÁCE

5.1 Vyhodnocení vlastností vstupních surovin

Stanovení měrné hmotnosti práškových látek pyknometrickou metodou

Námi naměřené hodnoty se u všech zkoumaných vzorků shodují s hodnotami běžně uváděnými. U vzorku granulačního a fluidního popílku jsou hodnoty v mezích odpovídajících odlišným technologickým způsobům spalování a zpracování.

Tab. 14. Měrné hmotnosti vstupních materiálů

Druh materiálu	Měrná hmotnost [kg · m ⁻³]
Cementový potěr	2904
Granulační popílek	2288
Fluidní popílek	2290

Zrnitostní rozbor včetně provedení praní

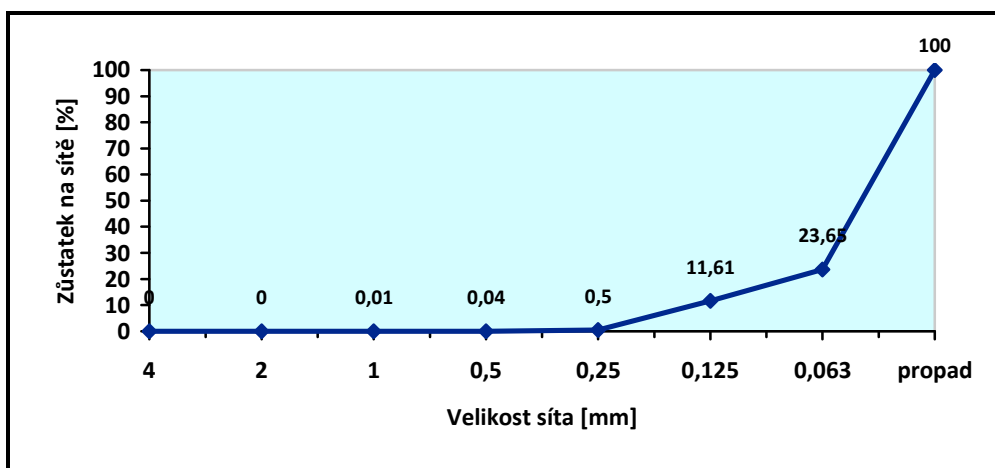
Jednotlivé zůstatky na sítích byly vyjádřeny v procentech k původní hmotnosti navážky M1. Následně se sečetla všechna procentuelní zastoupení na sítích a výsledná hodnota se porovнала s původní propanou navážkou. Součet hmotností jednotlivých frakcí na sítích s propadem se nelišil o více než 1% od původní hmotnosti propané a vysušené navážky – provedení zkoušky tedy můžeme považovat za úspěšné. Číselné hodnoty se graficky znázornily a vytvořily křivku zrnitosti.

Tab. 15. Zrnitostní rozbor granulačního popílku el. Dětmarovice

Velikost zrn [mm]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
4	0	100
2	0	100
1	0,01	99,99
0,5	0,04	99,96

0,25	0,50	99,50
0,125	11,61	88,39
0,063	23,65	76,35
propad	100	0

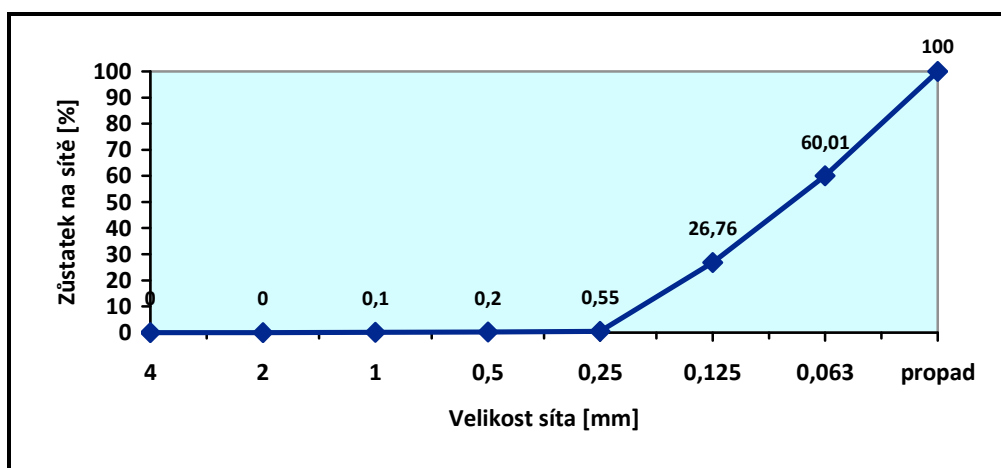
Graf 5. Křivka zrnitosti granulačního popílku el. Dětmarovice



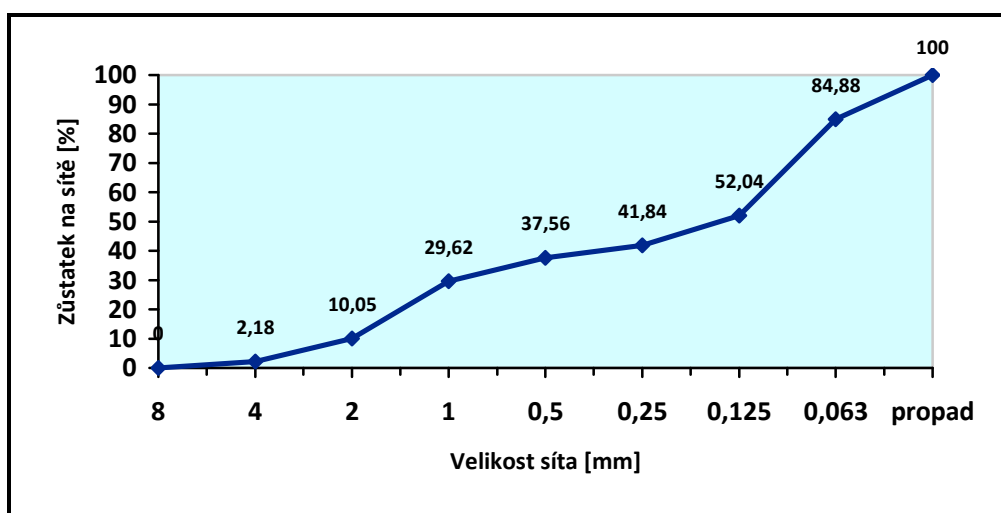
Tab. 16. Zrnitostní rozbor fluidního popílku el. Třinec

Velikost zrn [mm]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
4	0	100
2	0	100
1	0,1	99,90
0,5	0,2	99,80
0,25	0,55	99,45
0,125	26,76	73,24
0,063	60,01	39,99
propad	100	0

Graf 6. Křivka zrnitosti fluidního popílku el. Třinec



Graf 7. Křivka zrnitosti energosádrovce el. Dětmorovice



Obr. 29. Zrnitostní zkouška kombinovaná s praním



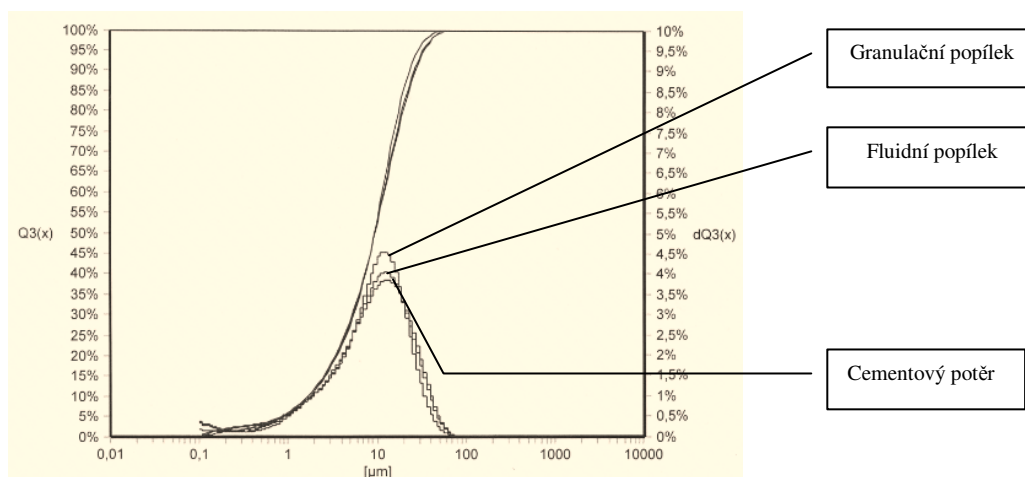
Proveden byl rovněž detailní zrnitostní rozbor extrémně jemných částic

Výsledky těchto rozborů byly vyhodnoceny vytvořením Gaussovy křivky charakterizující zastoupení jednotlivých velikostí částic. V našem případě se jednalo o vyhodnocování suché disperze s měřícím rozsahem 0,1 – 2 000 mikronů.

