

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na
bázi sulfátovápenatého popílku**

**Bc. Matouš Krása
2019**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 5. 1. 2019

.....

Matouš Krása

Poděkování:

Na prvním místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D., za trpělivost, odborné rady a pomoc při vytváření této diplomové práce, dále pracovníkům Experimentálního centra FSv, ČVUT v Praze, zvláště pak panu Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D., Doc. Ing. Jiřímu Litošovi Ph.D. a také pracovníkům Prefy Žatec, s.r.o. Na závěr patří velké poděkování mé rodině a přátelům, kteří mě provázeli a podporovali během celého studia.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Krása	Jméno: Matouš	Osobní číslo: 424453
Zadávající katedra: K122 - Katedra technologie staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Fyzikálně – mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku	
Název diplomové práce anglicky: Physical – mechanical properties of a material on the basis of sulfocalcic ash	
Pokyny pro vypracování:	
1) Rešerše k fyzikálním chemickým paramétrům betonů s ohledem na jejich mechanické vlastnosti.	
2) Návrh betonů s pojivem Sorfix s ohledem na zvýšení odolnosti proti CHRL, zmrazovacím cyklům.	
3) Návrh experimentu k určení smrštění materiálu (fyzikální a chemické). Ověření fyzikálních vlastností v průběhu zrání materiálu pomocí ultrasonických metod.	
4) Provedení experimentů.	
5) Vyhodnocení experimentů vč. návrhu závislosti a vztahů k mechanickým vlastnostem materiálu.	
6) Optimalizace navrženého řešení.	
Seznam doporučené literatury:	
1) HOŠEK, J. Měření počátečních objemových změn betonu v prýtové vlnovcové formě. In Stavební výzkum 3 '86, s. 28 – 32.	
2) ČSN 731326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických 3)	
3) Strnad, T.: „Fyzikálně – mechanické vlastnosti materiálu na bázi alkalicky aktivovaného popílku“, disertační práce 2010	
4) VALENZA, J. John II. a SCHERER, W. George. A review of salt scaling: II. Mechanisms	
5) DOHNALEK, Jiří. Vliv Mrazuvzdornosti na jeho povrchové úpravy	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 04.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 06.01.2019
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Tato diplomová práce je věnovaná fyzikálně-mechanickým vlastnostem betonů, u kterých je jako pojivo použit popílek. V úvodu jsou popsány objemové změny betonu, konkrétně různé druhy smrštění. Dále je teoretická část věnována trhlinám jakožto důsledkům těchto objemových změn, parametrům, které ovlivňují vznik a velikost smrštění, a způsobům, jak smrštění měřit. Autor zde uvádí i výsledky smrštění POP betonů. V závěru teoretické části se pojednává o normových požadavcích na beton užívaný při výrobě silničních panelů. V praktické části jsou popsány vstupní materiály, používané při výrobě vzorků, zvolené postupy výroby a zkoušek vzorků a metodika. V závěrečné části se autor věnuje výsledkům a jejich vyhodnocení. Na konec je provedeno shrnutí a vyhodnocení práce.

Klíčová slova

- Objemové změny
- Trhliny
- Obsah vzduchu
- Pevnost v tlaku
- Chemické rozmrazovací látky
- Smrštění

Annotation

This master thesis deals with the physico-mechanical properties of concrete where ash is used as a binder. In the introduction, there are examined volume changes of the concrete, namely the different types of shrinkage. Further, the theoretical part describes cracks as a consequence of these volume changes, the parameters that influence the formation and the size of the shrinkage and the ways to measure the shrinkage. The author also reports the shrinkage of POP concrete. At the end of the theoretical part are discussed the standard requirements for concrete used in the production of road panels. In the practical part are described the input materials used in the production of samples, chosen methods of production and testing of samples and methodology. In the final part, the author focuses on the results and their evaluation. Finally, a summary and evaluation of work are done.

