

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE – FAKULTA STAVEBNÍ**  
Bakalářský studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY  
Katedra: KATEDRA MECHANIKY

---



# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vlastnosti malt s příměsí elektrárenského popílku

Nikolas Domín

vedoucí práce: Ing. Pavel Padevět, PhD.

2012 ČVUT v Praze



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

studijní program: SI

studijní obor: K

akademický rok: 2011/2012

Jméno a příjmení studenta: Nikolas Doviň

Zadávací katedra: K 132

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Padevět

Název bakalářské práce: Vlastnosti malt s příměsí dehtokreukého popílku.

Název bakalářské práce  
v anglickém jazyce

Mortar properties with addition of fly-ash.

Rámcový obsah bakalářské práce: Zjištění materiálůch vlastností

cementových, vápno cementových malt a jejich variant s  
příměsí popílku.

Datum zadání bakalářské práce: 24.2.2012

Termín odevzdání: 11.5.2012

(vyplňte poslední den výuky  
příslušného semestru)

Pokud student neodevzdal bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu bakalářskou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998. (SZŘ ČVUT čl. 21, odst. 4)

*Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Vodař  
vedoucí bakalářské práce

J. J. J.  
vedoucí katedry

Zadání bakalářské práce převzal dne: \_\_\_\_\_

D. J.  
student

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x student, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání BP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se BP do databáze KOS.

BP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student BP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci studijních programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č.81/2005 Sb., autorský zákon.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne 11. 5. 2012

## Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Padevětovi, PhD. za konzultace, pomoc a užitečné rady při vedení bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Ondřeji Zobalovi a Ing. Petru Bittnarovi za pomoc při výrobě vzorků a samotném měření. Můj dík patří také Michalu Němcovi za tvorbu aplikace pro rychlejší zpracování dat z měření.

## **SOUHRN**

Tato práce se zabývá použitím popílku jako příměsi do vápenocementových malt. Cílem je experimentálně ověřit vlastnosti ztvrdlé vápenocementové malty s příměsí popílku a porovnat je s vlastnostmi samotné směsi vápna a cementu. Úvod práce je věnován problematice nakládání s průmyslovými odpady; důraz je kladen na tuhé produkty spalování, především popílky. Teoretická část obsahuje obecné informace o maltách, jejich složení a elektrárenských popílcích a jejich vlastnostech. Experimentální část popisuje metodiku výroby a zkoušení vzorků a postup vyhodnocování výsledků. Výsledky zanesené do tabulek a grafů jsou uvedeny v další kapitole. Závěr je věnován zobecnění získaných poznatků a celkovému zhodnocení úspěšnosti práce.

## **SUMMARY**

This thesis deals with the use of fly ash as an admixture to cement-lime mortars. The aim is to experimentally verify the properties of hardened cement-lime mortar with an admixture of fly ash and to compare them with those of actual mixture of lime and cement. The introduction is devoted to the issue of management of industrial wastes; emphasis is placed on the solid combustion products, particularly fly ash. The theoretical part contains general information about mortars, their composition and fly ashes and their properties. The experimental part describes the method of making and testing of samples and the evaluation of the results. The results entered in tables and graphs are presented in the next chapter. The conclusion is devoted to the generalization of obtained knowledge and overall evaluation of the success of the thesis.

Studijní obor:           Konstrukce a dopravní stavby  
Bakalář:                 Nikolas Domín  
Vedoucí práce:        Ing. Pavel Padevět, PhD.  
Konzultant:             Ing. Pavel Padevět, PhD.  
Práce odevzdána dne: .....11. 5. 2012 v Praze.....

# OBSAH

<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Teoretická část</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Malta</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Historie malt a betonů.....	9
2.1.2 Složení malt .....	10
2.1.3 Vzdušné vápno.....	11
2.1.4 Hydraulické vápno .....	12
2.1.5 Cement .....	13
2.1.6 Zkoušení malt .....	15
<b>2.2 Elektrárenský popílek</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Původ popílku .....	16
2.2.2 Vlastnosti popílků.....	17
2.2.3 Využití popílků v betonech.....	17
2.2.4 Aktivita popílku v hydratačním procesu v betonu.....	19
<b>3 Experimentální část</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Výroba těles</b> .....	<b>21</b>
3.1.1 Použité suroviny .....	21
3.1.2 Průběh výroby.....	22
3.1.3 Vyrobená tělesa.....	23
<b>3.2 Měření</b> .....	<b>24</b>
3.2.1 Rozměry a hmotnost .....	24
3.2.2 Jednoosá tlaková zkouška .....	24
3.2.3 Tříbodová zkouška tahu za ohybu .....	25
<b>3.3 Vyhodnocování</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 Vyřazení vzorků z vyhodnocování výsledků.....	25
3.3.2 Statistika – aritmetický průměr, směrodatná odchylka.....	26
3.3.3 Objemová hmotnost.....	26
3.3.4 Nasákavost .....	26
3.3.4 Pevnost v tlaku.....	26
3.3.5 Modul pružnosti.....	26
3.3.6 Pevnost v tahu za ohybu .....	27
3.3.7 Lomová energie .....	28
<b>4 Výsledky</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 Výsledky fáze 1</b> .....	<b>29</b>

4.1.1 Objemová hmotnost.....	29
4.1.2 Pevnost v tlaku.....	30
4.1.3 Pevnost v tahu za ohybu .....	31
<b>4.2 Výsledky fáze 2.....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Objemová hmotnost.....	32
4.2.2 Nasákavost .....	33
4.2.3 Pevnost v tlaku.....	34
4.2.4 Modul pružnosti.....	35
4.2.5 Pevnost v tahu za ohybu .....	36
4.2.6 Lomová energie .....	38
<b>4.3 Srovnání výsledků fází 1 a 2.....</b>	<b>40</b>
4.3.1 Objemová hmotnost.....	40
4.3.2 Pevnost v tlaku.....	41
4.3.3 Pevnost v tahu za ohybu .....	42
<b>5 Závěr.....</b>	<b>44</b>
<b>6 Seznam obrázků .....</b>	<b>47</b>
<b>7 Seznam tabulek.....</b>	<b>48</b>
<b>8 Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>49</b>

## 1 Úvod

Stoupající životní úroveň ve vyspělých zemích světa je neodmyslitelně spjata s rostoucí spotřebou. Vyšší spotřeba domácností také vede i k vyšší produkci odpadu. V globálním měřítku je však význam odpadu z domácností až druhořadý. To, co zůstává mimo zřetel veřejnosti, je průmyslový odpad z výroby. Ten je jak z hlediska celkového objemu, tak z pohledu zátěže pro životní prostředí, mnohem důležitější. V dřívějších letech končil prakticky veškerý odpad na skládkách. Rostoucí ceny za ukládání, nedostatek volných ploch a i tenčící se zásoby primárních surovin – to vše stále více směřuje k opětovnému využívání odpadu při další výrobě.

Jedním z nejvýznamnějších průmyslových odpadů v celosvětovém měřítku jsou zbytky ze spalování fosilních paliv. Elektrická energie z tepelných elektráren spalujících uhlí tvoří více než čtvrtinu světové spotřeby (v ČR více než polovinu). Česká republika se v Evropě drží na předních příčkách v produkci elektrárenských popílků v přepočtu na jednoho obyvatele. Z celkových 10 mil. tun tuhých zbytků každý rok, se však u nás využije asi jen 20% (například v USA je to skoro polovina), zbytek je deponován.

Většina využití části popílků končí ve stavebním průmyslu. Zde lze způsob využití rozdělit do dvou základních skupin: Do té první patří zpracování popílků při zemních pracích. Zlepšují zrnitost základových půd, čímž je umožněno lepší zhutnění. Dále se používají při stabilizaci násypů v dopravním stavitelství. Druhou možností využití ve stavebnictví je výroba betonů a malt s příměsí popílku. Zde mohou zastávat část plniva pro zlepšení zrnitosti, ale díky jejich hydraulicitě je možné je použít jako aktivní náhradu části pojiva, čehož se běžně využívá při výrobě směsných cementů.

Univerzálnímu využití popílků však brání jejich značná různorodost, co se týče chemického složení. Ta se odvíjí jak od použitého paliva, tak od způsobu spalování. Směs paliva v elektrárně se podřizuje bezpečnosti a ekonomičnosti provozu a na kvalitu produkovaného popílku není brán ohled – stále se jedná o odpadní produkt. Dále se liší složení zbytků z vysokoteplotního spalování a popílků pocházejících ze spalování uhlí na fluidním loži. K posouzení, zda je popílek vhodný pro dané účely, jsou nutné některé chemické a technologické zkoušky, které jsou uvedeny v příslušných normách.



## 2 Teoretická část

### 2.1 Malta

Malta je směs drobného kameniva a anorganického pojiva rozmíchaná vodou na požadovanou konzistenci. Takto může být připravována přímo na staveništi, nebo lze použít k danému účelu průmyslově vyrobenou směs plniv, anorganických pojiv, příměsí a přísad, která se na staveništi pouze rozmíchá s vodou. Třetí variantou je výroba kompletní směsi v centrální výrobě a následná doprava mokré maltové směsi přímo na místo použití. [5]

Podle účelu použití se malty dělí především na malty pro zdění a malty pro omítky, dále jsou používány pro kladení dlažeb, spárování, malty používané jako zálivky a další. Kromě klasických malt s anorganickými pojivy existují i malty s makromolekulárními pojivy nebo malty jimi modifikované, malty injektážní nebo malty s vláknitou výztuží. Speciálními příměsí mohou maltám dodat žáruvzdornost, kyselinovzdornost a jiné potřebné vlastnosti. [5]

#### 2.1.1 Historie malt a betonů

První známý případ použití betonu je datován na 7000 let před naším letopočtem v Galilei v dnešním Izraeli. Nález byl objeven v roce 1985, kdy buldozer na ulici odkryl starou podlahu vyrobenou ze směsi vápna a kamenů. Vápno v kombinaci s vodou na styku se vzduchem tvrdlo a společně s kameny vytvořilo kompaktní materiál. [3]

Další nálezy jsou z Gízy v Egyptě (2500 BC), kde byla při stavbě pyramid použita malta na principu vápna a sádry. Taktéž v Egyptě – v Thébách, se nachází freska zobrazující přípravu vápenné malty a její aplikaci na stavbě. Znalost použití malt se z Egypta dostala do starověkého Řecka. První písemné zmínky z této doby přináší římský autor Vitruvius, který použil slovo „emplekton“ pro předchůdce dnešního betonu – směs vápenné malty a malých kamenů. [3]

Malty na principu vápna a vody vyžadovaly přítomnost vzdušného oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), bez jehož přístupu nemohla probíhat chemická reakce tvrdnutí malty. Starověcí Řekové byli patrně první, komu se podařilo vyrobit maltu, která tvrdla na vzduchu i pod vodou. Navíc ztvrdlá směs nebyla vodou narušována tak, jak tomu bývá u běžných

vápenných malt. Dosaženo toho bylo smícháním vápna a sopečného popílku z ostrovů Thira a Nisiros v Řecku nebo z ostrova Dikearchia (Pozzuoli) v řecké kolonii v dnešní Itálii. Tato směs měla podobné vlastnosti jako cement, a lze ji tedy považovat za předchůdce současných směsných cementů. Této malty bylo použito při stavbě vodotěsné nádrže (600 m<sup>3</sup>) v chrámu bohyně Atény na ostrově Rhodos. [3]

Z řeckých kolonií v dnešní Itálii se znalost těchto pojiv pravděpodobně dostala ke starověkým Římanům, kteří ji dovedli takřka k dokonalosti. Hydraulická pojiva na principu vápna a sopečného popílku byla využita například pro stavbu divadla v Pompejích (75 BC) s kapacitou pro 20 000 diváků a další technicky a architektonicky významné stavby, jako je Pantheon (123 BC) v Římě. Tyto malty byly také používány k utěsnění vodních rezervoárů a akvaduktů. Římané maltu různě modifikovali, čímž měnili její vlastnosti. Známe je například přimíchávání krve, která fungovala jako provzdušňovací přísada, čímž zlepšovala mrazuvzdornost materiálu, nebo koňských žíní, které zase nabízejí přirovnání k současným vláknobetonům. [3]

Ve středověku došlo k úpadku a znalosti výroby hydraulických pojiv byly zapomenuty. První významné kroky ve výrobě cementu učinil až v 18. století anglický inženýr John Smeaton, který se snažil získat vodě odolnou maltu pro stavbu majáku. Ta se mu podařila vyrobit pálením vápence s obsahem jílu. Podobného úspěchu dosáhli i Francouzi Vicat a Lasage. Farář James Parker si nechal patentovat hydraulické pojivo pod názvem „římský cement“. Dnešní název „portlandský cement“ pochází od anglického inženýra Josepha Aspdina, který sestavil nejucelenější postup výroby pojiva a svou směs pojmenoval podle barvy ztvrdlého cementu, která je podobná barvě skal v Portlandu. [3]

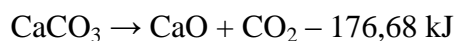
### **2.1.2 Složení malt**

Základ malty tvoří nejčastěji vápno a cement. Obě tato pojiva lze použít společně v požadovaném poměru, nebo každé zvlášť. Hlavní funkcí cementu je rychlý nárůst počáteční pevnosti, navíc je hlavním nositelem výsledné pevnosti v tlaku. Jeho nevýhoda je, že při tvrdnutí málo váže vodu, což s sebou nese riziko nadměrného smršťování a vznik trhlin. Naproti tomu vápno nedává tak vysokou tlakovou pevnost, avšak lépe váže vodu a dělá pojivový systém pružnějším. Vápno je nezastupitelné

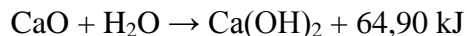
především při rekonstrukcích historických objektů, pro které jsou pojiva obsahující cement příliš tvrdá a křehká. Sádra se jako pojivo používá jen v menším rozsahu, případně ve spojení s vápnem. Jako plnivo se běžně používá písek frakce 0/4, pro výrobu stavebních dílců se používá ve stanoveném poměru s frakcí 4/8, pro jemné omítky a tenké spáry je vhodná frakce 0/1. Podle požadavků na výsledné vlastnosti je jako plnivo možné využít také granulovanou vysokopecní strusku, škváru, popílek, teracové drtě, uměle vyrobené kamenivo, granulovaný expandovaný polystyren... [5]

### 2.1.3 Vzdušné vápno

Vzdušné vápno se vyrábí pálením rozemletých vápenců. Od teploty 600 °C dochází k dekarbonataci uhličitanu vápenatého na oxid vápenatý podle rovnice:



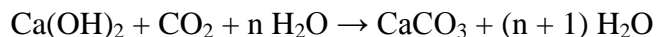
Ve výrobě se kvůli zrychlení reakce provádí dekarbonatace při teplotě 900 – 1100 °C. Vzniklý oxid vápenatý je nazýván pálené vápno. Dalším krokem je hašení vápna, kde se oxid vápenatý mění na hydroxid vápenatý:



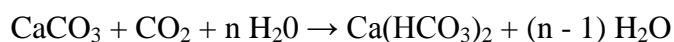
Dříve se vápno hasilo v plochých otevřených nádobách zvaných hasnice postupným přidáváním vody (240 – 320 l vody na 100kg páleného vápna), čímž byla udržována teplota těsně pod bodem varu. Vzniklé vápenné mléko se přepouštělo do odležovací jámy, kde z něho vsáknutím přebytečné vody vznikla vápenná kaše (suspenze hydroxidu vápenatého) obsahující 30 – 55 % pevné fáze. Dnes zcela převažuje modernější způsob přípravy hydroxidu vápenatého, který se uskutečňuje ve speciálním zařízení zvaném hydrátor. Zde se na pálené vápno působí vodou v množství 65 – 70 l na 100 kg, což je přibližně dvojnásobek stechiometrického množství. Přebytečná voda přesahující teoretické množství odchází ve formě páry. Produktem je práškový vápenný hydrát, ze kterého se dá přidáním vody kdykoliv vyrobit vápenná kaše. [5]

Tuhnutí vápenné malty probíhá na principu vysychání koloidního gelu vápenného pojiva, kdy se odpařuje voda z mezizrných prostorů kapilárního charakteru. Dochází ke shlukování částic hydroxidu vápenatého a jejich následnému srůstu. Už ze samotné podstaty procesu (vypařování vody) je zřejmé, že k němu nemůže docházet pod vodou.