Obr. 30. Laserový analyzátor velikosti částic firmy Fritsch, Analysette 22 [37]



Graf 8. Srovnání detailních křivek zrnitosti extrémně jemných částic u vstupních materiálů



Grafy vyhodnocených křivek zrnitosti extrémně jemných částic 0,1 – 500 μm s vypočítanými hodnotami aritmetického průměru, střední odchylky, mediánu a prodloužení jsou součástí přílohy [12].

5.2 Vyhodnocení fyzikálních vlastností čerstvé směsi

Objemová hmotnost jednotlivých směsí se nijak výrazně neliší. Rozdílné vlastnosti však vykazují jednotlivé směsi v nárocích na množství vody potřebné k dosažení dané konzistence, kdy potřeby fluidních popílků jasně převyšují popílků granulační a samotnou referenční směs z cementového potěru. Obsah vzduchu se snižuje v závislosti na množství přidávané příměsi, kdy díky daleko menším zrnům u popílků dochází k lepšímu obalení zrn cementu a snížení množství vzduchu ve směsi.

Tab. 17. Receptury popílko – cementových směsí a jejich základní fyzikální vlastnosti

Vzorek číslo	Cementový potěr C25	Průmyslový odpad	Voda	Poměr vody k pevné složce	Objemová hmotnost	Obsah vzduchu
	[g]	[g]	[g]	[%]	[kg*m ⁻³]	[%]
1.	3000	0	610	20,3	1792	5,7
2.	2850	150	590	19,7	1785	4,6
3.	2700	300	580	19,3	1768	3,8
4.	2400	600	580	19,3	1801	2,6
5.	2850	150	650	21,7	1859	4,0
6.	2700	300	690	23	1798	3,2
7.	2400	600	790	26,3	1678	2,4

5.3 Vyhodnocení chemických vlastností

Kalorimetrická zkouška

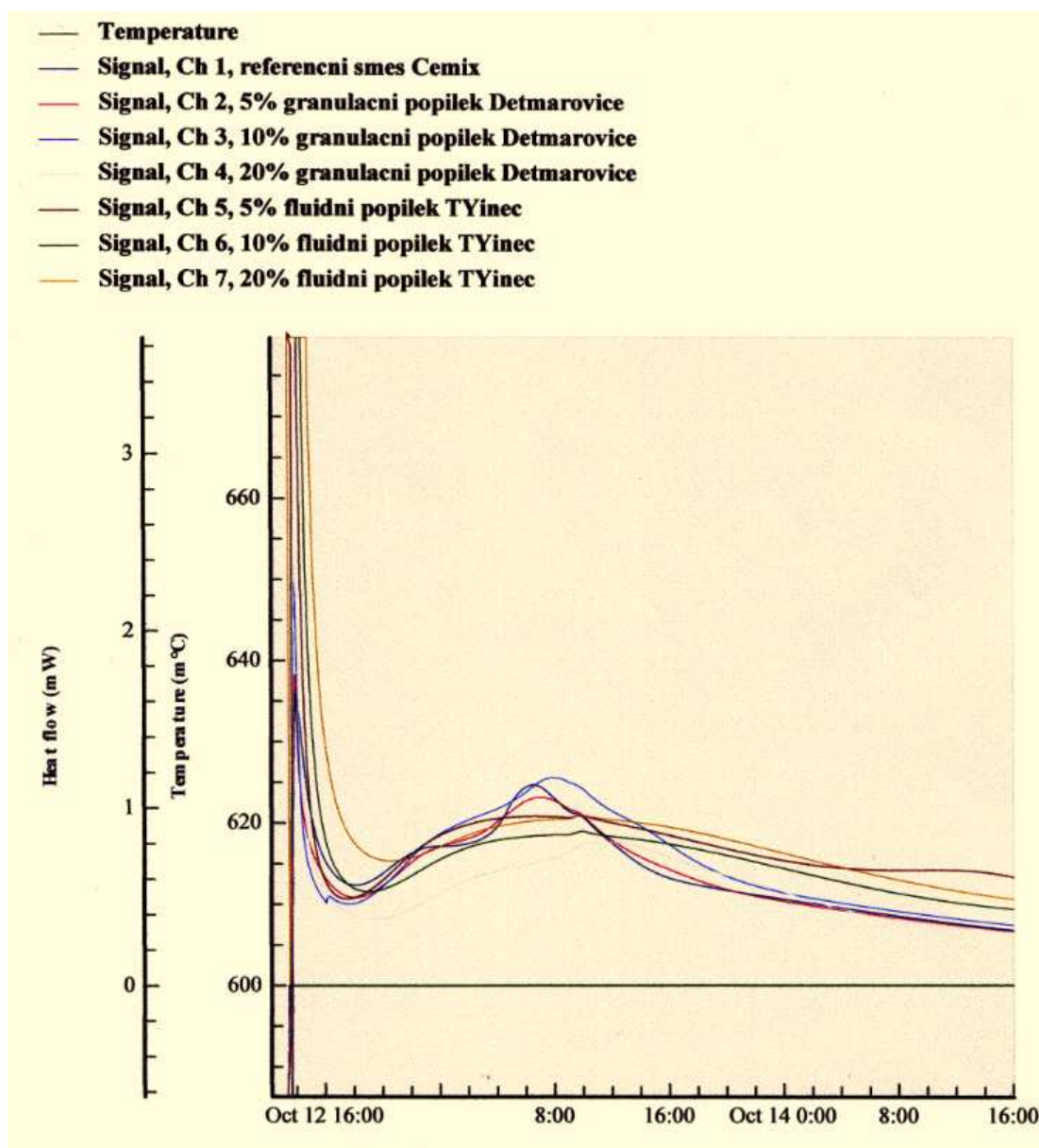
Cílem zkoušky bylo pomocí vzniklých charakteristických křivek průběhů hydratace, po 2 dnech umístěných v kalorimetru, stanovit vlastnosti zkoumaných reaktivních směsí. Na základě grafického znázornění křivek a jejich porovnání můžeme provést kvalitativní zhodnocení.

Obr. 31. Kalorimetr s připravenými vzorky



Křivky charakterizující směsi s přidavkem granulačních popílků mají strmější nárůst druhé části hydratační křivky. Nárůst počátečních pevností by tedy měl proběhnout rychleji než u směsi referenční a směsí s popílkem fluidními. Počátek tuhnutí je na hydratační křivce roven jejímu minimu. Referenční vzorek má tedy počátek tuhnutí přibližně po 150 minutách. Shodný počátek tuhnutí mají 5% fluidní popílkem. U 5 a 10% zastoupení granulačních popílků nastává počátek tuhnutí dříve než u referenční směsi a to přibližně o 15 minut. Směsi s 10% fluidy a 20% granuláty mají počátek vůči referenční směsi opožděný o zhruba 40 minut. Nejhorší dopadly směsi s 20% fluidním popílkem, které mají počátek opožděný o 2 hodiny.