Keywords

- Volume changes
- Cracks
- Air content
- Compressive strengths
- Chemical thaw substances
- Shrinkage

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část	11
1.1 Objemové změny betonu.....	11
1.1.1 Plastické smrštění	11
1.1.2 Autogenní, chemické smrštění.....	11
1.1.3 Karbonatační smrštění	12
1.1.4 Smrštění vysycháním	12
1.2 Dělení trhlin	13
1.3 Parametry ovlivňující smrštění	14
1.3.1 Vliv druhu cementu.....	14
1.3.2 Vliv vodního součinitele	15
1.3.3 Vliv plastifikačních přísad.....	16
1.3.4 Vliv mikroplniv.....	17
1.4 Měření smrštění.....	17
1.4.1 Měření chemického smrštění	17
1.4.2 Měření chemického smrštění a smrštění vysycháním	19
1.5 Normové požadavky na smrštění.....	21
1.6 Normové požadavky na silniční panely.....	24
Seznam použitých zdrojů	26
Seznam obrázků	28
Seznam grafů.....	29
Seznam tabulek	30
Seznam příloh.....	Chyba! Záložka není definována.

Úvod

Elektrárenský popílek, většinou lidí vnímán jako odpadní materiál, vzniká denně a řadu let ještě nejspíš bude. Otázkou proto zůstává, jak bychom s ním měli nakládat? Máme pro něj využití odpovídající jeho denní produkci?

Naší snahou je proto nalézt smysluplné řešení, aby nemuselo docházet k jeho skládkování, a přeměnit odpadní materiál v materiál konstrukční. Částečně se to daří, například přidáváním popílku do betonových směsí, naším cílem je však úplné nahrazení cementu popílkem (POP beton) a tím zvýšení jeho spotřeby.

V minulosti se již řada prací věnovala tomuto tématu a já bych v něm chtěl pokračovat. Mimo jiné bych chtěl navázat na svoji bakalářskou práci na téma: Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku, kde jsem se hlavně zabýval pevností POP betonů a jejich odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám. Dále bych chtěl navázat na disertační práci Strnada (2010), který v minulosti měřil smrštění popílkových betonů a porovnával je se smrštěním betonů s cementovým pojivem. Dříve se při realizaci silničních panelů z POP betonu objevil problém se vznikajícími trhlinami, které byly důsledkem smrštění, proto je jedním z mých cílů toto smrštění změřit a zjistit jeho příčiny.

Nejprve bych však chtěl provést úpravu receptur dodaných od Prefa Žatec s.r.o. pro jednotlivé pevnostní třídy betonů s cementovým pojivem na pojivo Sorfix. Upravená receptura musí splňovat normové požadavky na silniční panely kategorie CB III (obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy, dočasné komunikace a účelové komunikace). Konkrétně se jedná o splnění požadavků na pevnost (C25/30), obsah vzduchu v čerstvé směsi (4,5 %) a odolnost proti chemickým, rozmrazovacím látkám (1000 g/m² – 75 cyklů, metodou A). Mimo pevnostní třídu C 25/30 bude snaha dosáhnout i pevnosti POP betonu C 40/50.

S upravenými recepturami bude snaha o spolupráci s Prefa Žatec při uvádění do poloprovozu. Konkrétně se jedná o výrobu silničních panelů a prefabrikátů pro představitelné dělicí stěny (lego kostky) přímo na jejich výrobní lince. Na těchto panelech a kostkách bude sledován vznik případných trhlin.

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

Pro sledování průběhu a rozsahu smrštění u betonů s popílkovým pojivem bych chtěl realizovat popílkové a cementové kaše a měřit bezdotykovou metodou chemické smrštění a smrštění vysycháním na vlnovcových formách a trámečcích.

Cíle práce:

- Rešerše objemových změn betonu a jimi způsobených trhlin,
- Rešerše parametrů ovlivňujících smrštění,
- Rešerše měření smrštění,
- Rešerše smrštění POP betonů,
- Rešerše normových požadavků na silniční panely,
- Návrh betonových směsí C25/30 a C40/50 na bázi popílku splňující požadavky norem pro silniční panely CB III,
- Uvedení těchto směsí do poloprovozu,
- Zkouška pevnosti v tlaku,
- Zkouška odolnosti proti chemickým, rozmrazovacím látkám,
- Měření smrštění.