Stejně tak ztuhlá struktura je opět rozpustná ve vodě. Hlavní složkou vytvrzování malty je karbonatace hydroxidu vápenatého. Ten se reakcí se vzdušným oxidem uhličitým mění na uhličitan vápenatý:



Tato reakce vyžaduje přítomnost malého množství vody v tvrdnoucí maltě, nicméně produkuje víc vody, než spotřebovává. Průběh je pomalý kvůli velmi nízké koncentraci oxidu uhličitého ve vzduchu. Výsledná malta nabývá charakter vápencového slepence – tedy po chemické stránce v podstatě stejného materiálu, ze které je vápno vyráběno. Ani takto ztvrdlá malta však není trvale odolná vodě, neboť uhličitan vápenatý se působením oxidu uhličitého rozpuštěného ve vodě může přeměňovat na rozpustný hydrogenuhličitan:



Vzdušné vápno je mimo jiné díky nízké ceně osvědčeným stavebním pojivem, dnes především v průmyslově vyráběných maltových směsích. Používá se také k výrobě vápenopískových cihel a autoklávovaného pórobetonu. Vápenné mléko je stále používáno k vnitřním i venkovním nátěrům, zvláště v případě historických objektů. Bílení má navíc také desinfekční účinek díky vysoké alkalitě. [5]

#### **2.1.4 Hydraulické vápno**

Tradiční výroba hydraulického vápna spočívá ve výpalu jílových vápenců s obsahem hydraulických oxidů a následným hašením na prach (rozhašování). V případě silně hydraulických vápen (vyšší poměr hydraulicky aktivní složky) se hašení neprovádí, protože obsah CaO je v nich malý. Hydraulické vlastnosti má na svědomí především křemičitan dvojjápenatý (dikalciumsilikát), který vzniká pálením vhodných surovin (např. méně čistých vápenců). Produkt se nazývá přírodní hydraulické vápno. To může být také doplněno pucolánovými příměsemi – buď přírodními (tras, pemza, sopečný tuf, tufity, křemelina, spongilit, zeolity) nebo umělými, z nichž nejpoužívanější je elektrárenský popílek, nejučinnější pak jemné křemičité úlety vznikající v metalurgických procesech. Pro pucolány je typické, že samy o sobě s vodou nereagují, ale vlastností hydraulického pojiva nabývají ve spojení s hydroxidem vápenatým.

V současné době se u nás hydraulické vápno nevyrábí a v běžné stavební praxi je nahrazováno cementem nižší třídy nebo vápenocementovým pojivem. [5]

### 2.1.5 Cement

Silikátový cement je anorganické pojivo s velmi výraznou hydraulitou. Tuhne i pod vodou a po zatvrdnutí si i ve vodě zachovává pevnost a objemovou stálost. Vyrábí se v rotační peci v podstatě ze stejných surovin jako přírodní hydraulické vápno, ale vypaluje se za vyšších teplot. Při teplotách kolem 1300 – 1400 °C dochází ke slinutí násady a uvnitř materiálu dochází k výraznějším chemickým změnám., jejichž důsledkem je především vznik trikalciumsilikátu a dalších složek (trikalciumaluminát, tetrakalciumaluminátferit). Původně prášková násada se spéká a postupným nabalováním vznikají několikacentimetrové valounky slínku. Po částečném vychladnutí se drtí a nechává dochládnout ve skladovacích slínkových silech. Nakonec se společně s přísadou sádrovce (2 – 6 %) mele na definitivní jemnost, čímž vzniká jednosložkový portlandský cement. [5]

Portlandský cement je tvořen z 90 % čtyřmi nejdůležitějšími slínkovými minerály. Ty se pro zjednodušení zapisují pomocí tzv. cementářské notace pouze, kde jsou minerály charakterizovány oxidy, ze kterých se skládají. Každý oxid se zapisuje jedním písmenem. CaO se v cementářské notaci zapisuje jako C, H<sub>2</sub>O jako H, SiO<sub>2</sub> jako S, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jako F, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jako A, SO<sub>3</sub> jako S s pruhem. Základní minerály portlandského slínku jsou tyto:

- trikalciumsilikát (C<sub>3</sub>S)
- dikalciumsilikát (C<sub>2</sub>S)
- trikalciumaluminát (C<sub>3</sub>A)
- tetrakalciumaluminátferit (C<sub>4</sub>AF)

Trikalciumsilikát (alit) nabývá pevnosti převážně během prvních 28 dní. Jeho vyšší obsah je proto žádoucí u konstrukcí, kde rychlejší nárůst pevnosti umožní rychlejší odbednění a pokračování výstavby. Alitový cement je všeobecně nejpoužívanější.

Dikalciumsilikát (belit) se naopak vyznačuje pomalejším nárůstem pevnosti a vytvrzuje z větší části až po 28 dnech. S tím jde ruku v ruce i menší vývin tepla, což je žádoucí

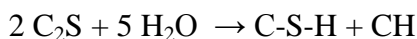
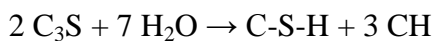
u velmi masivních konstrukcí, u kterých by při použití alitického betonu hrozilo vlivem rychlého vývinu tepla přehřívání. [5]

Trikalciumaluminát je složkou citlivou na dodatečné působení síranů. Z toho důvodu se musí v síranovzdorných cementech jeho obsah snižovat. Hydratace samotného C<sub>3</sub>A probíhá tak rychle, že by komplikovala zpracování čerstvého betonu. Tomu se zabráňuje právě přimícháním sádrovce, který rychlost hydratace C<sub>3</sub>A zpomaluje.

Každá z těchto složek ovlivňuje výsledné vlastnosti cementu jinak a úpravou jejich poměru při výrobě je možné dosáhnout výsledného produktu požadovaných vlastností.

Průběh hydratačních reakcí závisí na více faktorech, než je samotné složení cementu. Roli hraje také jemnost mletí, vodní součinitel (poměr hmotnosti záměsové vody k hmotnosti pojiva), teplota a přítomnost dalších přísad a příměsí. U běžných cementů ve výsledku zhydratuje jen asi 15% z celkového množství slínku. Ke zbývajícím částem zrn se již přes zhydratovanou část na jejich povrchu nedostane voda, a slouží tedy jen jako plnivo. Samotná hydratace jednotlivých slínkových minerálů je ve skutečnosti sled několika reakcí. [5]

Nejdůležitější je hydratace trikalciumpilíkátu a dikalciumsilíkátu, ze kterých vzniká takzvaný C-S-H gel, který je hlavním nositelem výsledné pevnosti. Tyto reakce se dají zjednodušeně zapsat těmito rovnicemi:



Poměr oxidů v C-S-H gelu není vždy stejný a přesná detailní struktura krystalů zatím není známá. [2]

Kromě C-S-H gelu vzniká hydratací slínku také portlandit – tedy hydroxid vápenatý. Toho je poměrně značné množství (30kg Ca(OH)<sub>2</sub> ze 100kg portlandského cementu). Malá část z něj se může spotřebovat na tvorbu aluminhydrátu, ale převážná většina zůstává v cementu ve volné formě a vytváří v něm silně alkalické prostředí. To je velice žádoucí především pro ochranu betonářské výztuže před korozi. Hodnota pH

s časem zvolna klesá tím, jak hydroxid vápenatý karbonatuje ve styku se vzdušným CO<sub>2</sub>. [5]

Mimo jednosložkového portlandského cementu jsou vyráběny také cementy, kde je část slínku nahrazena jinou hydraulicky aktivní látkou. Tou může být například vysokopecní struska, křemičitý úlet, elektrárenský popílek a další. Tyto příměsi snižují cenu cementu, aniž by způsobily ztrátu jeho pojivé funkce. [5]

### **2.1.6 Zkoušení malt**

Zkoušky malt lze rozdělit do dvou základních skupin: zkoušky čerstvých malt a zkoušky ztvrdlých malt. Všechny zkoušky mají přesně stanovené postupy, které jsou uvedeny v normách. Ty jsou následující:

Zkoušky čerstvých malt:

<i>ČSN EN 1015-1</i>	Stanovení zrnitosti (sítovým rozborem).
<i>ČSN EN 1015-3</i>	Zkouška konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku).
<i>ČSN EN 1015-4</i>	Zkouška konzistence čerstvé malty pomocí přístroje pro hodnotu penetrace.
<i>ČSN EN 1015-9</i>	Stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty
<i>ČSN EN 1015-6</i>	Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty.
<i>ČSN EN 1015-7</i>	Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě.

Zkoušky ztvrdlých malt:

<i>ČSN EN 1015-10</i>	Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty.
<i>ČSN EN 1015-11</i>	Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku.
<i>ČSN EN 1015-12</i>	Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt.
<i>ČSN 72 2452</i>	Zkouška mrazuvzdornosti malty.

## 2.2 Elektrárenský popílek

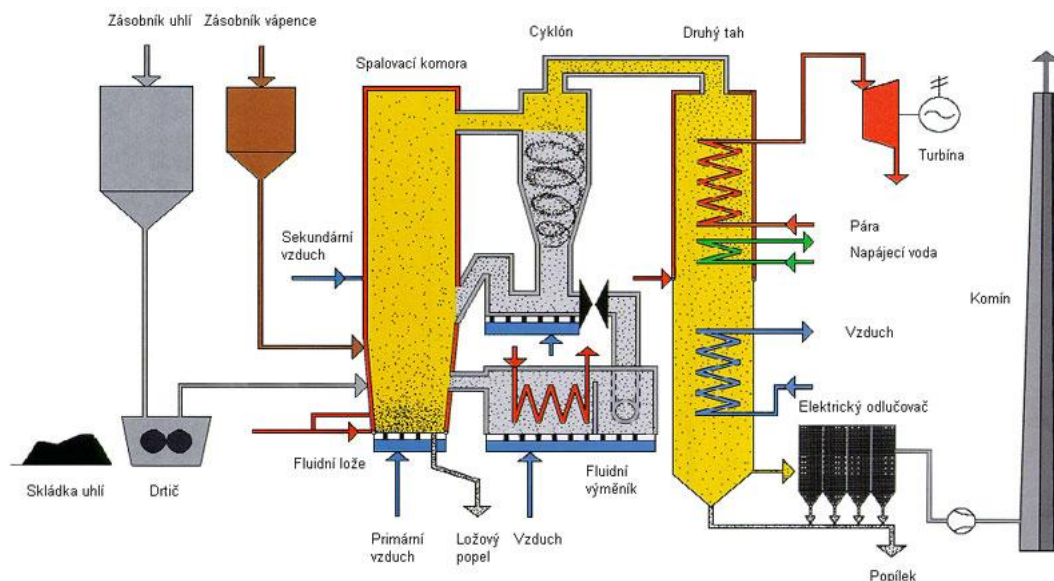
### 2.2.1 Původ popílku

Při spalování uhlí v tepelných elektrárnách vznikají z anorganických látek nespalitelné zbytky. Jejich vlastnosti závisí na mnoha faktorech: druhu uhlí (černé, hnědé, lignit), lokalitě těžby, další látky spalované spolu s uhlím - zpravidla odpad, jako biomasa, zbytky z gumárenského průmyslu atd. V neposlední řadě hraje roli také použitá technologie spalování. To se dá rozlišit na 2 základní typy: spalování v klasických kotlích (vysokoteplotní spalování) a spalování na fluidním loži. [4]

Vysokoteplotní spalování probíhá při teplotě zhruba 1200 – 1700 °C. Nespalitelné zbytky tvoří z 80% úletové popílky, zbytek je struska a energosádrovec vzniklý odsířením spalin vápennou vypírkou. Vysokoteplotní popílek sám o sobě nemá hydraulické vlastnosti a s vodou nereaguje. Ve směsi s hydroxidem vápenatým však reaguje podobně jako cement. Tato vlastnost se nazývá pucolanita a značně se liší v závislosti na složení popílku. Díky vysokému obsahu  $\text{SiO}_2$  (40 - 65 %) mají vysokoteplotní popílky kyselý charakter, liší se především množstvím  $\text{CaO}$ , kdy vyšší obsah mají zpravidla popílky ze spalování hnědého uhlí. Díky vysokým teplotám je tento oxid vápenatý velice málo reaktivní – tzv. mrtvě pálené vápno. Jeho obsah je pro stavební účely nežádoucí, protože zpomaluje hydrataci betonu a způsobuje objemovou nestabilitu kompozitů. [4]

Fluidní spalování uhlí je moderní způsob, kdy je proces řízen tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti při přeměně chemické energie paliva na tepelnou. Při fluidním spalování vzniká hrubší ložový popel a jemnější úletový popílek, který je zachycen na filtrech (cyklony, odlučovače). Do spalovaného mletého uhlí se přidává mletý vápenec jako sorbent oxidu siřičitého. Vzniká tak bezvodý síran vápenatý, který je zodpovědný za hydraulickou aktivitu popílků s vysokým obsahem vápníku. Navíc zde také zůstává zbytek nezreagovaného vápence ve formě měkce páleného reaktivního vápna ( $\text{CaO}$ ). Schéma elektrárny s fluidním spalováním je vidět na obrázku 1. [4]





Obrázek 1 – Schéma uhelné elektrárny se spalováním na fluidním loži [6]

### 2.2.2 Vlastnosti popílků

Elektrárenský popílek je z převážné části tvořen sférickými částicemi velikosti od 0,001 mm do 0,01mm. Mimoto jsou tu i křemenné částičky, které jsou hranaté s jen mírně zaoblenými hranami. Chemické složení závisí především na druhu spalovaného uhlí, z hlavních prvků jsou ale vždy zastoupeny křemík, hliník, vápník a železo. Popílků vzniklé spálením antracitu a černého uhlí mají zpravidla nízký obsah CaO (do 15 %), hlavní složkou jsou především oxidy křemíku, železa a hliníku, kterých by mělo být více, než 70%. Podle těchto charakteristik spadají mezi pucolánové příměsi třídy F, které se vyznačují latentní hydraulicitou, avšak samy o sobě nemají pojivové vlastnosti. Popílků z pálení hnědého uhlí a lignitu obsahují obvykle 15 – 30 % oxidu vápenatého, díky němuž mají i pojivové vlastnosti. To je řadí mezi pucolánové příměsi třídy F. [4]

### 2.2.3 Využití popílků v betonech

Podle druhu a složení je možné popílků použít v betonu pro dosažení různých vlastností. Příměsi všeobecně rozlišujeme na 2 základní skupiny:

- příměsi druhu I, které v procesu hydratace cementu působí téměř inertně,
- příměsi druhu II, které se projevují chemicko-fyzikální aktivitou při hydrataci cementového tmelu.