Graf 9. Kalorimetrické křivky jednotlivých zkoumaných receptur

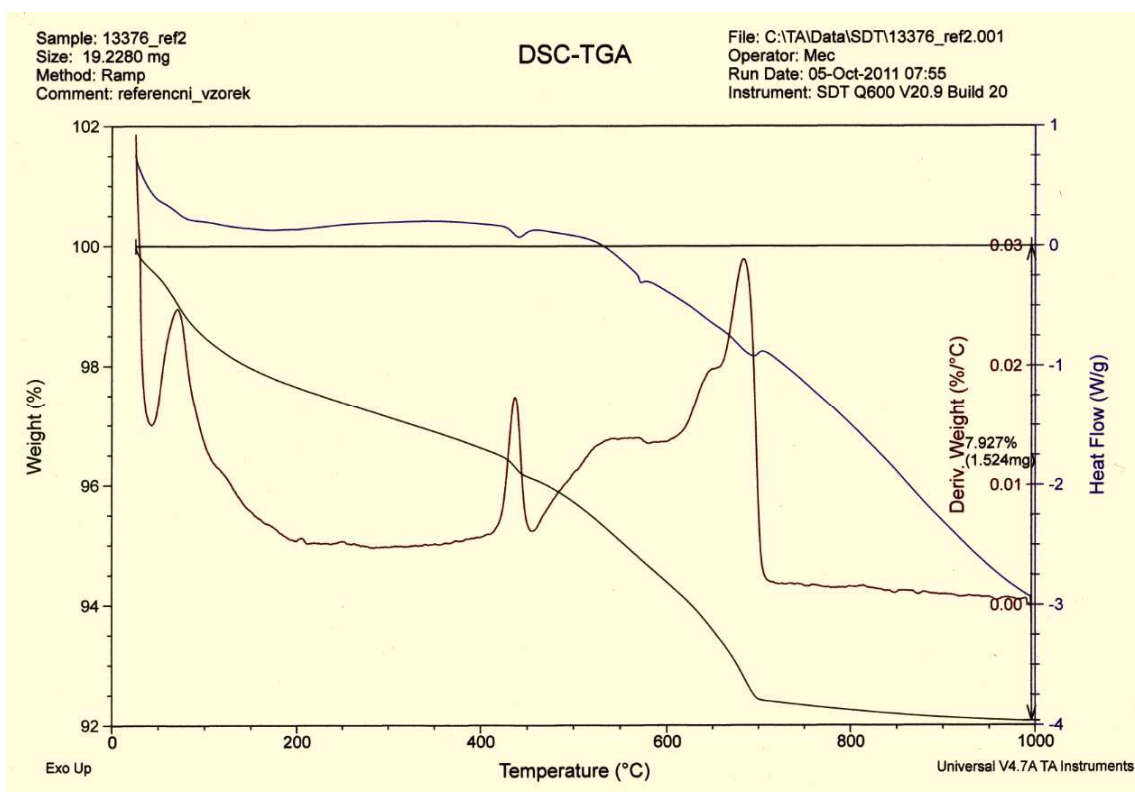


Záznamy z kalorimetrické zkoušky přístrojem TAM Air jsou uvedeny v příloze [13].

Diferenciální termická analýza (DTA)/Termogravimetrie (TG)

Zkouška byla prováděna v laboratoři termické analýzy a reometrie za pomoci institutu ICT. Grafy a jejich vyhodnocení jsou součástí přílohy [14], [18].

Graf 10. DTA/TG analýza referenčního vzorku – 100% cementového potěru

Stanovení pH výluhu

Tab. 18. Změna hladiny pH v čase

druh vzorku	pH vzorků 4 hodiny po namíchání	pH vzorků 3 měsíce od namíchání
Referenční (100% cem. pot.)	12,111	12,196
20% náhrada gr. popílkem	11,340	11,517
20% náhrada fl. popílkem	11,450	11,596

Mírně zvýšená hodnota pH je výsledkem dokončené hydratační reakce při které dochází k převedení volných iontů do forem méně rozpustných (obvykle hydroxidů).

Obr. 32. Ph metr 330i WTW



Stanovení odparku

Po smíchání vysušeného popílku s vodou se vzniklá suspenze zvážíla a vysušila při 60°C až do pevného zbytku.

100g granulačního popílku → smíchání s vodou, vysušení a zvážení → 101,3g

100g fluidního popílku → smíchání s vodou, vysušení a zvážení → 111,7g

Touto zkouškou byla ověřena potřeba mnohem většího množství vody u fluidních popílků při hydratační reakci, oproti popílkům granulačním.

5.4 Vyhodnocení mechanických vlastností

Před každou zkouškou mechanických vlastností byly jednotlivé vzorky změřeny a zváženy. Z těchto naměřených hodnot se vypočítaly objemové hmotnosti jednotlivých druhů směsí.

Tab. 19. Vývoj objemových hmotností v čase

Druh vzorku	Objemová hmotnost vzorku po 2 dnech ρ_0 [kg/m ³]	Objemová hmotnost vzorku po 7 dnech ρ_0 [kg/m ³]	Objemová hmotnost vzorku po 28 dnech ρ_0 [kg/m ³]
1.	1768	1789	1792
2.	1765	1808	1823
3.	1750	1808	1843
4.	1808	1867	1888
5.	1846	1893	1978
6.	1749	1784	1800
7.	1661	1701	1769

Jednotlivé zkoušky pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku, byly na zatvrdlých zkušebních vzorcích prováděny po 2, 7, 28 dnech, 3, 4, 5 a 6 měsících od namíchání.

Při stanovení mrazuvzdornosti byly vzorky podrobeny jednotlivým cyklům až do rozpadu vzorků. Předpokládaný počet 100 cyklů nebyl dodržen z důvodu rozpadu vzorků po 75 cyklech.

Před vyhodnocením výsledných pevností v grafech byla provedena oprava výpočtem statistické charakteristiky náhodného výběru (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient) tak, aby bylo splněno, že všechny pevnosti odpovídající směsi leží v intervalu $X \pm 3s$.

Použité vzorce:

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

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

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

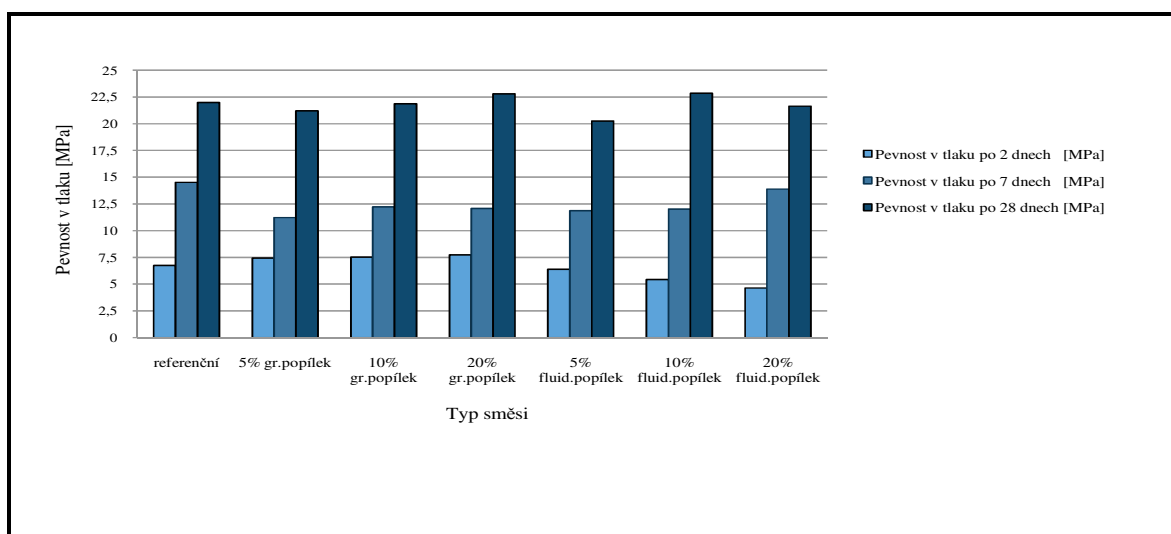
$$\text{Variační koeficient: } v = \frac{s}{X} * 100 \quad [\%]$$