1 Teoretická část

1.1 Objemové změny betonu

Objemové změny, které jsou postupné a nejsou způsobeny žádnou vnější silou, nazýváme smrštěním. Jedna z možností, jak můžeme smrštění dále dělit, je dle jeho původu (vlivu, kterými bylo vyvoláno) na:

- Plastické smrštění,
- Autogenní, chemické smrštění,
- Karbonatační smrštění,
- Smrštění vysycháním.

Všechny tyto druhy smrštění se projevují různě v čase a jejich rozsah se také liší. [13]

1.1.1 Plastické smrštění

Plastické smrštění, jehož důsledkem je tvorba mikrotrhlin, nastává v čerstvém betonu, tedy betonu, který je v plastickém stavu. Je způsobeno ztrátou vody z jeho povrchu. Tento jev nastává v případě betonování za nevhodných podmínek, nebo v případě přiléhajícího suchého materiálu, což může být starý beton nebo půda, která plastickému betonu odebere kapilárním sáním vodu. Plastickému smrštění můžeme zabránit zamezením rychlému odparu vody, tedy betonováním při nízké rychlosti větru, nízké teplotě a za vysoké relativní vlhkosti. Z hlediska složení lépe odolávají betony s vyšším obsahem cementu a jemných částic a nižším vodním součinitelem. Přidáním vláken do betonu lze také zvýšit jeho odolnost proti vzniku trhlin, nezabráníme tím však plastickému smrštění. [13]

1.1.2 Autogenní, chemické smrštění

V průběhu hydratace cementových zrn, tedy reakce cementu a záměsové vody, vznikají produkty hydratace (hydráty křemičitanu vápenatého, hydroxid vápenatý) a teplo. Chemické smrštění vzniká v důsledku menšího objemu produktů hydratace oproti reagujícím látkám. Díky pevné fázi složené z produktů hydratace je chemické smrštění částečně potlačeno, což má za následek vyprazdňování kapilárních pórů a pokles relativní vlhkosti (vnitřní vysoušení) Současně dochází ke zvyšování

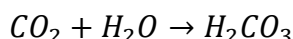
Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

kapilárních tahových sil, které způsobují zmenšování objemu označované jako autogenní smršťování.

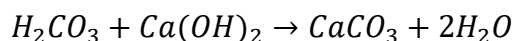
Toto smršťování se vyznačuje tím, že probíhá i v případě, že je beton utěsněn a není možnost pohybu vlhkosti dovnitř ani ven, dále také tím, že probíhá ve stejné velikosti jak na povrchu, tak i v jádru tělesa. Rozdílné chování můžeme pozorovat pouze u masivních konstrukcí, kde je rozdíl napříč průřezem způsoben hydratačním teplem. Vzniklé teplo urychluje hydrataci a tím dochází ke zrychlení autogenního smrštění. [13]

1.1.3 Karbonatační smrštění

S karbonatačním smrštěním se pojí dvě chemické reakce. Jednou z nich je reakce oxidu uhličitého a vody.



V místech s napětím dochází k rozpouštění krystalů hydroxidu vápenatého kyselinou uhličitou a vzniká uhličitán vápenatý, který se ukládá v oblastech bez napětí.



Toto má za následek vyšší stlačitelnost a obvykle to označujeme jako smršťování. Nejvyšších výsledků se dosahuje při relativní vlhkosti prostředí 50 %, zatímco při 0 %, nebo při 100 % k reakci téměř nedochází. V případě nízké relativní vlhkosti, není dostatek vody pro vznik kyseliny uhličité, a naopak při vysoké vlhkosti jsou póry zaplněny vodou, kvůli které nemůže pronikat dovnitř oxid uhličitý.

Při karbonatačním smrštění dochází k nárůstu hmotnosti, kvůli absorpci oxidu uhličitého. [13]

1.1.4 Smrštění vysycháním

Kvůli rozdílné vlhkosti betonu a okolního prostředí dochází k pohybu vlhkosti z míst s vyšší relativní vlhkostí do míst s nižší relativní vlhkostí. Na začátku vysychání betonu dochází ke ztrátě vody z kaveren a velkých pórů, což má za následek značnou ztrátu váhy, avšak pouze malou deformaci. S pokračujícím vysycháním dochází ke ztrátě adsorbované vody z kapilárních pórů. Tímto dochází ke zvýšení napětí a vzniku smrštění.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

Velikost smrštění vysycháním závisí na mnoha parametrech:

- relativní vlhkosti – nižší relativní vlhkost, větší smrštění,
- vodním součiniteli (cement/voda) – vyšší w/c, větší smrštění,
- velikosti vzorku – větší vzorek, menší smrštění,
- tvaru vzorku,
- příměsích,
- přísadách,
- způsob ošetřování betonu.