Aby mohl být popílek klasifikován jako příměs druhu II, musí obsahovat alespoň 25 % aktivního  $\text{SiO}_2$ , který zajišťuje pucolánovou aktivitu (latentní hydraulicitu). [5]

Všeobecně mohou popílky v betonu zastat mnoho účelů:

- jako plnivo (příměs druhu I) optimalizují křivku zrnitosti zvýšením množství jemných částic, čímž se zlepšuje zpracovatelnost, čerpatelnost a soudržnost čerstvého betonu, navíc se zmenšuje náchylnost k rozmíšení čerstvého betonu při dopravě,
- s prokázanou pucolánovou aktivitou (příměs druhu II) mohou nahradit část cementu, aniž by došlo k výraznému snížení pevnosti ztvrdlého betonu,
- obsah popílku zpomaluje tvrdnutí betonu a snižuje vývin hydratačního tepla, což může být žádoucí při betonování masivních konstrukcí,
- vhodná volba popílku může zlepšit chemickou odolnost betonu,
- popílek, jakožto jemné plnivo zvyšuje hutnost cementového tmelu, čímž se také snižuje permeabilita a odolnost povrchu vůči karbonataci. [5]

Obsah popílku ale také přináší určitá negativa, která je nutno mít na zřeteli při volbě směsi:

- vysoký obsah  $\text{CaO}$  způsobuje objemové změny tuhnutí betonu, což může vést k rozvoji trhlin a celkovému snížení pevnosti, zejména v tahu za ohybu,
- vysoký obsah  $\text{SO}_3$  způsobuje síranovou korozi, která taktéž vede k objemovým změnám a vzniku trhlin,
- vysoký podíl spalitelných látek nepříznivě ovlivňuje množství vzduchu v provzdušněném betonu a narušuje proces tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- vysoký obsah chloridů může zvýšit riziko koroze výztuže,
- nepřiměřená dávka může způsobit odlučování vody na povrchu uloženého betonu (tzv. bleeding), což vede ke snížení kvality a trvanlivosti povrchu,
- snížení vývinu hydratačního tepla komplikuje použití při betonáži za nízkých teplot. [5]

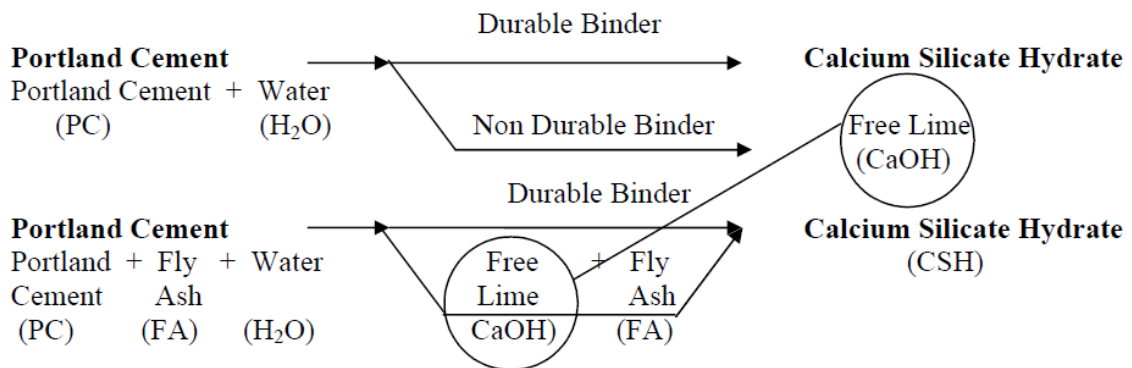
## 2.2.4 Aktivita popílku v hydratačním procesu v betonu

Klíčovou vlastností je v tomto případě latentní hydraulita popílků. Pucolánová reakce probíhá tak, že aktivní minerály  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reagují s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hydroxid vápenatý neboli portlandit) za vzniku kalciumsilikátů a kalciumaluminátů – tedy minerálů podobných těm vznikajícím při hydrataci cementu (viz. rovnice 1 a 2).



Pokud je popílek přidáván do betonu nebo cementové malty, reaguje s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pocházejícím z hydratace cementu (viz. Obrázek 2). Tato reakce je však poměrně pomalá a příměs popílku navíc zpomaluje i samotné tvrdnutí cementu. Při požadavcích na rychlý nárůst pevnosti proto není příměs popílku vhodná. Naopak při betonáži masivních konstrukcí je tato vlastnost žádoucí, neboť se snižuje vývin tepla. [1]

### *Hydration Products of Cementing Binders:*



Obrázek 2 – Reakce popílku z portlanditem pocházejícím z hydratace cementu [1]

### 3 Experimentální část

Experimentální část měla přinést údaje z praktických měření vzorků malty s příměsí popílku i bez příměsí, která by následně mohla být vzájemně porovnána. Proběhla ve dvou ucelených fázích, kde každá zahrnovala výrobu těles, jejich zkoušení a vyhodnocení výsledků.

První fáze měla za cíl získání základních poznatků o vlivu příměsí popílku na pevnost malty. Množství zkušebních těles pro jednotlivé zkoušky bylo menší a byl očekáván poměrně velký rozptyl výsledných hodnot. V první fázi byla vyrobena zkušební tělesa z 3 různých směsí vápna, cementu a popílku a jedné směsi bez obsahu popílku. Tělesa byla zkoušena jednoosou tlakovou zkouškou a trojbodovou zkouškou v tahu za ohybu, část vzorků po 14 dnech a část po 28 dnech. Z výsledků byly vyhodnoceny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu pro jednotlivé směsi, vždy zvlášť pro různá stáří (14 nebo 28 dní). Z rozměrů a hmotností těles byly také stanoveny objemové hmotnosti pro jednotlivé směsi.

V druhé části byla zvolena pouze jedna směs vápna cementu a popílku, k ní směs bez obsahu popílku a navíc třetí směs vápna cementu a písku. Počet vzorků pro jednotlivé zkoušky byl větší, což byl předpoklad pro přesnější výsledky. Všechna tělesa byla zkoušena po 28 dnech opět jednoosou tlakovou zkouškou a zkouškou v tahu za ohybu. Polovina těles byla vždy 2 dny před zkouškou ponořena do vody, čímž došlo k úplné saturaci těles. Samotné zkoušení probíhalo bezprostředně po vyjmutí těles z vody. Z výsledků měření byly vyhodnoceny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu pro jednotlivé směsi. Navíc byl z tlakových zkoušek určen modul pružnosti a ze zkoušek v tahu za ohybu stanovena lomová energie. Z rozměrů a hmotností vzorků byla stanovena objemová hmotnost suchých těles a také nasákavost.

### 3.1 Výroba těles

#### 3.1.1 Použité suroviny

Pro výrobu zkušebních tělísek byly použity tyto suroviny:

Cement CEM I 42,5 R z Radotína, jehož složení je rozepsané v tabulce 1.

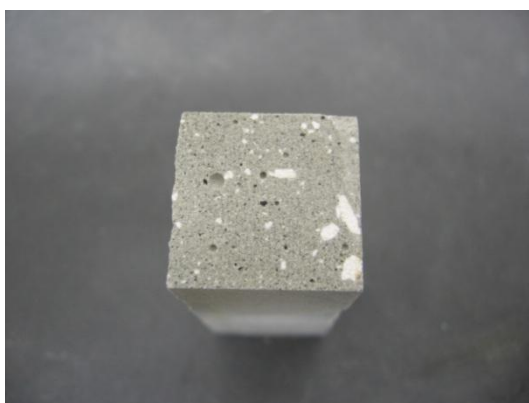
Tabulka 1 - Složení cementu CEM I 42,5 R (hodnoty uvedeny v %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	Na <sub>2</sub> O
19,75	4,35	2,63	65,65	1,80	2,71	0,80	0,09	0,048	0,62

Popílek z elektrárny Mělník, který podle certifikátu č. 040-037406 vydaného Technickým a zkušebním ústavem stavebním Praha obsahuje 36,18 % aktivního SiO<sub>2</sub> a 1,27 % CaO. Tím splňuje kritérium pro zařazení mezi příměsi druhu II a je klasifikován jako popílek pro výrobu cementu.

Vápenný hydrát EN 459-1 CL 90. V první fázi výroby vzorků však bylo použito starší balení, které absorbovalo vzdušnou vlhkost a obsahovalo hrudky, které se nepodařilo dokonale rozmíchat. Ve druhé fázi bylo použito nové balení bez hrudek. Tento rozdíl se výrazně podepsal na rozdílné volbě vodního součinitele u jinak totožných směsí vyrobených v první a ve druhé fázi – to bylo nezbytné pro zachování stejné konzistence.

Říční písek frakce 0/4 s plynulou čarou zrnitosti.



Obrázek 3 (vlevo) – Řez tělesem z fáze 1 – viditelné hrudky vápna

Obrázek 4 (vpravo) – Lomová plocha tělesa z fáze 2 – vápno je v materiálu rovnoměrně rozmícháno

### 3.1.2 Průběh výroby

Složky jednotlivých směsí byly vždy váženy na váze s přesností na celé gramy. Voda byla buď odvažována na váze, nebo v odměrném válci s přesností na 10 ml. K míchání byl použit stolní kuchyňský mixér Kenwood. Nejprve byla smíchána suchá směs a následně přidána voda. Množství vody bylo dodatečně upravováno pro dosažení konzistence dostatečné pro zpracování malty. Poměry jednotlivých složek (po přidání vody) byly zaznamenány. Míchání probíhalo po dobu nutnou k rovnoměrnému rozmíchání směsi. V 1. fázi byla každá směs míchána v jedné záměsi. Ve fázi 2 byla vzhledem k většímu množství každá směs připravována v několika záměsích tak, aby hmotnost celé jedné záměsi nepřesáhla 3kg. Toto rozdělení bylo stanoveno kvůli zamezení přetěžování mixéru. Hotová směs se vždy ihned ukládala do připravených forem o rozměrech 20x20x100 mm a 40x40x160 mm (viz. Obrázek 5). Formy byly ukládány nezakryté v pokojové teplotě a tělesa odformována po 1-2 dnech. V druhé fázi však vlivem jemněji mletého vápna došlo u první sady při rychlém vysychání k výraznému smrštění, které zapříčinilo vznik trhlin u většiny velkých trámečků. Proto byly další sady po uložení do forem zakryty mikrotenovou fólií. Ve fólii byly další den proříznuty otvory pro pomalý odvod přebytečné vlhkosti a k odformování došlo vždy až po 5 dnech od vyrobení směsi. Tělesa byla po odformování označena a nechána na vzduchu tvrdnout (viz. Obrázek 6). Třetina množství malých trámečků z každé sady byla příčně přeříznuta kotoučovou pilou. Vzniklá tělíska o rozměrech přibližně 20x20x50 mm byla určena pro jednoosou tlakovou zkoušku.



Obrázek 5 (vlevo) – Ukázka plných forem 20x20x100 mm a 40x40x160 mm

Obrázek 6 (vpravo) – Odformovaná tělesa sady 3 a 4 z první fáze.