Zkouška pevnosti v tlaku

Tab. 20. Naměřené pevnosti v tlaku po 2, 7 a 28 dnech

Pevnost v tlaku (průměrná opravená hodnota) [MPa]	Pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]
Druh vzorku			
referenční	6,76	14,51	21,98
5% gr. popílek	7,45	11,22	21,20
10% gr. popílek	7,53	12,22	21,86
20% gr. popílek	7,75	12,08	22,79
5% fluid. popílek	6,41	11,87	20,25
10% fluid. popílek	5,43	12,02	22,85
20% fluid. popílek	4,63	13,89	21,63

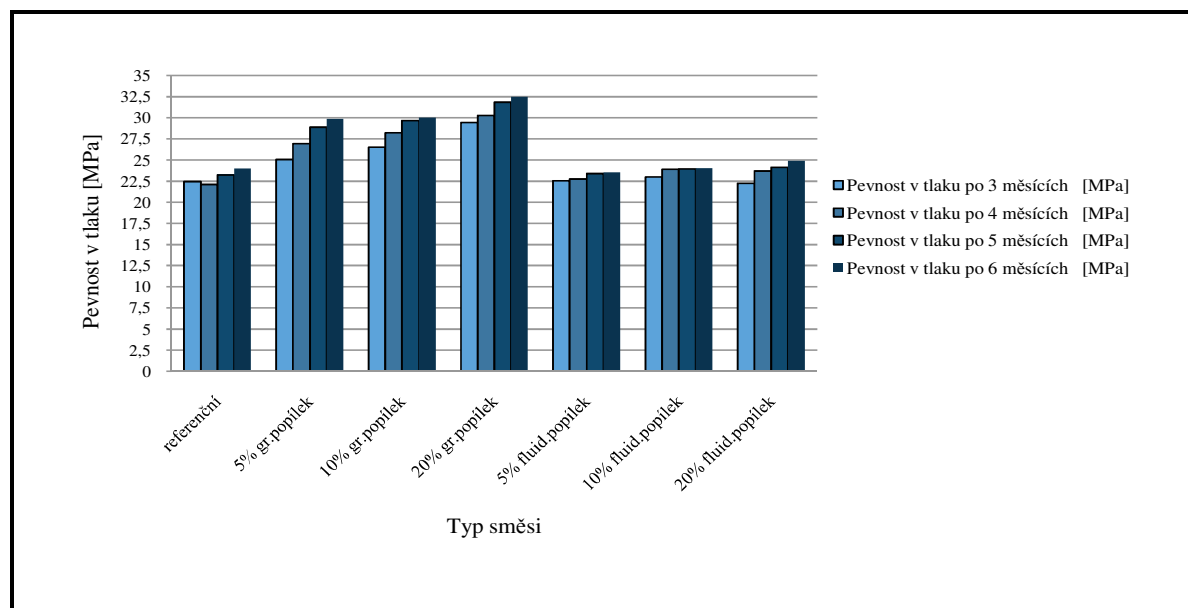
Graf 11. Nárůst pevností v tlaku u jednotlivých vzorků po 2, 7 a 28 dnech



Tab. 21. Naměřené pevnosti v tlaku po 3, 4 a 5 a 6 měsících

Pevnost v tlaku (průměrná opravená hodnota) [MPa]	Pevnost v tlaku po 3 měsících [MPa]	Pevnost v tlaku po 4 měsících [MPa]	Pevnost v tlaku po 5 měsících [MPa]	Pevnost v tlaku po 6 měsících [MPa]
Druh vzorku				
referenční	22,45	22,11	23,24	24,00
5% gr. popílek	25,05	26,94	28,90	29,89
10% gr. popílek	26,51	28,23	29,68	30,02
20% gr. popílek	29,44	30,27	31,85	32,49
5% fluid. popílek	22,55	22,75	23,41	23,54
10% fluid. popílek	23,01	23,92	23,94	24,04
20% fluid. popílek	22,26	23,71	24,16	24,88

Graf 12. Nárůst pevností v tlaku u jednotlivých vzorků po 3, 4, 5 a 6 měsících



U všech směsí s přísádky granulačních popílků můžeme pozorovat rychlejší nárůst počátečních pevností oproti vzorku referenčnímu. Tato vlastnost je zapříčiněna vyšším obsahem sklovité fáze, která se zásadním způsobem podílí na reaktivitě popílků s CaO. Vyšší hodnoty vykazují i všechny ostatní vzorky při porovnání dlouhodobých pevností. Oproti tomu receptury s přísádky fluidních popílků vykazují nižší počáteční pevnosti, avšak po

pomalejším náběhu dochází po delší době (28 dnech) k vyrovnání pevností s hodnotami referenční směsi. Tato vlastnost je způsobena vyšším obsahem volného CaO.

Zkouška mrazuvzdornosti

Při zkoušce mrazuvzdornosti bylo předpokládáno, že budou vzorky vystaveny stu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů rozdělených do 4 etap. Po 3 etapě však vzorky vykazovaly již značnou míru porušení a v podstatě nulové hodnoty pevností.

Po prvních 25 cyklech nebyly rozdíly v pevnostech v tahu za ohybu všech vzorků nijak zvlášť významné, nicméně byla u směsí s fluidními popílků pozorována zvyšující se odolnost vůči zmrazovacím cyklům. U směsí s 20% podílem granulačních popílků byl pozorován vznik jemných trhlinek na povrchu o délce 5 mm a hloubce max. 2 mm.

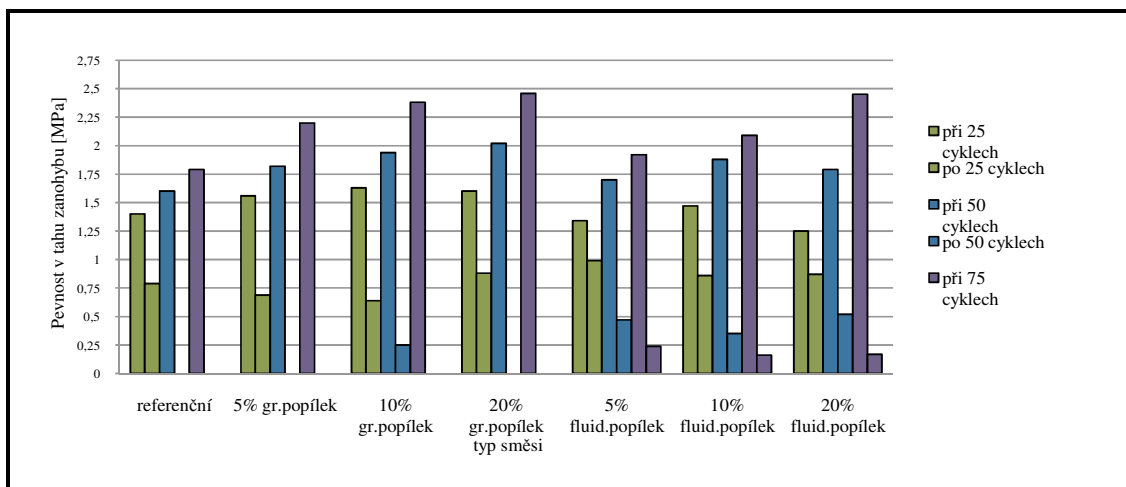
Po provedených 50 cyklech vykazovaly nejlepší pevností opět všechny směsi s fluidními popílků. U směsí s 10% podílem fl. popílků již ale byla pozorována spleť jemných trhlinek na povrchu. Pevnosti ostatních směsí s výjimkou 10% zastoupení granulačních popílků již vykazovaly velmi malé až neměřitelné hodnoty pevností. U těchto směsí už nedocházelo ke vzniku trhlin, ale rovnou k opadávání celých stěn.

75 cyklů vydržely pouze fluidní směsi všech procentuálních zastoupení, avšak již s velmi malými pevnostmi a opadanými rohy trámečků. Po 100 cyklech již i tyto vzorky dosáhly úplného stupně rozkladu.

Obr. 33, 34, 35. Vývoj vlivu mrazu a rozmrazování na trámečky s 10% podílem fluidních popílků po 25, 50 a 75 cyklech



Graf 13. Naměřené diference mezi pevnostmi v tahu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti a referenčních vzorků z vlhkostní skříně



Po vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti se vyjádřil tzv. součinitel mrazuvzdornosti malty, jako poměr aritmetického průměru hodnot pevností v tahu za ohybu trámečků zmrazovaných k aritmetickému průměru hodnot pevností v tahu za ohybu porovnávacích trámečků uložených ve vlhkostní skříně.