[13]

1.2 Dělení trhlin

Trhliny lze očekávat v každém betonu. Vznikají v případě, že je překročena tahová pevnost betonu. Nevedou k úplnému oddělení části materiálu a často nejsou viditelné. Naopak lom způsobuje úplné oddělení materiálu. Trhliny mají vliv na pevnost a trvanlivost betonových konstrukcí.

Můžeme je dělit dle jejich charakteru následovně:

- **Konstrukční, statické trhliny**, jsou následkem stálých, nahodilých a dynamických zatížení, které působí na danou konstrukci. Vznikají při přetížení konstrukce.
- **Nekonstrukční, nestatické trhliny**, jsou způsobeny vlastnostmi a vnitřním napětím hmoty (provedení, technologie materiálů), vyznačují se náhodným charakterem.

Dle vzniku můžeme u směsí s cementovým pojivem dále dělit nekonstrukční, nestatické trhliny na:

- **Plastické smršťovací trhliny**, z názvu je patrné, že tento druh trhlin vzniká v betonu, když je ještě v plastickém stavu. Časově lze toto stádium ohraničit mezi 0,1 až 6 hodin po betonáži. Tyto trhliny dále dělíme na:
 - Trhliny způsobené sedáním směsi (sedání přes výztuž, v místech, kde dochází ke změně výšky průřezu konstrukce...),
 - Trhliny způsobené rychlým odpařením vody.
(viz kapitola 1.1.1 Plastické smrštění)

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

- **Teplotní trhliny v počátečním stadiu tuhnutí a tvrdnutí**, trhliny způsobené teplotami, která jsou vyvolány hydratací (reakce cementu s vodou).
- **Smršťovací trhliny vzniklé vlivem hydratace, autogenní smršťování** (viz kapitola 1.1.2 Autogenní smršťování)
- **Smršťovací trhliny vzniklé vlivem vysychání** (viz kapitola 1.1.3 Smrštění vysycháním)
- **Expanzní trhliny**, vyvolány dlouhodobými procesy v přítomnosti vlhkosti. Mezi tyto procesy patří:
 - o Alkalická reakce kameniva s cementem,
 - o Koroze výztuže, jímž vzniklé expanzní tlaky, které způsobují povrchové oddělování vrstev betonu,
 - o Vliv vlhkosti a mrazu,
 - o Síranová koroze.

[15]

1.3 Parametry ovlivňující smrštění

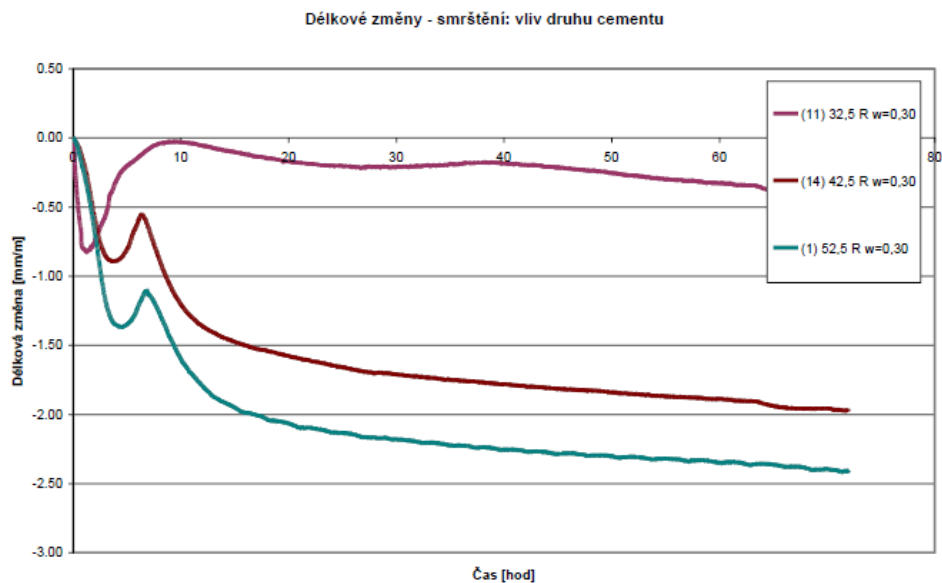
Docent Litoš ve svém sborníku: Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí (2011), zkoumal vliv jednotlivých parametrů cementových past na jejich objemové změny, autogenní smrštění. Mimo jiné se ve své práci věnoval vlivu druhu cementu, vodního součinitele, plastifikačních přísad a vliv mikroplniv. Měření probíhalo minimálně prvních 48 hodin bezkontaktně pomocí laserových snímačů na pryžových, vlnovcových formách. Mimo smrštění byla souběžně měřena teplota uvnitř vzorků.