### 3.1.3 Vyrobena tělesa

V první fázi byly vyrobeny 4 sady těles:

- sada 1: směs vápno-cement v poměru 2:1, vodní součinitel  $\frac{W}{V+C} = 0,6$
- sada 2: směs vápno-cement-popílek 2:1:1,  $\frac{W}{V+C} = 0,7$
- sada 3: směs vápno-cement-popílek 2:1:2,  $\frac{W}{V+C} = 0,8$
- sada 4: směs vápno-cement-popílek 2:1:3,  $\frac{W}{V+C} = 0,9$

V každé sadě ve fázi 1 byla vyrobena tato tělesa:

- hranoly 40x40x160 mm (množství 3)
- hranoly 20x20x100 mm (množství 8)
- tělíška 20x20 mm délky cca 50 mm vzniklé rozpúlením malých trámečků (množství 8)

V druhé fázi byly vyrobeny 4 sady těles:

- sada 1: směs vápno-cement v poměru 2:1,  $\frac{W}{V+C} = 0,8$
- sada 2: směs vápno-cement-popílek 2:1:3,  $\frac{W}{V+C} = 1,1$
- sada 3: směs vápno-cement v poměru 2:1,  $\frac{W}{V+C} = 0,8$ ; toto byla náhradní sada za sadu 1, kde došlo k výraznému smrštění a vzniku trhlin u velkých trámečků
- sada 4: směs vápno-cement-písek 2:1:3,  $\frac{W}{V+C} = 1,0$

V každé sadě ve fázi 2 byla vyrobena tato tělesa:

- hranoly 40x40x160 mm (množství 12)
- hranoly 20x20x100 mm (množství 16)

- tělíska 20x20 mm délky cca 50 mm vzniklé rozpúlením malých trámečků (množství 16)

(velká tělíska sady 1 byla všechna z dalšího měření vyřazena)

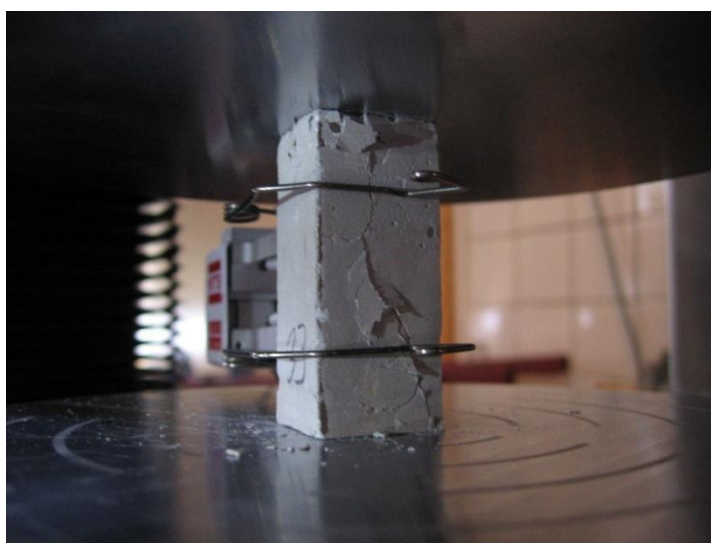
## 3.2 Měření

### 3.2.1 Rozměry a hmotnost

Základní rozměry všech těles byly po ztvrdnutí a vyschnutí volně na vzduchu změřeny posuvným měřítkem s přesností na 0,1 mm. Zároveň byla zvážena na váze KERN ABS 220-4 s přesností na 0,01g, v případě velkých trámečků na 0,1g (přesnost váhy je 0,1 mg). Ve fázi 2 byla 2 dny před destruktivní zkouškou tělesa uložena do vodní lázně a bezprostředně před zkouškou vyjmuta a opět zvážena.

### 3.2.2 Jednoosá tlaková zkouška

Jednoosá tlaková zkouška byla prováděna na přístroji MTS Aliance RT-30. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí posunu  $0,15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Zkoušena byla tělíska o rozměrech 20x20 mm o délce cca 50mm. K tělískům byl připojen extenzometr. Při zkoušce byla zaznamenávána síla, posun, čas a poměrná deformace získaná z extenzometru.

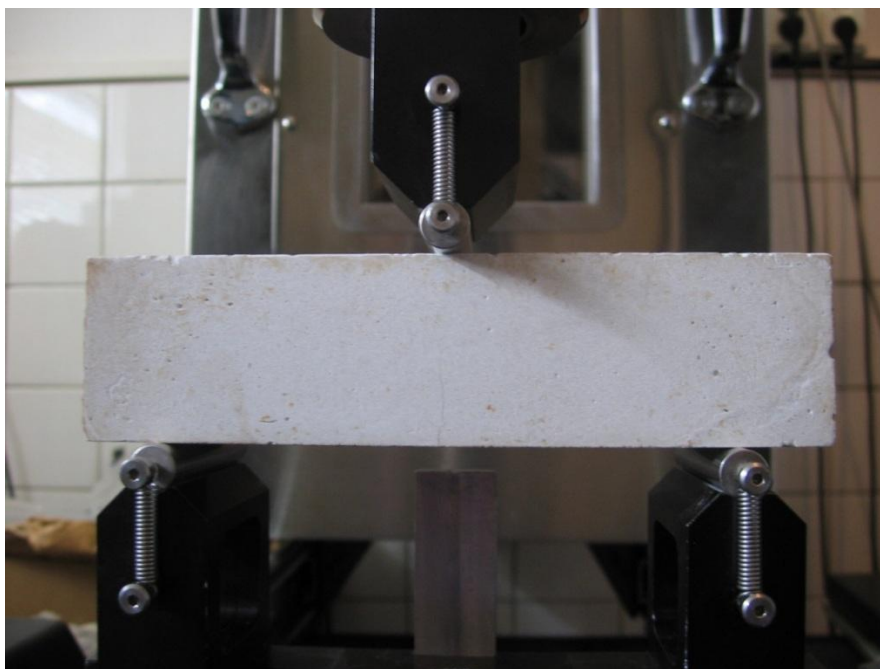


Obrázek 7 – Tělíska s připevněným extenzometrem po skončení zkoušky



### 3.2.3 Třibodová zkouška tahu za ohybu

Třibodová zkouška byla taktéž prováděna na přístroji MTS Aliance RT-30. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí posunu  $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Zkoušeny byly malé trámečky o rozměrech  $20 \times 20 \times 100 \text{ mm}$  a velké trámečky o rozměrech  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ . Účinná délka (vzdálenost podpor) byla  $80 \text{ mm}$  pro malé a  $120 \text{ mm}$  pro velké trámečky. Při zkoušce byla zaznamenávána síla, posun a čas.



Obrázek 8 – Velký trámeček po skončení třibodové zkoušky tahu za ohybu

## 3.3 Vyhodnocování

### 3.3.2 Vyřazení vzorků z vyhodnocování výsledků

Některé vzorky byly vyřazeny z dalšího hodnocení. Důvodem byly viditelné vady na tělískách již po odformování, případně později při manipulaci před samotnou zkouškou. Dále byla některá tělíska poškozena při manipulaci a přípravě na zkoušku (řezání malých trámečků na jednoosou zkoušku pevnosti v tlaku). Vyřazena také byla tělíska, která jevila po destruktivní zkoušce jiná porušení, než měla zkouška vyvolat na bezvadném tělese (při třibodové zkoušce vede trhлина mimo bod zatížení – střed trámečku).

### 3.3.2 Statistika – aritmetický průměr, směrodatná odchylka

Při statistickém vyhodnocení byl vždy spočítán nejprve aritmetický průměr všech hodnot a směrodatná odchylka pro danou skupinu měření. Následně byly vyřazeny všechny hodnoty, které se od průměru lišily o vyšší hodnotu, než je směrodatná odchylka. V závěru byl ze zbylých hodnot opět spočítán aritmetický průměr, který charakterizuje výsledek daného měření. Aritmetický průměr a směrodatná odchylka byly počítány podle vzorců (3) a (4).

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

kde  $\bar{x}$  je aritmetický průměr,  $s_x$  je směrodatná odchylka,  $x_i$  je hodnota znaku a  $n$  je počet měření.

### 3.3.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost každého vzorku byla počítána jako podíl jeho hmotnosti a objemu. Objem byl spočítán jako součin 3 rozměrů – šířky, výšky a délky. Jednotky jsou  $\text{kg/m}^3$ .

### 3.3.4 Nasákavost

Nasákavost vyjadřuje poměr mezi hmotností vody v saturovaném vzorku a hmotností suchého vzorku. Hmotnost vody byla spočítána jako rozdíl hmotnosti saturovaného a suchého vzorku. Hodnota je uvedena v procentech.

### 3.3.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byl získán z jednoosé tlakové zkoušky jako podíl maximální dosažené síly a plochy průřezu. Plocha průřezu je součinem výšky a šířky. Hodnota je uvedena v jednotkách MPa.

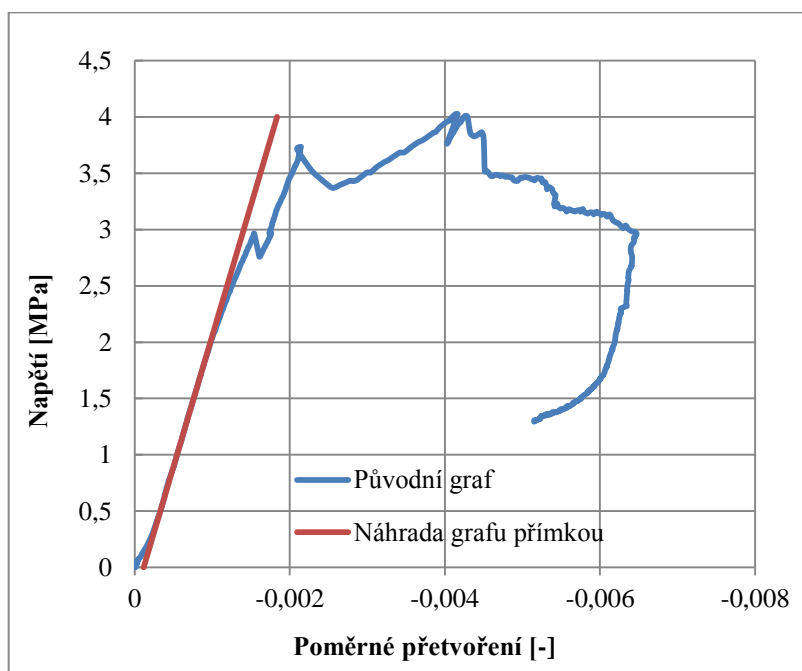
### 3.3.5 Modul pružnosti

Modul pružnosti byl získán z dat z jednoosé tlakové zkoušky. V programu Excel byl pro každé tělísko vykreslen bodový graf závislosti napětí (síla dělená plochou průřezu)

na poměrné deformaci z extenzometru. Z něj byla vybrána lineární část větve a modul pružnosti určen jako podíl rozdílů napětí při příslušných deformacích (viz. rovnice 5).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

kde  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  jsou poměrné deformace a  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou odpovídající napětí.  $E$  je modul pružnosti (uveden v jednotkách GPa).



Obrázek 9 – Ukázka získání modulu pružnosti, jakožto směrnice lineární části větve pracovního diagramu

### 3.3.6 Pevnost v tahu za ohybu

Za pevnost v tahu za ohybu bylo vzato maximální napětí dosažení při třibodové zkoušce. Napětí bylo spočítáno jako podíl momentu a průřezového modulu podle rovnice 6.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{4} \cdot F \cdot l}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} \quad (6)$$

kde  $\sigma$  je napětí,  $F$  je síla,  $l$  je účinná délka trámečku,  $b$  je šířka a  $h$  výška průřezu. Pevnost je uvedena v jednotkách MPa.

### 3.3.7 Lomová energie

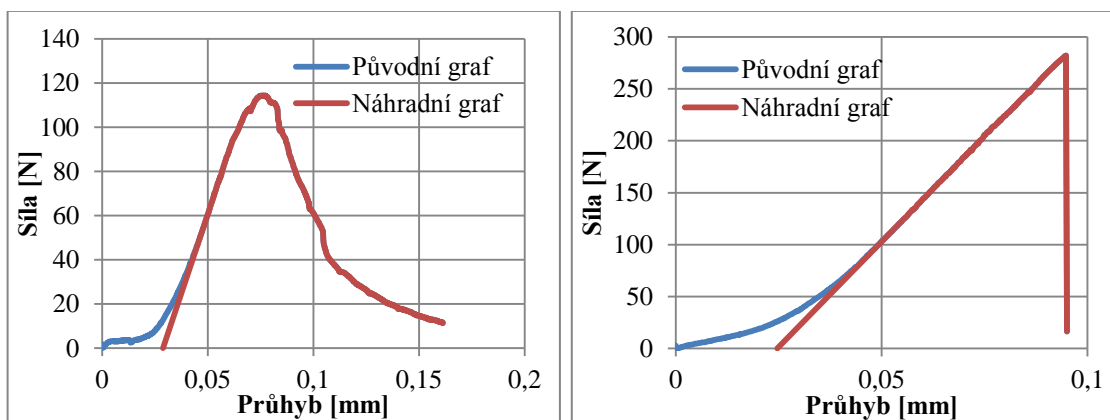
Pro výpočet lomové energie byla použita data z tříbodové zkoušky v tahu za ohybu. Nejprve byl pro každý trámeček v programu Excel vykreslen bodový graf závislosti síly na posunutí. Z grafu byla vybrána lineární část větve a tou byl nahrazen nelineární počátek grafu, který je způsoben postupným dosedáním tělesa v přístroji. Práce stroje při zkoušce byla spočítána jako plocha pod grafem (rovnice 7). Lomová energie je podíl práce přístroje a plochy průřezu trámečku (rovnice 8).

$$A = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{F_{i-1} + F_i}{2} \cdot (\delta_i - \delta_{i-1}) \right] \quad (7)$$

$$G = \frac{A}{b \cdot h} \quad (8)$$

kde  $A$  je práce přístroje,  $G$  je lomová energie,  $\delta_i$  je okamžitá deformace,  $F_i$  je příslušná síla,  $b$  je šířka a  $h$  je výška průřezu. Lomová energie je uvedena v jednotkách  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Zkouška byla vždy zastavena automaticky v momentu, kdy zatěžovací síla klesla pod 10% maximální dosažené síly v daném měření. Pokud k tomuto bodu došlo postupným snižováním síly a bylo tedy zřejmé, že by se vzrůstajícím průhybem síla dál postupně klesala, byla hodnota lomové energie zvýšena o 10%, aby byla velice přibližně vykompenzována lomová energie, která nebyla zkouškou vyčerpána (obrázek 10). Pokud naopak došlo k prudkému poklesu síly pod 10% maximální dosažené, a to bez změny průhybu, nebyla hodnota lomové energie navyšována z předpokladu, že prakticky celá lomová energie byla spotřebována zkouškou (obrázek 11).