Malta je považována za mrazuvzdornou na ten počet zmrazovacích cyklů, u kterých pokles pevnosti zmrazovaných vzorků proti pevnostem porovnávacích vzorků nepřesáhne 25 % pevnosti porovnávacích vzorků.

Tab. 22. Součinitel mrazuvzdornosti vůči porovnávacím vzorkům

	25	50	75
referenční	56%	/	/
5% gr.popílek	44%	/	/
10% gr.popílek	39%	13%	/
20% gr.popílek	55%	/	/
5% fluid.popílek	74%	28%	13%
10% fluid.popílek	59%	19%	8%
20% fluid.popílek	70%	29%	7%

Na základě této tabulky tedy můžeme konstatovat, že nárokům stanoveným normou pro pokles součinitele mrazuvzdornost nevyhověla žádná z uvedených receptur. Pro příští

zkoušky je třeba volit menší počet mrazuvzdorných cyklů a jejich nižší rozpětí (např. 7, 14, 21). Z uvedených výsledků je však patrná daleko vyšší mrazuvzdornost fluidních popílků vůči popílkům granulačním i vůči samotnému referenčnímu vzorku.

Obr. 36. Výsledek zkoušky mrazuvzdornosti po 75 cyklech



2. ČÁST – SMĚSI PRO STABILIZOVANÉ PODKLADY

5.5 Vyhodnocení fyzikálních vlastností

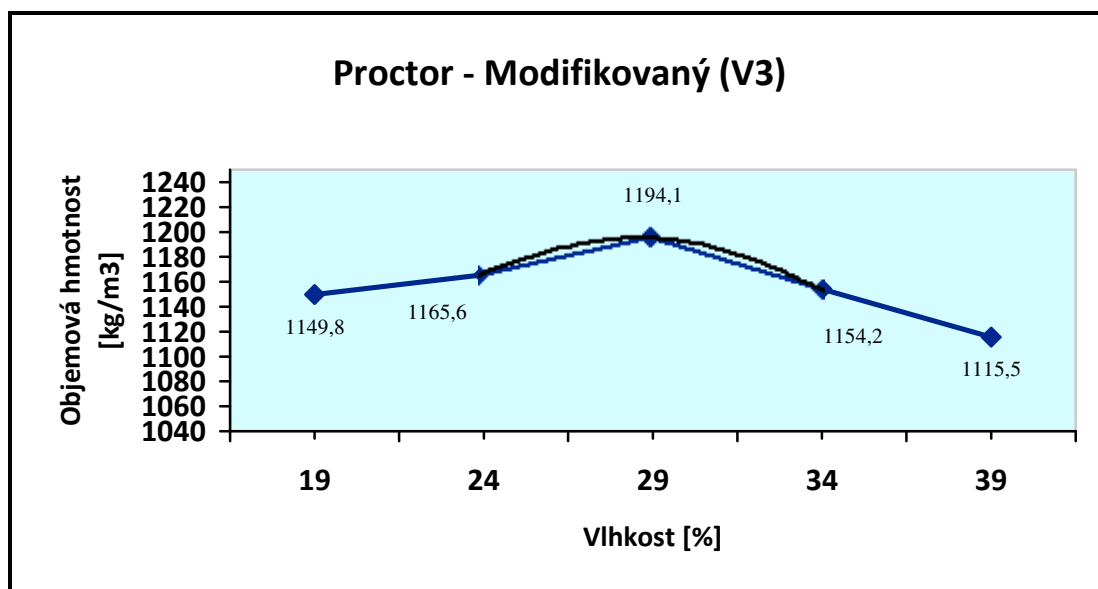
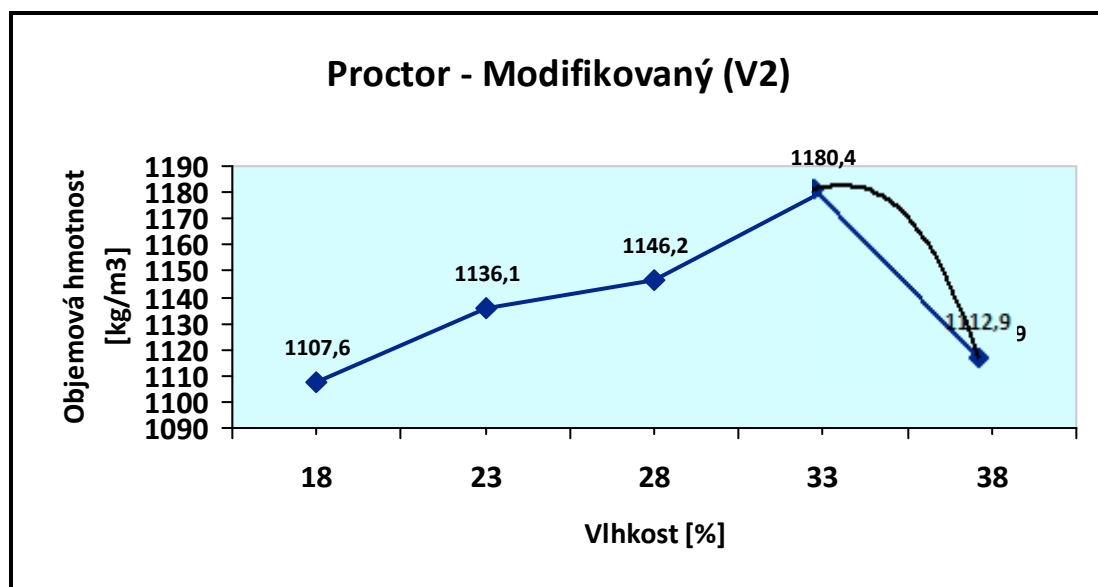
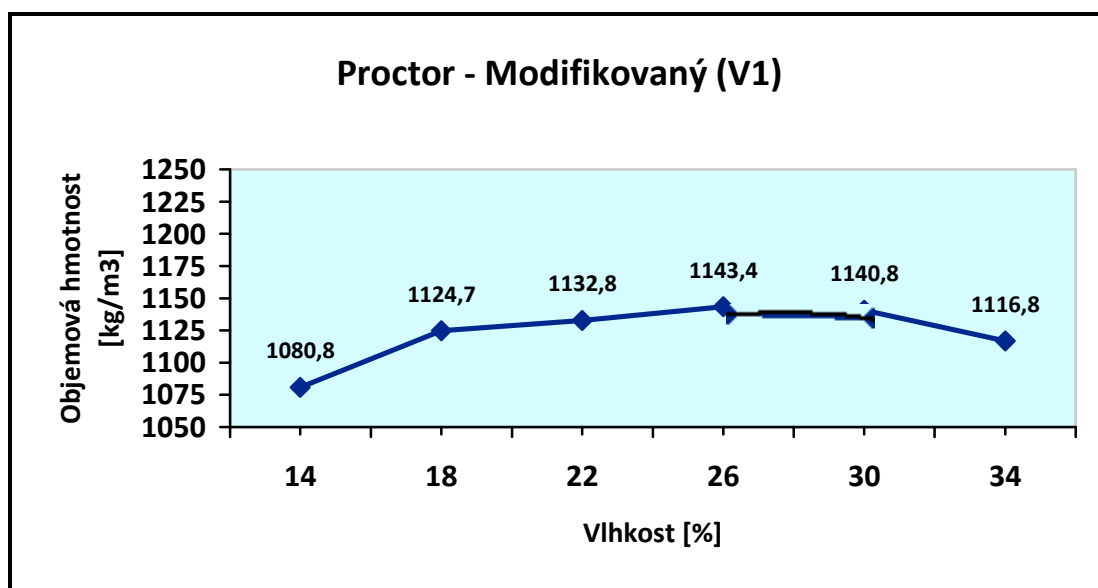
Proctorova zkouška zhutnitelnosti zemin

Vyhodnocení zhutnitelnosti jednotlivých zemin proběhlo pomocí Proctorovy zkoušky, kdy byl využit přístroj Proctor – Modifikovaný dle normy ČSN 72 10 15.