[15]

1.3.1 Vliv druhu cementu

Vliv druhu cementu na autogenní smrštění byl měřen na cementech 32,5 R, 42,5 R, a 52, 5 R při dodržení stejného vodního součinitele. Výsledkem tohoto experimentu bylo, že s vyšší pevnostní třídou cementu se také zvětšuje jeho smrštění. Zároveň i dosažená maximální teplota byla vyšší u cementů s vyšší pevnostní třídou.

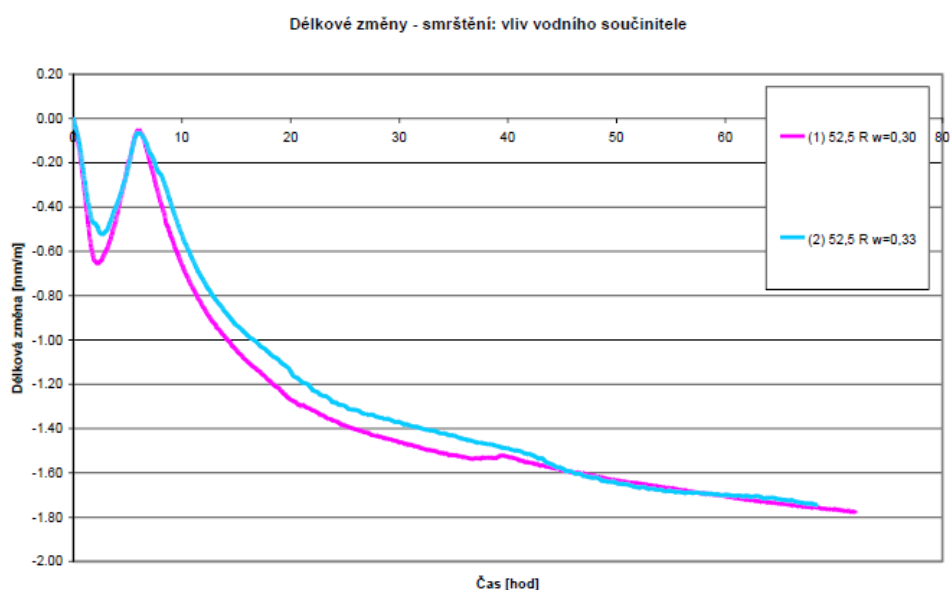
Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápennatého popílku



Graf 1: Průběh délkové změny v čase, vliv druhu cementu [15]

1.3.2 Vliv vodního součinitele

Na grafu 2, který zobrazuje průběh délkové změny v čase, je patrné, že **změna vodního součinitele** $w = 0,3$ a $w = 0,33$ (obě záměsi byly v použitelné konzistenci) **nemá podstatný vliv na objemové změny**. Obecně se však má za to, že s nižším vodním součinitelem jsou objemové změny větší [17]. [15]