Obrázky 10 (vlevo) a 11 (vpravo) – Ukázka úpravy nelineárního začátku grafu

## 4 Výsledky

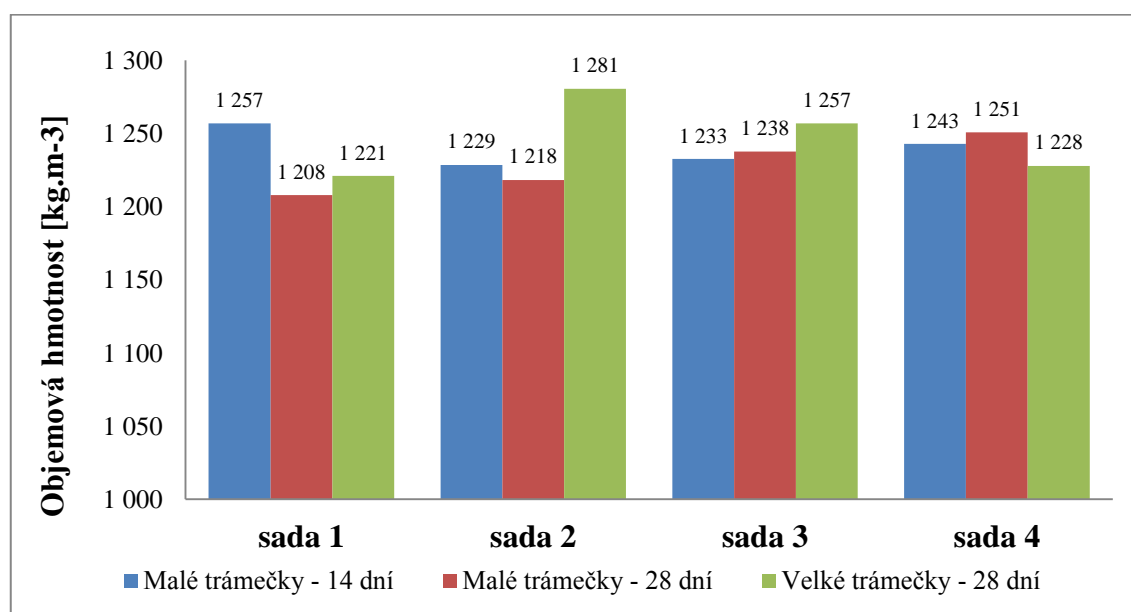
### 4.1 Výsledky fáze 1

#### 4.1.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla vyhodnocena pouze u trámečků určených pro trojbodovou zkoušku, jelikož tělíska pro tlakovou zkoušku byla namočena při řezání. Vyšší vlhkost vzorků by mohla výrazně ovlivnit výsledky. Hodnoty byly vypočítány zvlášť pro malé trámečky zkoušené po 14 dnech, pro malé trámečky zkoušené po 28 dnech a pro velké trámečky zkoušené po 28 dnech. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2 a v příslušném grafu (obrázek 12).

Tabulka 2 - Objemová hmotnost; fáze 1 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Sada	malé		velké
	14 dní	28 dní	28 dní
1	1 257	1 208	1 221
2	1 229	1 218	1 281
3	1 233	1 238	1 257
4	1 243	1 251	1 228



Obrázek 12 – Graf: Objemová hmotnost; fáze 1 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

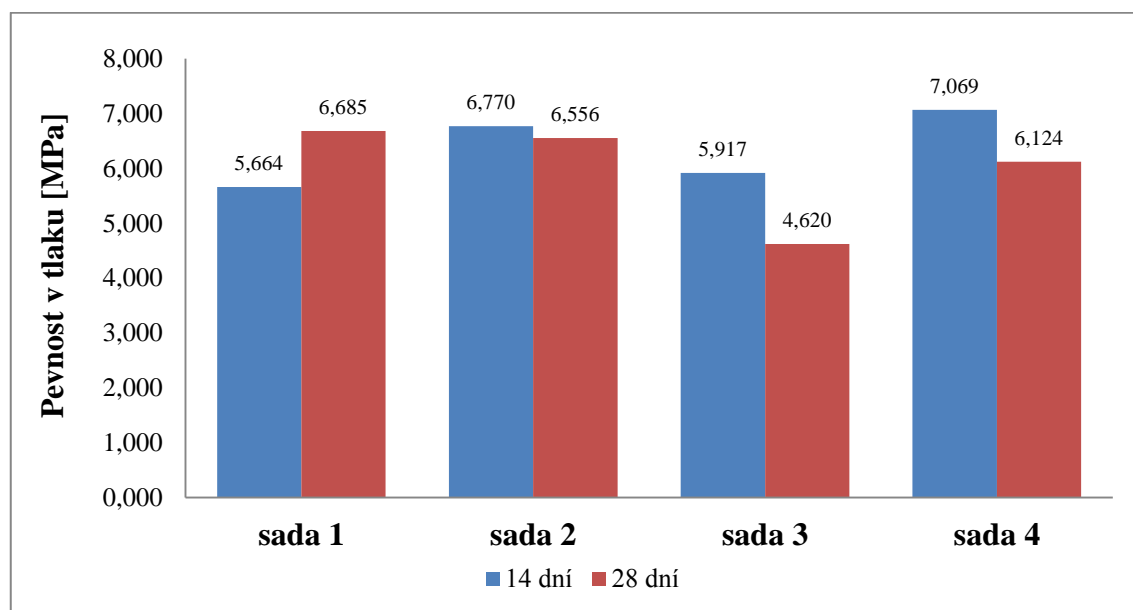
Z výsledků je zřejmé, že hodnoty jsou velmi podobné jak u různě starých nebo velkých těles jedné sady, tak napříč všemi sadami. Rozdíly se pohybují kolem 5% a jsou pravděpodobně způsobeny nepřesným měřením rozměrů.

#### 4.1.2 Pevnost v tlaku

V tabulce 3 a příslušném grafu (obrázek 13) jsou uvedeny pevnosti v tlaku po 14 a 28 dnech pro sady 1 až 4.

Tabulka 3 - Pevnost v tlaku; fáze 1 [MPa]

Sada	14 dní	28 dní
1	5,664	6,685
2	6,770	6,556
3	5,917	4,620
4	7,069	6,124



Obrázek 13 – Graf: Pevnost v tlaku; fáze 1 [MPa]

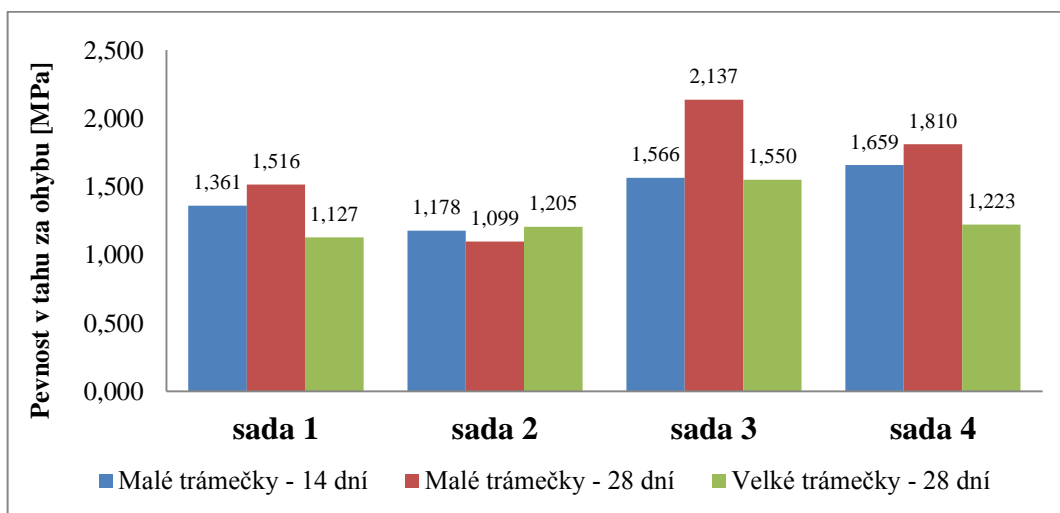
Ačkoli předpoklad byl takový, že pevnost po 28 dnech bude vyšší než po 14 dnech, výsledky u sad 3 a 4 ukazují opak. Nejpravděpodobnější příčina jsou výrazné statistické nepřesnosti způsobené poměrně malým počtem zkoušených vzorků. Je však zřejmé, že pevnost v tlaku není množstvím popílku ve směsi zásadně ovlivněna.

### 4.1.3 Pevnost v tahu za ohybu

V tabulce 4 a grafu (obrázek 14) jsou uvedeny pevnosti v tahu za ohybu po 14 a 28 dnech získané z dat změřených na malých a velkých trámečkách.

Tabulka 4 – Pevnost v tahu za ohybu; fáze 1 [MPa]

Sada	malé		velké
	14 dní	28 dní	28 dní
1	1,361	1,516	1,127
2	1,178	1,099	1,205
3	1,566	2,137	1,550
4	1,659	1,810	1,223



Obrázek 14 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu; fáze 1 [MPa]

Z výsledků je patrné, že kromě sady 2 vycházela pevnost v tahu za ohybu vždy větší u vzorků stáří 28 dní. Podobně u všech sad, kromě sady 2, vyšla pevnost u velkých trámečků menší. To splňuje předpoklad takzvaného „size-efektu“, tedy že u 2x většího tělesa jdou naměřené pevnosti při tříbodové zkoušce o přibližně 40% nižší vlivem větší pravděpodobnosti výskytu „slabých míst“ v tělese. Sady 3 a 4 (tedy s poměrem vápno-cement-popílek 2:1:2 a 2:1:3) vykazovaly větší pevnosti v tahu za ohybu, než sada 1 (vápno-cement 2:1), a to jak na malých trámečkách po 14 i 28 dnech, tak na velkých trámečkách po 28 dnech. Výsledky jsou opět poznamenány vysokou statistickou nepřesností, která se patrně nejvíce promítla na vzorcích sady 2 (malé trámečky po 28 dnech).

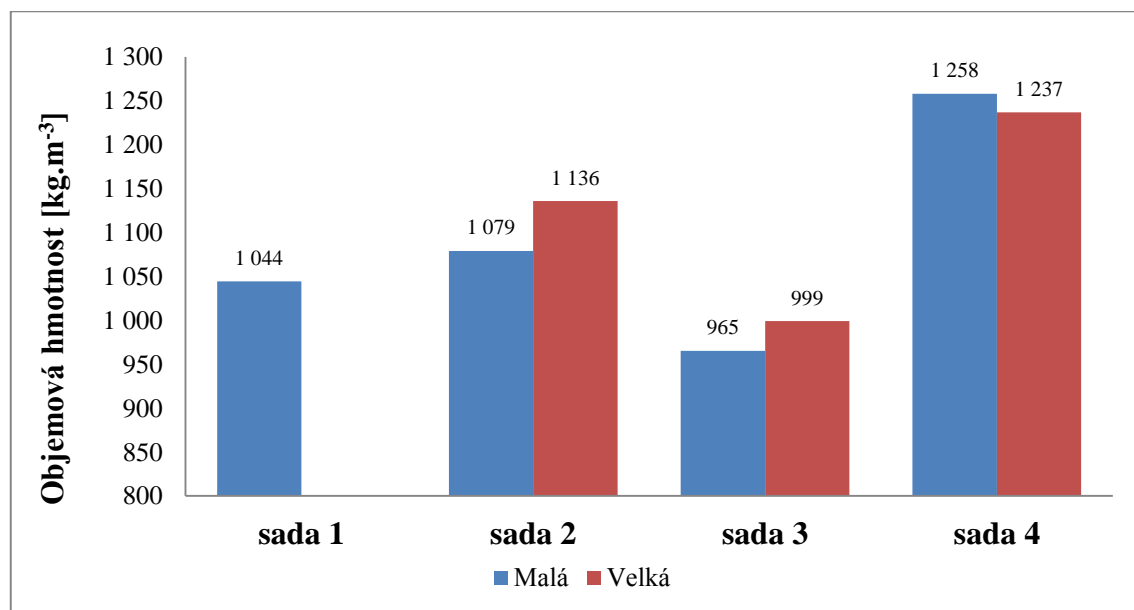
## 4.2 Výsledky fáze 2

### 4.2.1 Objemová hmotnost

Ve fázi 2 byla objemová hmotnost vyhodnocena u každé sady hromadně u všech malých trámečků a tělísek na tlakovou zkoušku a zvlášť pro všechny velké trámečky z dané sady (kromě sady 1, ze které nebyly velké trámečky použity). Výsledky jsou v tabulce 5 a příslušném grafu (obrázek 15).

Tabulka 5 - Objemová hmotnost; fáze 2 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Sada	malá	velká
1	1 044	neměřeno
2	1 079	1 136
3	965	999
4	1 258	1 237



Obrázek 15 – Graf: Objemová hmotnost; fáze 2 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Zde již jsou vidět poměrně značné rozdíly mezi jednotlivými sadami. Sada 1 je směs vápno-cement 2:1, u které nebylo zabráněno rychlému vypařování vody a došlo u ní k výraznému smrštění. Sada 3 je totožná směs, ale smrštění bylo zabráněno zakrytím formy fólií. Díky tomu má sada 3 výrazně menší objemovou hmotnost. U sady 2 – směs s obsahem popílku (V:C:P = 2:1:3) – vyšla objemová hmotnost o více než  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



vyšší, než u směsi 3 (bez popílku). Sada 4 (vápno-cement-písek) se objemovou hmotností podle očekávání vymykala zbytku – objemová hmotnost byla o téměř  $300 \text{ kg.m}^{-3}$  vyšší, než u sady 3.

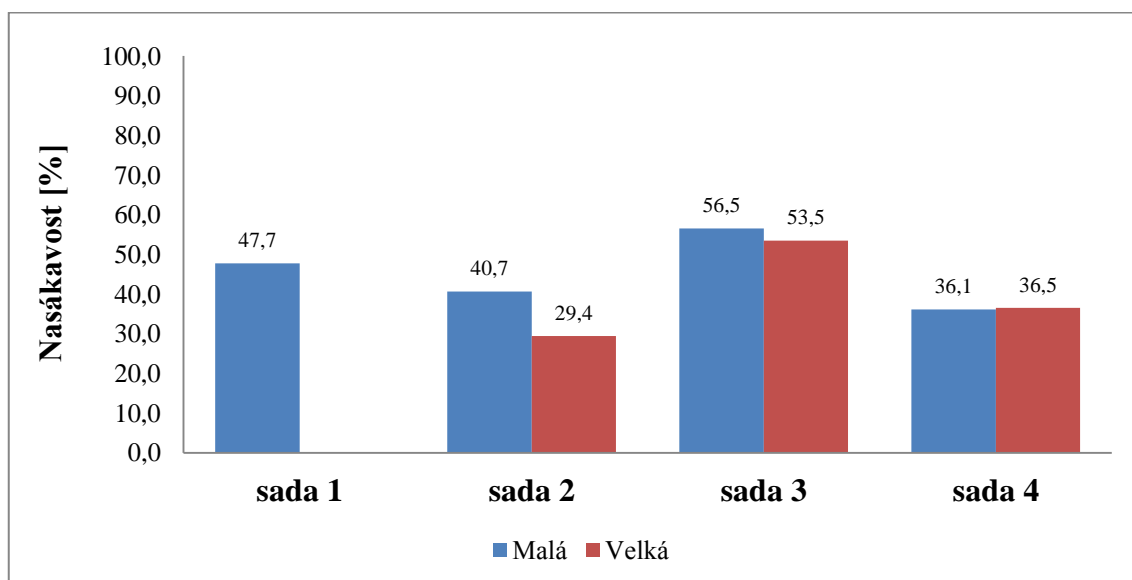
Zajímavý je také rozdíl mezi objemovou hmotností velkých a malých tělísek. Zvláště u sady 2 je poměrně vysoký a díky počtu vzorků jej nelze považovat za statistickou nepřesnost. Velmi pravděpodobné je, že vlivem uložení vzorků těsně u sebe bylo omezováno vysychání vzorků, a proto měla velká tělíška i po 28 dnech vyšší vlhkost.