Obr. 37. Vzorek po Proctorově zkoušce



Graf 14, 15, 16. Stanovení zhutnitelnosti zemin



Jednotlivé hodnoty v grafech charakterizují vztah závislosti vlhkosti w na objemové hmotnosti. Proložená křivka nám udává vrchol, který symbolizuje hodnotu optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti. Těchto hodnot musí být dosaženo po zamíchání a zhutnění prověřovaných směsí. Na základě výsledků těchto zkoušek byly stanoveny receptury, resp. optimální množství rozdělovací vody, pro výrobu zkušebních těles.

Tab. 23. Vyhodnocení zkoušky zhutnitelnosti

Označení vzorku	Složení jednotlivých receptur				Proctor - Modifikovaný	
	CaO [%]	Strusko - portlandský cement [%]	Fluidní popílek el.Třinec [%]	Energosádrovec [%]	$W_{opt.}$	$\rho_{max.}$
V1	4	/	91	5	27,8	1143,6
V2	4	2	79	15	34,0	1183,4
V3	4	5	66	25	29	1194,1

5.6 Vyhodnocení mechanických vlastností

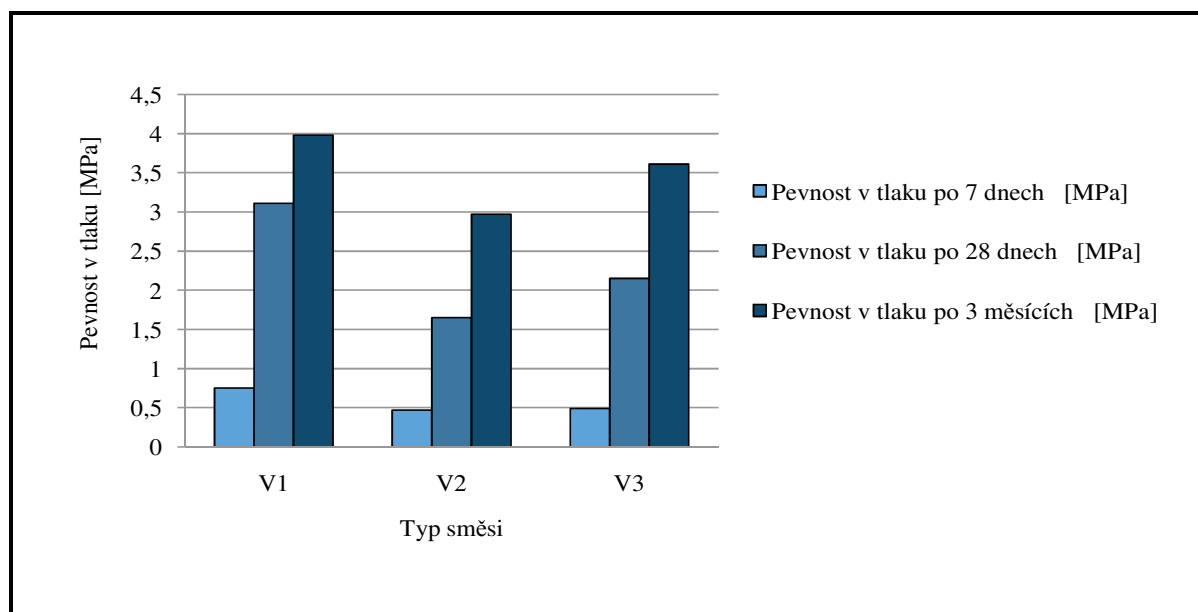
Pevnost v tlaku

Pro možné doporučení popílkového stabilizátu pro konstrukce pozemních komunikací jsou rozhodující jeho pevnosti po 28 dnech. Důležitá je především rychlost, v jaké budou potřebné normové pevnosti dosaženy, tak aby bylo možné konstrukci co nejrychleji používat. Všechny směsi dosáhly pevností, které je předurčují pro využití do jednotlivých podkladních vrstev vozovek. Směs V1 s pevností po 28 dnech 3,11 MPa splňuje požadavek horní podkladní vrstvy a třídy stabilizace I na minimální pevnost 2,5 MPa. Směs V2 s hodnotou 1,65 MPa by mohla být využita při výstavbě ochranné vrstvy třídy stabilizace S III s minimálním požadavkem na pevnost 1,0 MPa. Směs V3 s dosaženou pevností v tlaku 2,15 MPa je možné využít při třídě stabilizace S II pro spodní podkladní vrstvy s požadavkem minimální pevnosti 1,8 MPa.

Tab. 24. Vyhodnocení zkoušky pevností v tlaku

Označení vzorku	CaO [%]	Strusko - portlandský cement [%]	Fluidní popílek el.třinec [%]	Energosádrovec [%]	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 3 měsících [MPa]
V1	4	/	91	5	0,75	3,11	3,98
V2	4	2	79	15	0,47	1,65	2,97
V3	4	5	66	25	0,49	2,15	3,61

Graf 17. Vyhodnocení pevností v tlaku



Zkouška mrazuvzdornosti

Pro rozhodující zkoušku mrazuvzdornosti, jejíž výsledky jsou určující pro doporučení zkoušené směsi jsme na základě provedených zkoušek pevností v tlaku vybral všechny tři receptury, které jsou svými pevnostmi vhodné pro výstavbu podkladních vrstev vozovek. Záměsi byly podrobeny mrazuvzdorné zkoušce o 7 cyklech, při střídání mrazu teploty -15°C a následného rozmrazování při teplotě $+22^{\circ}\text{C}$.

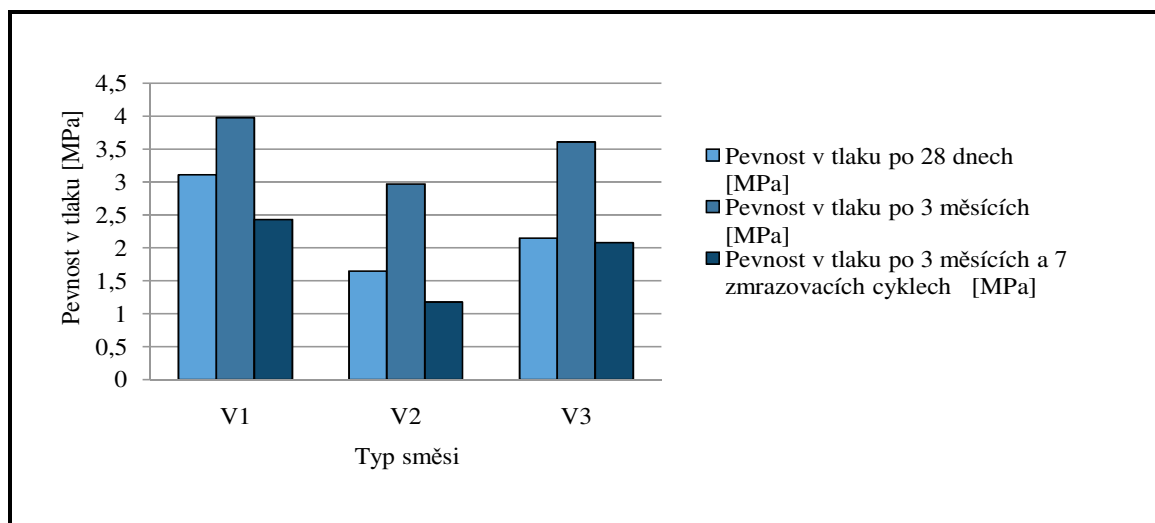
Z grafu jsou patrné poklesy pevností po provedené zkoušce. Směs V1 dosáhla nejlepších hodnot, když poklesla na pevnost 2,43 MPa což odpovídá třídě stabilizace S II s minimálním požadavkem 2,1 MPa. Směs je tedy vhodná pro spodní podkladní vrstvu při

indexu mrazu do 350 či ochrannou vrstvu s indexem mrazu 350 – 600. Na vzorku nebyla po ukončení zkoušky pozorována žádná poškození.