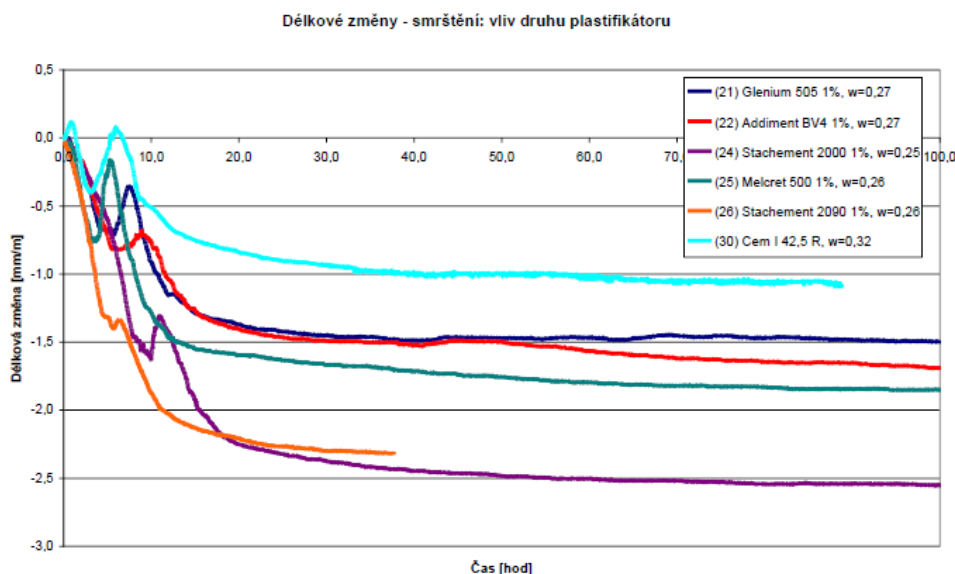
Graf 2: Průběh délkové změny v čase, vliv vodního součinitele [15]

1.3.3 Vliv plastifikačních přísad

Docent Litoš zkoumal vliv plastifikátoru, zároveň se věnoval i vlivu změny dávkování těchto přísad na výsledné smrštění.

Zkoumány byly plastifikační přísady běžně dostupné u nás. Dávkovány byly po 1 % z hmotnosti cementu. **Plastifikátory jako takové měly za následek významné smrštění**, v porovnání se vzorkem, který je neobsahoval. Na grafu můžeme vidět, že maximálního smrštění bylo dosaženo s plastifikátorem Stachement 2000 a naopak nejmenší s Glenium 505.

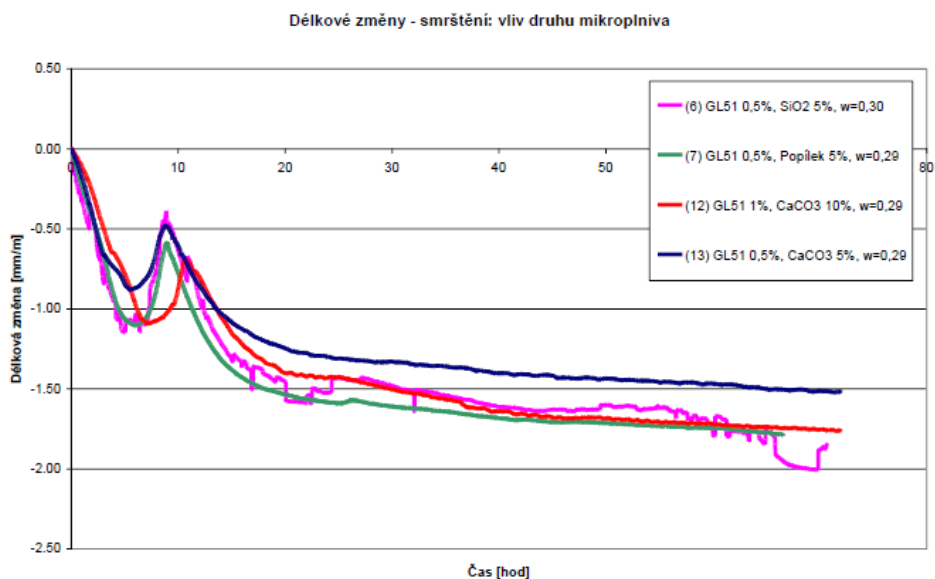
Ve druhé části byly vyrobeny směsi s dávkováním plastifikátoru 1 % a 2 % z hmotnosti cementu. Zkoumány byly plastifikátory Stachement 2000 a Glenium 505. Zvětšení dávkování mělo za následek i zvětšení smrštění, v případě Glenium 505 stouplo smrštění z - 1,5 mm/m na -2,2 mm/m a v případě Stachement 2000 z - 1,7 mm/m na -2,3 mm/m. [15]