#### 4.2.2 Nasákavost

Hodnoty nasákavosti byly vyhodnocovány pouze u poloviny všech těles fáze 2, jelikož jen polovina všech těles byla uložena na 2 dny do vody. Tabulka 6 a graf na obrázku 16 zobrazují hodnoty nasákavosti zvlášť pro malá a zvlášť pro velká tělíška.

Tabulka 6 - Nasákavost; fáze 2 [%]

Sada	malá	velká
1	47,7	neměřeno
2	40,7	29,4
3	56,5	53,5
4	36,1	36,5



Obrázek 16 – Graf: Nasákavost; fáze 2 [%]

Největší nasákavost vykazovala tělesa sady 3 (vápno-cement). Nižší hodnoty jsou vidět u sady 1, což lze vysvětlit větším smrštěním a tudíž menším objemem pórů v jinak totožné směsi. Směs 2 s obsahem popílku vykazovala nasákavost 40,7 % - tedy ještě méně, než obě směsi bez popílku. To potvrzuje vysokou schopnost vápná vázat vodu a naopak inertní chování samotného popílku ve vodě. Nejméně nasákavá byla tělíska ze sady 4, což mohlo být dáno také hrubší zrnitostí písku.

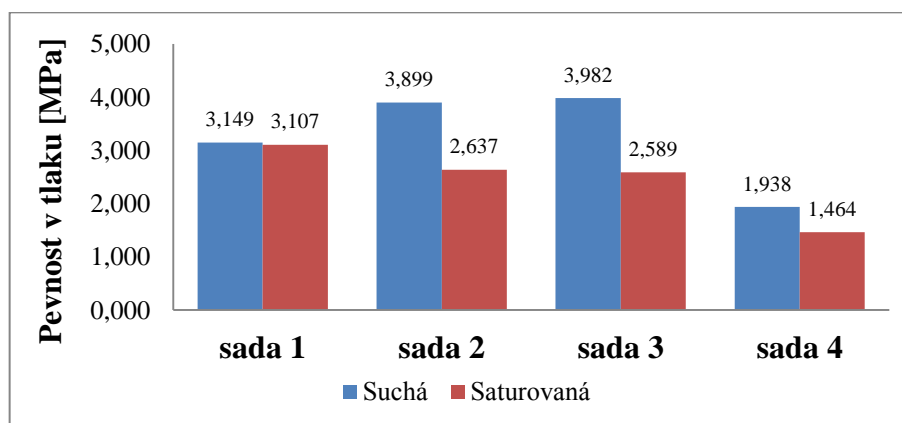
Podobně jako u srovnání objemových hmotností i zde je možné vidět výrazný rozdíl mezi hodnotou nasákavosti malých a velkých vzorků. To odpovídá domněnce o neúplném vysušení velkých tělísek před ukládáním do vody. Je logické, že tělíska, která mají vyšší vlhkost už před uložením do vody, jí nebudou schopna přijmout tolik. Nejvíce se tento faktor opět projevil u sady 2, dále u sady 3. U sady 4 se naopak jeví situace opačná, ale rozdíl je malý a pravděpodobně se jedná o statistickou nepřesnost.

#### 4.2.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla vyhodnocena zvlášť pro suchá a pro saturovaná tělíska. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7 a grafu na obrázku 17.

Tabulka 7 - Pevnost v tlaku; fáze 2 [MPa]

Sada	suchá	saturovaná
1	3,149	3,107
2	3,899	2,637
3	3,982	2,589
4	1,938	1,464



Obrázek 17 – Graf: Pevnost v tlaku; fáze 2 [MPa]

Výsledky ukazují, že pevnost v tlaku u sady 2, ve které je 50 % suché směsi tvořeno popílkem, je prakticky stejná jako u sady 3, která je pouze směsí vápna a cementu. Sada 4 (vápno-cement-písek) vykazovala výrazně nižší pevnost v tlaku.

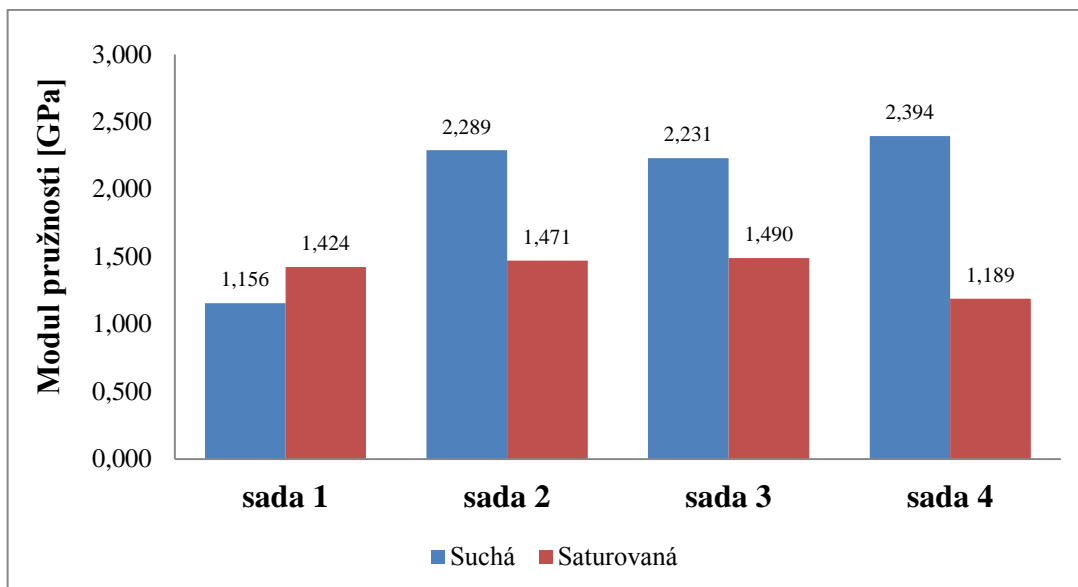
Dále je jasně patrný fakt, že tělesa saturovaná vodou vykazovala vždy výrazně nižší pevnost v tlaku (o přibližně 30 %). Výjimkou je sada 1, kde je rozdíl zanedbatelný. Nabízí se hypotéza, že póry materiálu jsou nasyceny vodou, která při zatížení jednoosým tlakem působí stejným tlakem na celý povrch póru. Tím vzniká v materiálu příčný tah, který přispívá k dřívější destrukci. Tělesa sady 1 se vyznačují výrazným smrštěním ještě ve formě, což pravděpodobně zapříčinilo vznik příčných mikrotrhlin v materiálu. Tyto poruchy měly negativní vliv na pevnost v tlaku (rozdíl cca 20%), ale na druhou stranu díky nim mohla voda unikat z pórů ve chvíli, kdy uvnitř začal vzrůstat tlak. V materiálu tak voda nezpůsobila příčný tah a výsledky u saturovaných tělísek jsou srovnatelné s výsledky u suchých tělísek.

#### 4.2.4 Modul pružnosti

Výpočet modulu pružnosti byl závislý na volbě správné části zatěžovací větve grafu. Mezi jednotlivými hodnotami v sadě byly často značné rozdíly. Výsledky proto vykazují vyšší míru statistické nepřesnosti, než hodnoty pevnosti. Uvedeny jsou v tabulce 8 a grafu na obrázku 18.

Tabulka 8 - Modul pružnosti; fáze 2 [GPa]

Sada	suchá	saturovaná
1	1,156	1,424
2	2,289	1,471
3	2,231	1,490
4	2,394	1,189



Obrázek 18 – Graf: Modul pružnosti; fáze 2 [GPa]

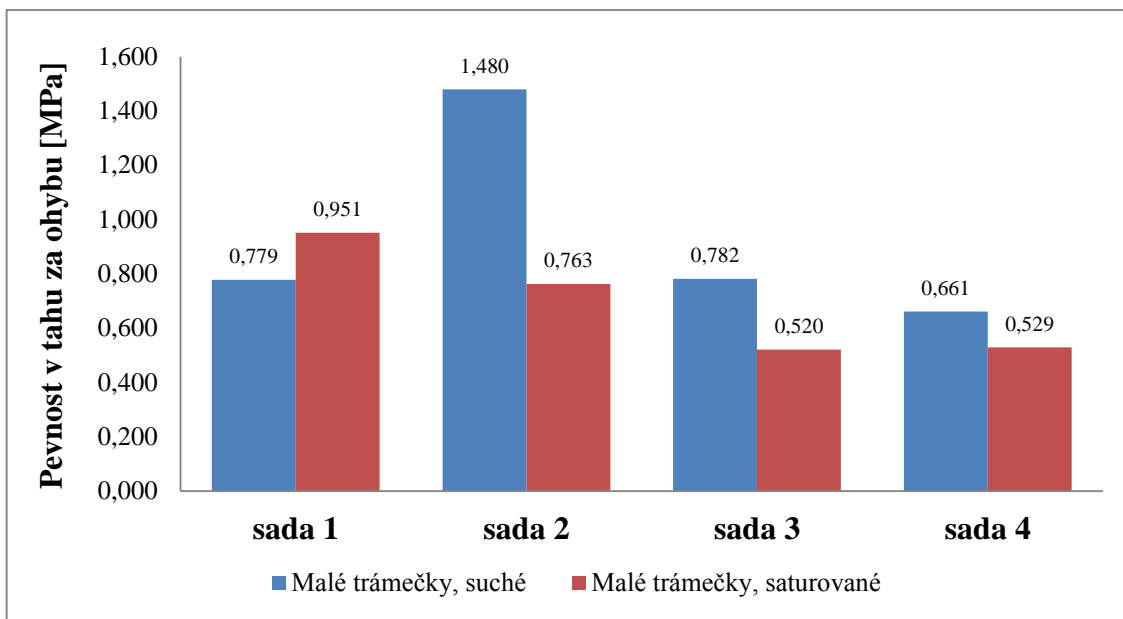
I zde jsou výsledky u sad 2 a 3 velmi podobné. Hodnoty u saturovaných vzorků jsou o cca 35 % nižší. Sada 4 vykazuje poměrně vysoký modul pružnosti u suchých tělísek, ale u saturovaných jsou hodnoty poloviční. Nižší modul pružnosti vykazuje sada 1 u suchých vzorků.

#### 4.2.5 Pevnost v tahu za ohybu

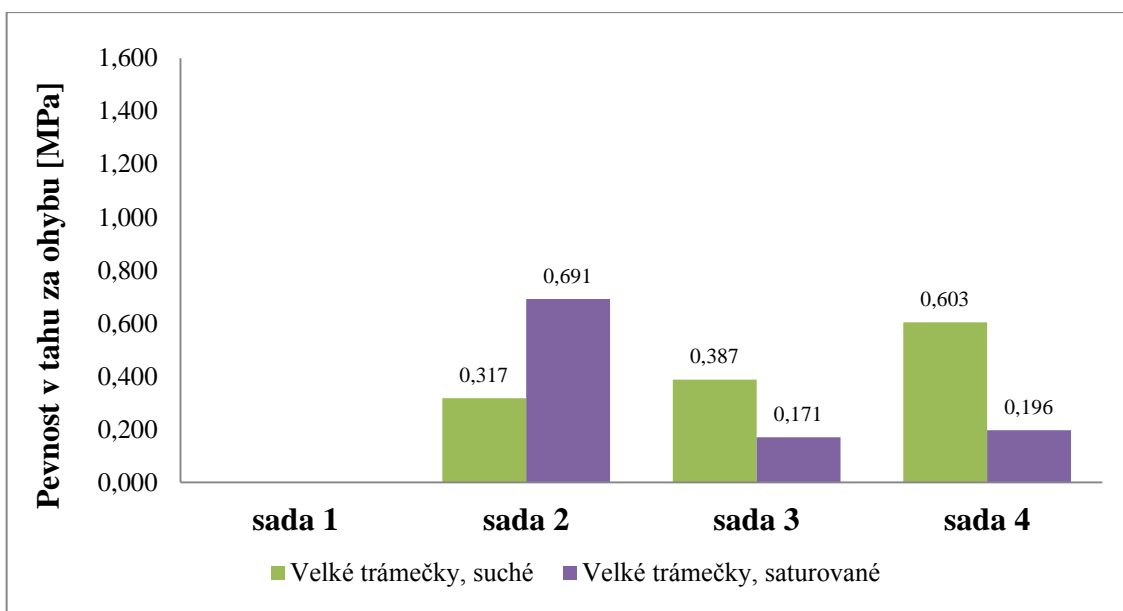
Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu bylo složité, neboť poměrně velká část vzorků, především velkých trámečků, byla porušena už při mnohem menším zatížení, než bylo předpokládáno. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 9. Grafy jsou v tomto případě zvlášť pro malé trámečky na obrázku 19 a zvlášť pro velké trámečky na obrázku 20.

Tabulka 9 - Pevnost v tahu za ohybu; fáze 2 [MPa]

Sada	malé		velké	
	suché	saturované	suché	saturované
1	0,779	0,951	neměřeno	
2	1,480	0,763	0,317	0,691
3	0,782	0,520	0,387	0,171
4	0,661	0,529	0,603	0,196



Obrázek 19 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u malých trámečků; fáze 2 [MPa]



Obrázek 20 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u velkých trámečků; fáze 2 [MPa]

Z výsledků pevnosti v tahu za ohybu u malých trámečků jasně vybočuje sada 2 (s příměsí popílku), kde pevnost suchých trámečků dosahuje téměř dvojnásobku pevnosti v ostatních sadách. Pevnost saturovaných trámečků je vyšší než u sad 3 a 4 (bez příměsi a s pískem), avšak sada 1 vykazuje ještě vyšší pevnost u saturovaných trámečků, zatímco pevnost suchých je srovnatelná se sadami 3 a 4.