Směs V2 klesla na hodnotu 1,18 MPa a protože nedosáhla požadavku na minimální pevnost ani u třídy stabilizace S III, nehodí se svými mrazuvzdornými vlastnostmi pro výstavbu. U této směsi byla navíc pozorována síť trhlin a poškození v důsledku mrazu v délce 1,4 cm od povrchu.

Směs V3 měla po zkoušce pevnost 2,08 MPa a těsně se vhodností pevnosti nevešla do podmínky pro třídu stabilizace S II s 2,1 MPa. Proto je tedy vhodná pouze pro ochrannou vrstvu třídy stabilizace S III s požadavkem 1,2 MPa a návrhovým indexem mrazu 350 – 600. Na vzorku nebyla pozorována žádná poškození.

Graf 18. Vyhodnocení mrazuvzdornosti



6. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Cíl práce, skládající se ze dvou částí, při kterých bylo úkolem navrhnout a ověřit vlastnosti směsí s vhodným procentuelním zastoupením granulačních a fluidních popílků pro injektážní a stabilizační práce byl splněn.

Byly ověřeny fyzikální, mechanické i chemické vlastnosti vstupních surovin a následně i čerstvých a zatvrdlých směsí. Především výsledky zkoušek pevností a mrazuvzdornosti dokládají možnou náhradu významného množství cementu či cementového potěru daným druhotným produktem v navrhovaných recepturách. Tato skutečnost povede k jednoznačnému snížení nákladů při zachování parametrů referenční směsi. Obavy z možného kolísání dlouhodobých pevností při užití vyššího podílu popílků se nepotvrdily a receptury jsou tedy prověřeny i z dlouhodobého hlediska. Nepotvrdily se také obavy extrémně vysokého pH vodného výluhu, naopak díky popílkům došlo ke stabilizaci směsí. Pozitivní vlastnost popílků omezit negativní vliv agresivního prostředí na životnost injektážní malty je společně s dosaženými pevnostmi podkladem pro doporučení jejich možného využití v praxi. Doporučení se týká i druhé části zaměřené pouze na možné využití fluidních popílků. Výsledné hodnoty zkoušek zatvrdlých směsí vyhovují všem platným normám na jejich užití pro stabilizované podklady v silničním stavitelství.

Vzhledem k možnostem laboratoře a časovým omezením nebyla provedena všechna možná prověření směsí vhodná pro celkové doporučení v praxi. U zkoušek pro injektážní práce by bylo vhodné provést především zkoušky propustnosti, odolnosti vůči agresivnímu prostředí a ekologických zátěží na okolí po skončení jeho užitné trvanlivosti v důsledku vyluhovatelnosti toxických kovů. U směsí pro stabilizované podklady by bylo vhodné stanovit především poměr únosnosti zeminy (CBR), míru její namrzavosti a bobtnání směsí.

Možné využití směsí s podíly druhotných průmyslových produktů je třeba vždy pečlivě uvážit v závislosti na místě použití a podmínkách, které zde panují s vlastnostmi, kterých je potřeba docílit.

7. ZÁVĚR

Obecně známou nevýhodou zpracování odpadů jakožto druhotných surovin je rozličnost jejich složení jak z hlediska chemického, tak mineralogického. Tato vlastnost je typická pro provozovny, ve kterých vznikají (především v závislosti na konstrukci topeniště, řízení postupu spalování či rozdílné lokalitě těžby uhlí), avšak složení je proměnlivé v čase i pro jednu konkrétní provozovnu (v závislosti na objemových podílech právě spalovaných surovin). Z tohoto důvodu je důležité sledovat průběžné vlastnosti využívaných druhotných surovin a případně korigovat jejich vlastnosti tak, abychom dosáhli konstantních fyzikálně – mechanických a chemických parametrů finálního výrobku, kterým je kvalitní stavební materiál.

Seznam tabulek

Tab. 1. Technické parametry strusko – portlandského cementu	9
Tab. 2. Technické parametry vzdušného vápna	10
Tab. 3. Technické parametry energosádrovce	10
Tab. 4. Charakteristika kotlů pro spalování uhlí	11
Tab. 5. Chemické složení popílků vznikajících při klasickém a fluidním spalování	11
Tab. 6. Charakteristické chemické složení fluidních popílků vznikajících při spalování černého a hnědého uhlí	14
Tab. 7. Měrná hmotnost vstupních surovin	20
Tab. 8. Předepsané hodnoty rozlití dle ČSN EN 1015-2	23
Tab. 9. Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty	24
Tab. 10. Složky, jejich použití a normové nároky pevností jednotlivých vrstev	34
Tab. 11. Požadavky na teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování popílkového stabilizátu dle normy ČSN 73 61 25	35
Tab. 12. Požadavky na pevnost a odolnost proti mrazu popílkového stabilizátu dle normy ČSN 73 61 25	35
Tab. 13. Navrhované složení jednotlivých receptur	37
Tab. 14. Měrné hmotnosti vstupních materiálů	41
Tab. 15. Zrnitostní rozbor granulačního popílku el. Dětmarovice	41
Tab. 16. Zrnitostní rozbor fluidního popílku el. Třinec	42
Tab. 17. Receptury popílko – cementových směsí a jejich základní fyzikální vlastnosti	45
Tab. 18. Změna hladiny pH v čase	48
Tab. 19. Vývoj objemových hmotností v čase	50
Tab. 20. Naměřené pevnosti v tlaku po 2, 7 a 28 dnech	51
Tab. 21. Naměřené pevnosti v tlaku po 3, 4 a 5 a 6 měsících	52
Tab. 22. Součinitelé mrazuvzdornosti vůči porovnávacím vzorkům	54
Tab. 23. Vyhodnocení zkoušky zhutnitelnosti	57
Tab. 24. Vyhodnocení zkoušky pevností v tlaku	58

Seznam grafů

Graf 1. Využití popílku jako prevence v podzemních dolech Ostravsko – karvinského revíru mezi lety 1980 – 2008	5
Graf 2. Produkce odpadů z termických procesů v Evropské unii v roce 2006	6
Graf 3. Nejčastěji stabilizované kovy a jejich zastoupení v projektech	8
Graf 4. Křivka hydratace portlandského slínku při vodním součiniteli $w = 0,5$	26
Graf 5. Křivka zrnitosti granulačního popílku el. Dětmovice	42
Graf 6. Křivka zrnitosti fluidního popílku el. Třinec	43
Graf 7. Křivka zrnitosti energosádrovce el. Dětmovice	43
Graf 8. Srovnání detailních křivek zrnitosti extrémně jemných částic u vstupních materiálů	44
Graf 9. Kalorimetrické křivky jednotlivých zkoumaných receptur	47
Graf 10. DTA/TG analýza referenčního vzorku – 100% cementového potěru	48
Graf 11. Nárůst pevností v tlaku u jednotlivých vzorků po 2, 7 a 28 dnech	51
Graf 12. Nárůst pevností v tlaku u jednotlivých vzorků po 3, 4, 5 a 6 měsících	52
Graf 13. Naměřené diference mezi pevnostmi v tahu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti a referenčních vzorků z vlhkostní skříně	54
Graf 14, 15, 16. Stanovení zhutnitelnosti zemin	56
Graf 17. Vyhodnocení pevností v tlaku	58
Graf 18. Vyhodnocení mrazuvzdornosti	59