Graf 3: Průběh délkové změny v čase, vliv druhu plastifikátoru [15]

1.3.4 Vliv mikroplniv

Při porovnávání vlivu mikroplniv byl použit cement CEM I 52,5 R, ke kterému byli přidávány příměsi (SiO_2 , popílek, CaCO_3). Dávkování bylo 5 % a v případě CaCO_3 bylo zkoušeno i dávkování 10 %. Výsledkem tohoto pokusu je, že **mikroplniva snižují objemové změny, smrštění betonu**. Toto snížení se pohybuje v řádu od 0,7 mm/m do 1 mm/m.



Graf 4: Průběh délkové změny v čase, vliv mikroplniv [15]

1.4 Měření smrštění

V následujících kapitolách budou popsány jak postupy měření jednotlivých druhů smrštění, které byly použity při vytváření této diplomové práce, tak i postupy používané v disertaci Strnada (2010).

1.4.1 Měření chemického smrštění

Měření chemického smrštění probíhalo pomocí ztracené, vlnovcové, pryžové formy, která byla navržena profesorem J. Hoškem a upravena docentem J. Litošem. Princip této metody je založen na zanedbatelném podélném odporu vlnovcové formy. Docent J. Litoš provedl úpravu na této aparatuře v podobě použití laserových snímačů na měření pohybů vzorku. Tato metoda nám umožňuje měřit smrštění hned od

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápennatého popílku

počátku, od uložení směsi do formy. Zároveň je zde zabráněno odpařování vody, jak pryžovou formou, tak i místo plnění formy je zakryto polyetylenovou fólií. Měření vzdálenosti probíhá vždy v intervalu 1 min. [15]

Princip měření	Optický laserový, triangulace
Měřicí rozsah	5 mm
Linearita z měřicího rozsahu	±0,2
Rozlišení – statické	0,6 μm
Vzorkovací frekvence	1 kHz
Povolené okolní světlo	4000 lx
Provozní teplota	0 až + 55 °C (+32 až 131 °F)
Provozní vlhkost	0 až 95 %
Výstup	0 až 20 mA

Tab. 1: Technické parametry měřicího senzoru [15]

V našem případě bylo měření prováděno na popílkové a cementové kaši. Byly vyrobeny dvě vlnovcové formy (2 x 0,5 litru) z popílkové kaše a jedna z cementové, jako referenční, pro porovnání výsledků smrštění oproti klasickému betonu.



Obr. 1: Aparatura na měření chemického smrštění

Postup výroby a měření vzorků byl následující:

- Navážení složek směsi pro výrobu testovaných kaší,
- Míchání kaše s dodržáním předepsaných časů dávkování a míchání jednotlivých složek:
 - Míchání suchých složek směsi,
 - Přidání vody, míchání 9 min,
 - Přidání MasterGlenium ACE 40, míchání 4 min,

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

- Plnění vlnovcových forem,
- Vibrování na vibračním stole,
- Uložení vzorků do klima komory,
- Zakrytí místa plnění polyetylenovým kolečkem a osazení odrazné plošky,
- Instalace snímačů,
- Spuštění měření,
- Ukončení měření po 14 dnech.

1.4.2 Měření chemického smrštění a smrštění vysycháním

Měření chemického smrštění a smrštění způsobeného vysycháním lze měřit mnoha způsoby. Jedním z nich je pomocí indikátorových hodinek, dále pomocí posuvných extenzometrů a také bezkontaktní metodou.