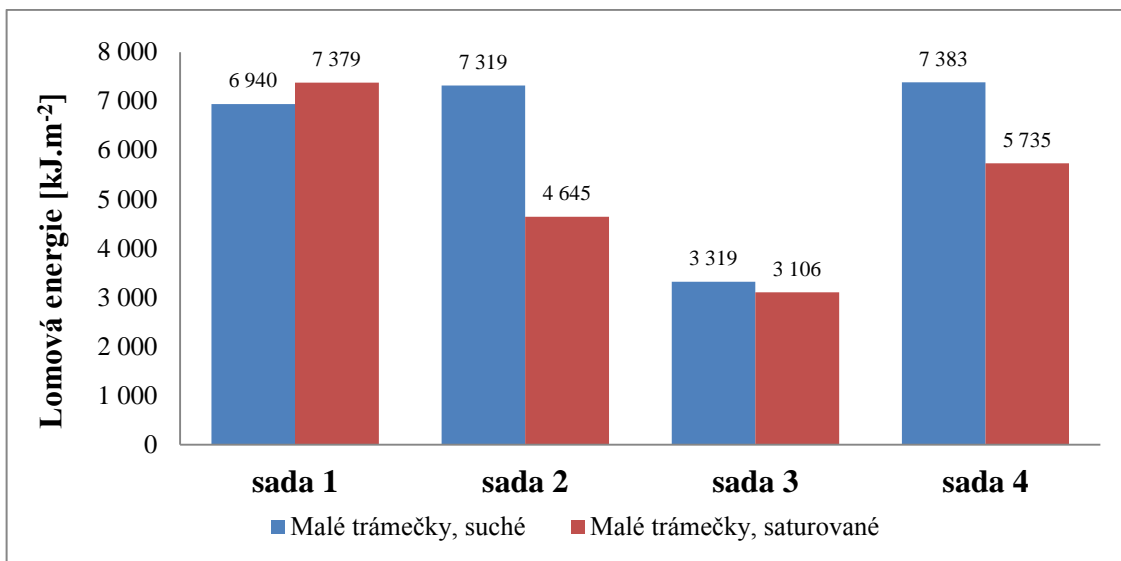
Výsledky u velkých trámečků naprosto nekorespondují s výsledky u malých trámečků. Jedině hodnoty u saturovaných tělísek sady 2 a suchých tělísek sady 4 jsou srovnatelné s těmi, které byly zjištěny u příslušných malých trámečků. Celkově jsou výsledky u velkých trámečků velmi nekonzistentní a hodnoty se liší i v celých násobcích. Nejpravděpodobnější vysvětlení je, že nižší naměřené pevnosti jsou způsobeny množstvím mikroskopických trhlin uvnitř velkých trámečků, které nebyly okem patrné, ale dramaticky ovlivnily výsledky. Často se jednalo o většinu vzorků dané sady. Tento jev se pravděpodobně vyskytoval i u malých trámečků, ale zdaleka ne v takové míře. Ze zmíněného důvodu nelze výsledky vyhodnocené u velkých trámečků považovat za relevantní.

#### 4.2.6 Lomová energie

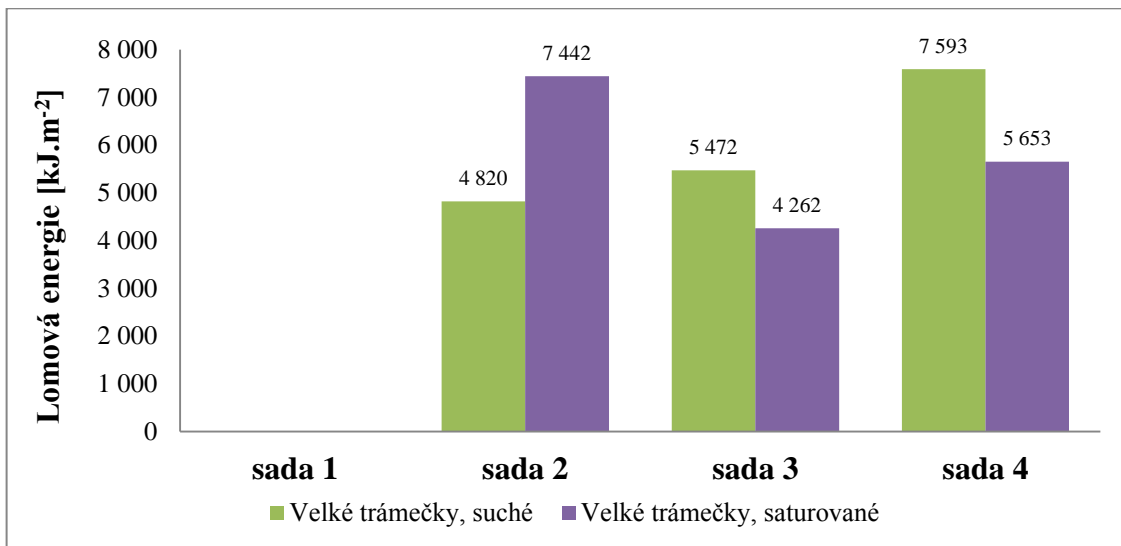
Vyhodnocení lomové energie bylo podobně jako v případě určování modulu pružnosti závislé na volbě vhodné části grafu pro stanovení směrnice pro náhradu nelineárního počátku grafu přímkou. To se mohlo odrazit v nižší statistické přesnosti. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 10 a grafech na obrázcích 21 a 22.

Tabulka 10 - Lomová energie; fáze 2 [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

Sada	malé		velké	
	suché	saturované	suché	saturované
1	6 940	7 379	neměřeno	
2	7 319	4 645	4 820	7 442
3	3 319	3 106	5 472	4 262
4	7 383	5 735	7 593	5 653



Obrázek 21 – Graf: Lomová energie u malých trámečků; fáze 2 [kJ.m<sup>-2</sup>]



Obrázek 22 – Graf: Lomová energie u velkých trámečků; fáze 2 [kJ.m<sup>-2</sup>]

I zde jsou vidět poměrně značné výkyvy výsledných hodnot u jednotlivých sad. Je patrná částečná analogie k pevnostem v tahu za ohybu. Vysoká hodnota lomové energie zpravidla odpovídá vysoké hodnotě pevnosti v tahu za ohybu u stejných vzorků. Rozdíl je možné najít u malých trámečků, kde v rozporu se zmíněnou analogií sady 1 a 4 vykazují vysoké hodnoty v porovnání s ostatními. Sada 3 vykazuje přibližně poloviční hodnotu lomové energie oproti ostatním.

U velkých trámečků již hodnoty nejsou tolik vzdálené hodnotám u malých trámečků (na rozdíl od výsledků pevnosti v tahu za ohybu).

### 4.3 Srovnání výsledků fází 1 a 2

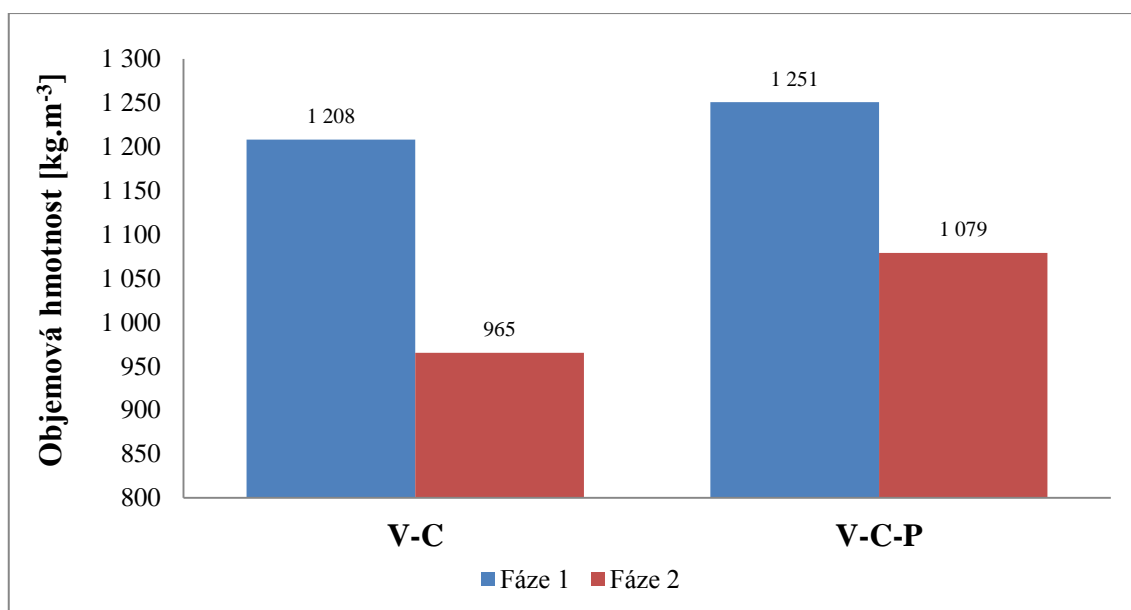
V závěru se nabízí vzájemné srovnání výsledků z fází 1 a 2. Porovnány byly: objemová hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Do srovnání byly zařazeny sady ze dvou směsí. První je směs vápna a cementu 2:1, z níž je vyrobena sada 1 ve fázi 1 a sady 1 a 3 ve fázi 2. Sada 1 ve fázi 2 se však kvůli nadměrnému smrštění poněkud vymykala a tudíž do srovnání zařazena nebyla. Druhou směsí je směs vápna, cementu a popílku v poměru 2:1:3. Z té byla v první fázi vyrobena sada 4 a ve druhé fázi sada 2. V každé fázi bylo použito různé vápno – ve fázi 1 obsahovalo hrudky, zatímco ve fázi 2 bylo jemně mleté bez hrudek. To si vyžádalo i rozdílný vodní součinitel v jinak stejných směsích. Proto lze očekávat, že se budou lišit i svými vlastnostmi.

#### 4.3.1 Objemová hmotnost

Byla porovnávána pouze malá tělíska stará 28 dní (u velkých byla nejasnost s vlhkostí). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11 a grafu na obrázku 23.

Tabulka 11 - Objemová hmotnost; srovnání [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Směs	Fáze 1	Fáze 2
V-C	1 208	965
V-C-P	1 251	1 079



Obrázek 23 – Graf – objemová hmotnost malých tělísek; srovnání [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]



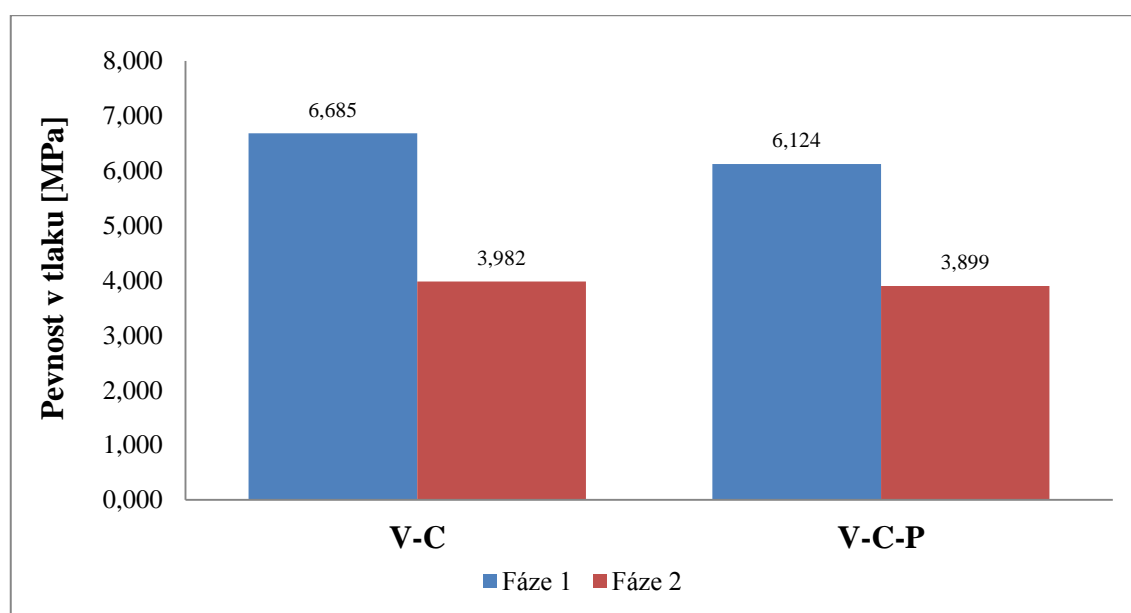
Z porovnání je zřejmé, že tělesa z 1. fáze měla poměrně výrazně vyšší objemovou hmotnost. Příčinou byl pravděpodobně nižší vodní součinitel. Materiál byl tedy i hutnější a obsahoval menší objem vzduchových pórů. V obou případech měla nepatrně vyšší objemovou hmotnost směs s obsahem popílku. Výraznější to bylo u směsi ve fázi 2, jelikož díky jemně mletému vápnu se více projevil obsah „těžšího“ popílku ve směsi.

#### 4.3.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je uvedena v tabulce 11 a grafu na obrázku 24.

Tabulka 12 - Pevnost v tlaku; srovnání [MPa]

Směs	Fáze 1	Fáze 2
V-C	6,685	3,982
V-C-P	6,124	3,899



Obrázek 24 – Graf: Pevnost v tlaku; srovnání [MPa]

Je evidentní velký rozdíl v pevnosti mezi fázemi 1 a 2. Tělesa vyrobená ze směsi obsahující vápno s hrudkami, které je méně kvalitní, vykazovala paradoxně výrazně vyšší pevnost v tlaku. Je to pravděpodobně dáno tím, že tělesa z těchto směsí měla nižší vodní součinitel a materiál byl hutnější, jak již bylo poznamenáno v předchozí podkapitole (4.3.1). Rozdíl mezi tělesy ze směsi obsahující popílek a směsi bez popílku

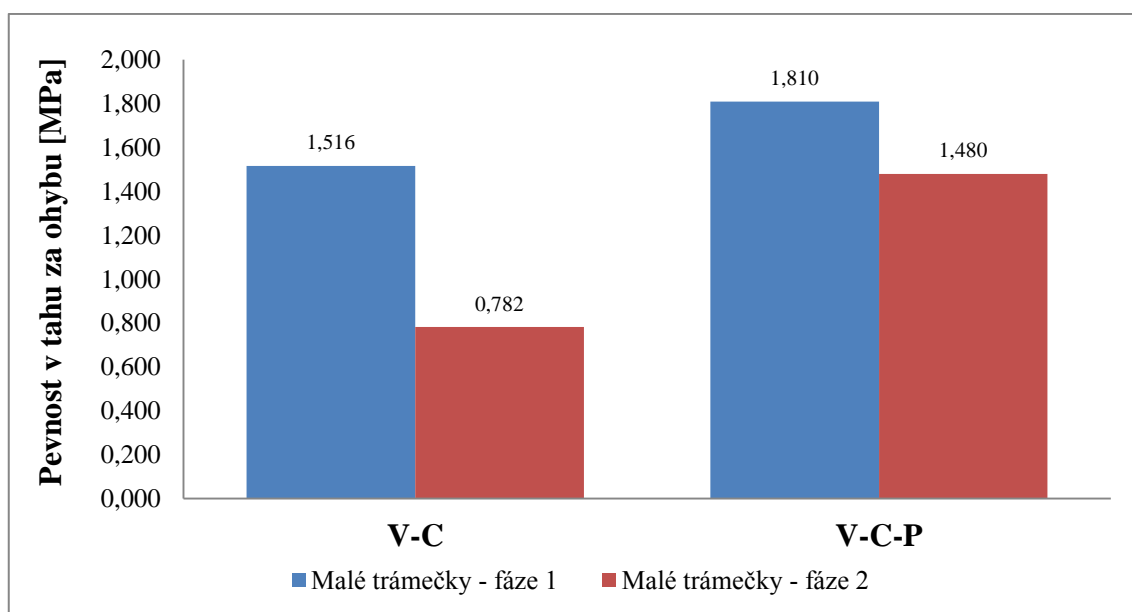
je poměrně malý, výraznější ve fázi 1, ale vždy ve prospěch směsi bez obsahu popílku. Výše rozdílu je v mezích možné statistické nepřesnosti.