Seznam obrázků

Obr. 1. Zpevňování vodního díla Bystřička nízkotlakou injektáží popílko – cementovými směsmi	3
Obr. 2. Hooverova přehrada	4
Obr. 3. Množství vápna vytvořeného v popílkové maltě s různým procentuelním zastoupením popílků vyhodnocené při DTA/TG analýze	12
Obr. 4. Celkový vývin tepla u cementových směsí s příměsemi během hydratace vyhodnocené při DTA/TG analýze	12
Obr. 5. Technologické schéma kotlů s fluidním spalováním	15
Obr. 6. Plán pracovního postupu	16
Obr. 7. Injektování dutin v hrázi přes injektážní vrty	18
Obr. 8. Pyknometrická zkouška	20
Obr. 9. Rozlití cementové směsi na střešacím stolku	23
Obr. 10. Tlakoměrný přístroj	24
Obr. 11. TAM Air 8-Channel Calorimeter	26
Obr. 12. Popis křivky DTA	27
Obr. 13. Křivky DTA některých minerálů	28
Obr. 14. Přístroj SDT Q600 pro DTA/TG analýzu	28
Obr. 15. Křivka TG a křivka derivační	29
Obr. 16. Vyluhování injektážních směsí	30
Obr. 17. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	31
Obr. 18. Zkouška pevnosti v tlaku	32
Obr. 19. Grafické schéma návaznosti jednotlivých vrstev konstrukce vozovky	34
Obr. 20. Grafické schéma uspořádání konstrukčních vrstev pozemní komunikace	35
Obr. 21. Grafické schéma využití popílkového stabilizátu v konstrukci násypu	36
Obr. 22. Solidifikační mísírna: Plnicí pásový dopravník, váha popílku, míchačka STASIS RTM-750 a odprašovací filtrem	36
Obr. 23. Solidifikační mísírna SO-500.2:Násypka s pásovým podavačem a tenzometrickou váhou, váha vápna, plnicí pásový dopravník	36
Obr. 24. Rozprostírání stabilizátu na zhutněnou pláň	37
Obr. 25. Navážení a rozprostírání materiálu druhé vrstvy	37
Obr. 26. Hutnění druhé vrstvy stabilizátu vibračním válcem STAVOSTROJ	37
Obr. 27. Příprava provedení zatěžovací zkoušky, zhutněné vrstvy stabilizátu	37

Obr. 28. Proctor modifikovaný pro zkoušku zhutnitelnosti zemin	39
Obr. 29. Zrnitostní zkouška kombinovaná s praním	43
Obr. 30. Laserový analyzátor velikosti částic firmy Fritsch, Analysette 22	44
Obr. 31. Kalorimetr s připravenými vzorky	46
Obr. 32. Ph metr 330i WTW	49
Obr. 33. Vývoj vlivu mrazu a rozmrazování na trámečky s 10% podílem fluidních popílků po 25 cyklech	53
Obr. 34. Vývoj vlivu mrazu a rozmrazování na trámečky s 10% podílem fluidních popílků po 50 cyklech	53
Obr. 35. Vývoj vlivu mrazu a rozmrazování na trámečky s 10% podílem fluidních popílků po 75 cyklech	53
Obr. 36. Výsledek zkoušky mrazuvzdornosti po 75 cyklech	55
Obr. 37. Vzorek po Proctorově zkoušce	55

Seznam literatury

- [1] Daněk, Thomas, Slivka, *Výroba rekultivačně sanačních a stavebně výplňových hmot na bázi vedlejších energetických produktů a dalších aditiv*, Ostrava, 2011
- [2] Drochytka, *Výzkum a vývoj nových materiálů z odpadních surovin a zajištění jejich vyšší trvanlivosti ve stavebních konstrukcích: "Vývoj hmot a jejich aplikace"*, VUT Brno, 1999
- [3] Fečko, Kušnierová, Čablík, Pečtová, *Environmentální biotechnologie*, Hornicko – Geologická fakulta VŠB, Ostrava, 2004
- [4] Hlavatá, Miluše, *Odpadové hospodářství*, Hornicko – Geologická fakulta VŠB, Ostrava, 2004
- [5] Juchelková, Dagmar, *Likvidace a využití odpadů*, Fakulta strojní VŠB, Ostrava, 2004
- [6] Juchelková, Fibinger, Míka, *Metody nakládání s odpady*, Fakulta strojní VŠB, Ostrava 1996
- [7] Khestl, F., *Modifikace vlastností a zvyšování trvanlivosti cementotřískových desek aplikací druhotných surovin*, VUT Brno, 2011
- [7] Kuraš, kolektiv, *Odpady, jejich využití a zneškodňování*, VŠCHT Praha, 1994
- [8] Kutzner, Christian, *Grouting of rock and soil*, Rotterdam, 1996
- [9] Medvecová, J., Mužík, P., *Nová surovina – fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín*, VUT FAST, Brno, 2007
- [10] Mencl, Vojtěch, *Vyjádření k vývoji komplexního injektážního zařízení a funkčním zkouškám prototypu aktivační míchačky AM200*, Ostrava 2009
- [11] Mooseley, M.P.; Kirsch, K., *Ground improvement*, Spon Press, 2004
- [12] Noskievič, Pavel, *Spalování uhlí*, Fakulta strojní VŠB, Ostrava, 2005
- [13] Novotný, Pavel, *Fluidní spalování tuhých a kapalných paliv a odpadů*, Ústav pro výzkum a využití paliv, Běchovice, 1969
- [14] Ramachandran, V. S., Paroli, R., Beaudoin, J., Delgado, A., *Thermal analysis of construction materials*, William Andrew Publishing/Noyes, 2002
- [14] Rosik – Dulewska, *Waste recycling*, Polish academy of sciences, Krakow, 2005
- [15] Slivka, Dirner, Kuroš, *Odpadové hospodářství I. + II.(Ukládání do podzemních prostor)*, VŠB – TUO, Ministerstvo životního prostředí, 2007
- [16] Verfel, Jaroslav, *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*, Bratislava, 1992
- [17] Sborník přednášek ze semináře: *Nové materiály pro liniové stavby, využití druhotných surovin*, Precheza, Dalkia, Brno, 2007

- [18] Klika, Martinec, *Analytické metody v Geochemii*, Hornicko – Geologická fakulta VŠB, Ostrava, 1982
- [28] http://www.arasm.cz/info/Sbornik_2006.pdf
- [29] <http://www.envirmine.cz/>
- [30] http://www.fast.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fast/navod_do_cviceni_ze_stavebnich_hmot.pdf
- [31] <http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/23.pdf>
- [32] http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Matulova_Pavla_CL.pdf
- [33] http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/04_Fyzikalni%20a%20stavebne%20materialove%20inzenyrstvi/4_02_Nove%20stavebni%20hmoty/Marsalova_Jana.pdf
- [34] <http://slon.diamo.cz/hpvt/2008/sanace/S06.pdf>
- [35] <http://www.polycomp.cz/>
- [36] http://www.vustah.cz/vezpom/to4/2007_Sulovsky.pdf
- [37] <http://news.directindustry.com/press/fritsch/new-laser-particle-sizer-analysette-22-nanotec-plus-15376-349000.html>
- [38] <http://www.koexpro.cz/>
- [39] http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [40] http://www.vustah.cz/vezpom/to4/2007_Sulovsky.pdf
- [41] <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>
- [42] <http://www.zachranar.cz/>
- [43] <http://www.heidelbergcement.cz/cement/index.php?idp=41>
- [44] http://www.kotouc.cz/produkt_vapno.php?q=vapno_mlete
- [45] <http://www.cez.cz>
- [46] http://sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha8_Termanal.pdf

Seznam příloh

- [1] Technický list – Cementový potěr C25j
- [2] Technický list – Strusko – portandský cement CEM II/B – S 32,5 R
- [3] Technický list – Vzdušné vápno CL90 – Q
- [4] Model procesu a činností diplomové práce
- [5] Fotky z průběhu pyknometrické zkoušky
- [6] Aktivační míchačka
- [7] Diferenční mikrok calorimetr DIK 04
- [8] Parametry izotermického kalorimetru TAM Air
- [9] Vyhodnocení průběhu hydratační křivky
- [10] Fotka zkoušky stanovení odparku
- [11] Detail Proctorova zařízení pro zkoušku zhutnitelnosti
- [12] Grafy vyhodnocených křivek zrnitosti extrémně jemných částic
- [13] Záznamy z kalorimetrické zkoušky přístrojem TAM Air
- [14] Grafy a vyhodnocení jednotlivých receptur po DTA/TG analýze

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Petru Martincovi, CSc. za vedení a odbornému konzultantovi panu Ing. Jiřímu Šafratovi za cenné připomínky. Poděkování patří také laboratoři termické analýzy a reometrie, projektu ICT – Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin a laboratoři stavebních hmot Fakulty stavební VŠB za ochotu a spolupráci při provádění experimentální části diplomové práce.