#### 4.3.3 Pevnost v tahu za ohybu

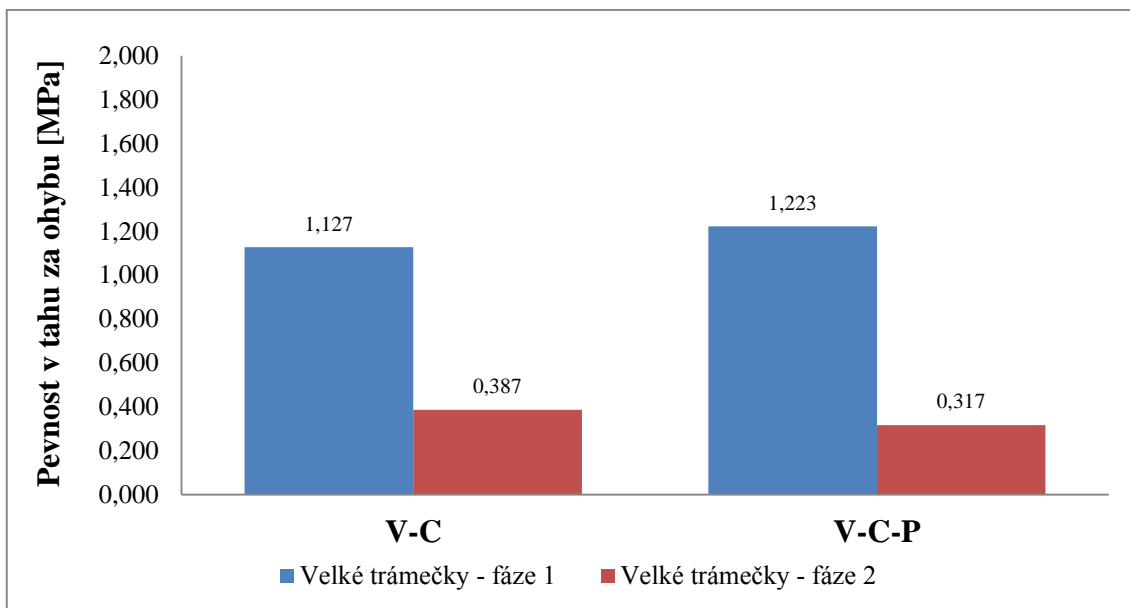
Pevnost v tahu za ohybu je uvedena v tabulce 12 a grafech na obrázcích 25 a 26.

Tabulka 13 - Pevnost v tahu za ohybu; srovnání [MPa]

Směs	malé		velké	
	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 1	Fáze 2
V-C	1,516	0,782	1,127	0,387
V-C-P	1,810	1,480	1,223	0,317



Obrázek 25 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u malých trámečků; srovnání [MPa]



Obrázek 26 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u velkých trámečků; srovnání [MPa]

I v tomto případě vykazují tělesa vyrobená ve fázi 1 lepší vlastnosti než tělesa z fáze 2. Důvod je pravděpodobně stejný jako u předchozích (vyšší hutnost, menší objem pórů). Trámečky ze směsi obsahující popílek vykazovaly jak ve fázi 1, tak ve fázi 2, vyšší pevnost v tahu za ohybu. Výjimkou jsou velké trámečky z fáze 2, které ale, jak již bylo uvedeno výše (4.2.5), nelze kvůli velkému počtu vadných vzorků považovat za relevantní.

## 5 Závěr

Tato práce se zabývala vlastnostmi vápenocementové malty s příměsí elektrárenského popílku. Cílem této práce bylo zjistit vlastnosti ztvrdlé směsi vápna, cementu a popílku a porovnat je se směsí bez obsahu popílku. Byla vyrobena tělíska z různých směsí s obsahem popílku i bez něj, také směs s obsahem písku. Měřily se rozměry a hmotnost vzorků a vzorky byly zkoušeny na přístroji MTS Aliance RT-30. Z výsledků byla určena objemová hmotnost, nasákavost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, modul pružnosti a lomová energie.

Experimentální část proběhla ve dvou ucelených fázích, z nichž každá zahrnovala výrobu zkušebních tělísek, měření a statistické vyhodnocení výsledků. V každé fázi byly použity jiné směsi a fáze se také lišily způsoby zkoušení vzorků.

Ve fázi jedna byly vyrobeny 3 sady tělísek lišící se obsahem popílku. Zkoušky pevnosti proběhly po 14 a po 28 dnech. Kvůli nedostatku času byla tělíska vyrobena pouze v omezeném množství. Cílem této fáze bylo získání základních poznatků a vlivu příměsí popílku na pevnost malty.

Ve druhé fázi měla být vyrobena jedna sada ze směsi bez obsahu popílku, jedna sada ze směsi s 50 % popílku a jedna sada ze směsi s 50 % písku. Zkoušky byly prováděny po 28 dnech. Polovina těles byla na 2 dny bezprostředně před zkouškou uložena do vody, aby byla zjištěna jejich nasákavost a pevnost materiálu saturovaného vodou. Množství těles bylo vyšší než ve fázi 1, čímž bylo dosaženo nižší statistické chyby. Cílem této fáze bylo získání přesnějších informací o konkrétní směsi vápna, cementu a popílku, její srovnání se směsí bez popílku a se směsí se stejným množstvím písku. Navíc byla snaha získat i další data, jako je modul pružnosti a lomová energie.

V první fázi bylo použito starší vápno, které vlivem absorbované vlhkosti obsahovalo hrudky. Ve fázi 2 bylo použito nové vápno bez hrudek. Vlivu rozdílů v použitém vápnu na pevnost materiálu nebyla přikládána velká váha. Promítlo se to však do množství vody potřebného pro rozmíchání směsi.

Předpokladem bylo, že doba 28 dní je příliš krátká na zapojení popílku do chemické reakce ve směsi a že popílek bude plnit pouze funkci jemného plniva. Očekávalo se, že

příměs popílku negativně ovlivní tlakovou i tahovou pevnost materiálu, ale bude příznivější, než příměs písku. Ohledně objemové hmotnosti byl předpoklad takový, že popílek díky své nízké objemové hmotnosti nebude mít výrazný vliv.

Při výrobě první sady těles ve fázi 2 se vyskytnul problém s přílišným smrštěním (pravděpodobně vlivem jiného vápna) a popraskáním vzorků. Byl vyřešen výrobou náhradní sady a zakrýváním forem mikrotenovou fólií pro zpomalení vysychání.

Z výsledků zkoušek lze vyvodit tyto závěry:

- příměs popílku zvyšuje objemovou hmotnost materiálu, ale výrazně méně než písek – směs tvořena z jedné poloviny popílkem má přibližně o 10% vyšší objemovou hmotnost, než směs samotného vápna a cementu, směs se stejným obsahem písku má přibližně o 30% vyšší objemovou hmotnost,
- příměs popílku nemá výrazný vliv na tlakovou pevnost materiálu, naopak příměs písku snižuje pevnost přibližně o 50 %,
- modul pružnosti je srovnatelný u všech tří směsí (bez popílku, s popílkem, s pískem),
- příměs popílku má proti očekávání pozitivní vliv na pevnost materiálu v tahu za ohybu – ve všech případech byla pevnost vyšší, než u směsi bez obsahu popílku,
- velký vliv na pevnost má použité vápno a vodní součinitel – směs z vápna obsahujícího hrudky měla nižší vodní součinitel, byla hutnější a v tlaku vykazovala zhruba o 60 % vyšší pevnost, v tahu za ohybu i téměř dvojnásobnou, což však také mohlo být způsobeno rozdílnou kvalitou trámečků,
- směs s popílkem je méně nasákavá, než směs bez popílku, směs s pískem má ještě nižší nasákavost (bez příměsi 57 %, s popílkem 41 %, s pískem 36 %),
- vzorky nasycené vodou vykazují o 30-50 % nižší pevnost v jednoosém tlaku, ta je však pravděpodobně způsobena hydrostatickým tlakem v pórech, jelikož sada 1, která trpěla výrazným smrštěním (a pravděpodobně mikrotrhlinkami ve struktuře), nevykazovala nižší pevnost u nasycených vzorků, v krátkodobém horizontu (2 dny) pravděpodobně nedochází k výraznějšímu negativnímu vlivu vody na chemickou stavbu materiálu,

- vliv saturace vzorků vodou na modul pružnosti je analogický k vlivu na pevnost v tlaku.

Závěrem lze tedy konstatovat, že popílek nemá negativní vliv na tlakovou ani tahovou pevnost vápenocementové malty. Byl potvrzen předpoklad, že směs s popílkem má podle všech provedených zkoušek lepší vlastnosti než směs s pískem. Mnohem větší vliv na pevnost má použité vápno a vodní součinitel.

## 6 Seznam obrázků

Obr.1 – Schéma uhelné elektrárny se spalováním na fluidním loži [6]	17
Obr.2 – Reakce popílku z portlanditem pocházejícím z hydratace cementu [1]	19
Obr.3 – Řez tělesem z fáze 1...	21
Obr.4 – Lomová plocha tělesa z fáze 2...	21
Obr.5 – Ukázka plných forem 20x20x100 mm a 40x40x160 mm	22
Obr.6 – Odformovaná tělesa sady 3 a 4 z první fáze	22
Obr.7 – Tělísko s připevněným extenzometrem po skončení zkoušky	24
Obr.8 – Velký trámeček po skončení tříbodové zkoušky tahu za ohybu	25
Obr.9 – Ukázka získání modulu pružnosti...	27
Obr.10 – Ukázka úpravy nelineárního začátku grafu	28
Obr.11 – Ukázka úpravy nelineárního začátku grafu	28
Obr.12 – Graf: Objemová hmotnost; fáze 1 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	29
Obr.13 – Graf: Pevnost v tlaku; fáze 1 [MPa]	30
Obr.14 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu; fáze 1 [MPa]	31
Obr.15 – Graf: Objemová hmotnost; fáze 2 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	32
Obr.16 – Graf: Nasákavost; fáze 2 [%]	33
Obr.17 – Graf: Pevnost v tlaku; fáze 2 [MPa]	34
Obr.18 – Graf: Modul pružnosti; fáze 2 [GPa]	36
Obr.19 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u malých trámečků; fáze 2 [MPa]	37
Obr.20 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u velkých trámečků; fáze 2 [MPa]	37
Obr.21 – Graf: Lomová energie u malých trámečků; fáze 2 [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	39
Obr.22 – Graf: Lomová energie u velkých trámečků; fáze 2 [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	39
Obr.23 – Graf – objemová hmotnost malých tělísek; srovnání [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	40
Obr.24 – Graf: Pevnost v tlaku; srovnání [MPa]	41
Obr.25 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u malých trámečků; srovnání [MPa]	42
Obr.26 – Graf: Pevnost v tahu za ohybu u velkých trámečků; srovnání [MPa]	43

## **7 Seznam tabulek**

Tab.1 - Složení cementu CEM I 42,5 R (hodnoty uvedeny v %)	<b>21</b>
Tab.2 - Objemová hmotnost; fáze 1 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	<b>29</b>
Tab.3 - Pevnost v tlaku; fáze 1 [MPa]	<b>30</b>
Tab.4 – Pevnost v tahu za ohybu; fáze 1 [MPa]	<b>31</b>
Tab.5 - Objemová hmotnost; fáze 2 [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	<b>32</b>
Tab.6 - Nasákavost; fáze 2 [%]	<b>33</b>
Tab.7 - Pevnost v tlaku; fáze 2 [MPa]	<b>34</b>
Tab.8 - Modul pružnosti; fáze 2 [GPa]	<b>35</b>
Tab.9 - Pevnost v tahu za ohybu; fáze 2 [MPa]	<b>36</b>
Tab.10 - Lomová energie; fáze 2 [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	<b>38</b>
Tab.11 - Objemová hmotnost; srovnání [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	<b>40</b>
Tab.12 - Pevnost v tlaku; srovnání [MPa]	<b>41</b>
Tab.13 - Pevnost v tahu za ohybu; srovnání [MPa]	<b>42</b>



## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] Concrete Research Letters. ISLAM, Moinul a Saiful ISLAM. *Strength Behaviour of Mortar Using Fly Ash as Partial Replacement of Cement* [online]. Bangladesh, 2010 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.issres.net/journal/index.php/crl/article/viewFile/104/68>
- [2] Connexions. BARRON, Andrew. *Hydration of Portland Cement* [online]. [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://cnx.org/content/m16447/latest/>
- [3] Hellenic cement industry association. *History of cement and concrete* [online]. [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.hcia.gr/3a.html#>
- [4] KEJÍK, Pavel. *Rozpustnost elektrárenských popílků ve vysoce alkalickém prostředí: Solubility of power plant fly ashes in high-alkali environment*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2010.
- [5] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [6] TICHÝ, Vít. *Program obnovy uhelných zdrojů v ČEZ. časopis stavebnictví* [online]. 2007, 4, [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=182>