V případě měření pomocí indikátorových hodinek probíhá měření následovně. Nejprve musí být vyrobena zkušební tělesa, v případě Strnada byly vyrobeny trámce o velikosti 100 x 100 x 500 mm a krychle 300 x 350 x 400 mm. Trámce se uloží ve formě do laboratorního prostředí, dokud není dosaženo manipulační pevnosti. Vzorky se zakryjí fólií, aby se zabránilo vysychání. Po odbednění se tělesa osadí do měřících standů a spustí se měření pomocí indikátorových hodinek. Dobu měření si zvolíme podle očekávaného smršťování směsi a četnost odečítání podle požadované přesnosti měření (průběh smrštění). Hodinky zobrazují absolutní hodnoty smrštění, ty se následně přepočítají na hodnoty poměrného přetvoření. Při měření na krychli 300 x 350 x 400 mm, se po vybetonování začne s měřením až v případě, že lze osadit dotykovou plošku na povrch krychle (cca 24 hodin). Následně dojde k osazení indikátorových hodinek. [16]

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku



Obr. 2: Měření smrštění na krychli pomocí indikátorových hodiněk [16]

Nevýhoda tohoto způsobu měření je, že nelze automaticky zaznamenávat dosahované hodnoty. Proto bylo v následujícím případě k posuvnému extenzometru připojeno záznamové zařízení.

Strnad používal extenzometry s označením D1 HBM. Ty se připojí pomocí dvojice hrotů, kde jeden je pevný a druhý pohyblivý, na vzorek a měří se jejich přiblížení případně oddálení. Počáteční vzdálenost hrotů je 200 mm. Pro měření byla dále na extenzometry připojena měřící ústředna Spider 8 a následně pro řízení, zaznamenání a zpracovávání výsledků byl připojen počítač. Po dosažení manipulační pevnosti vzorků se započalo s měřením. [16]



Obr. 3: Měření smrštění pomocí posuvných extenzometrů [16]

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

V našem případě probíhalo měření smrštění podobně jako měření chemického smrštění. V tomto případě měření neprobíhalo na tělesech ve vlnocových formách ale na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Receptury kaší, ze kterých byly trámečky vyrobeny, byly stejné jako v případě vlnoců (viz Tab. 8: Receptury kaší). Znovu byla vyrobena jak série z POP kaše, tak i z referenční cementové kaše a vyrobeny byly vždy tři trámečky.



Obr. 4: Aparatura na měření smrštění vysycháním

Postupy výroby kaší se také shodují. Na formy byl nejprve aplikován odbedňující přípravek a následně byly naplněny směsí. Po zhutnění se provedlo důkladné zakrytí vzorků fólií, aby se zabránilo odpařování vody a tím započeti smrštění vysycháním, ještě před jeho měřením. Takto zakryté vzorky se nechaly zrát 6 dní a následně se provedlo jejich odbednění. Hned poté se začalo s měřením smrštění vysycháním. Vzorky byly instalovány do aparatury se snímačem, osadila se odrazová ploška a bylo spuštěno měření, které trvalo 14 dní.

1.5 Normové požadavky na smrštění

Problematikou smršťování se v rámci českých technických norem zabývá norma ČSN EN 1992-1-1, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, konkrétně článek 3.1.4. Dotvarování a smršťování.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

Zde se, mimo již zmíněné parametry, na kterých závisí velikost smrštění a dotvarování, uvádí i zralost betonu v době prvního zatížení, doba trvání zatížení a jeho velikost.

Celkové poměrné smršťování je zde uvedeno jako součet poměrného smršťování vysycháním a poměrného autogenního smršťování. Poměrné autogenní smršťování, které vzniká hlavně v počátečních dnech po betonáži, je lineární funkcí pevnosti betonu. Velký význam má v případě betonování na již ztvrdlý beton. Celkové poměrné smršťování ϵ_{cs} je rovno:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

ϵ_{cd} – poměrné smršťování vysycháním

ϵ_{ca} – poměrné autogenní smršťování

Konečná hodnota poměrného smršťování vysycháním označovaná jako $\epsilon_{cd,\infty}$ se vypočítá:

$$\epsilon_{cd,\infty} = k_h \times \epsilon_{cd,0}$$

$\epsilon_{cd,0}$ je možno určit buď pomocí tabulky 1, anebo výpočtem uvedeným v příloze B [10]

Fck/fck, cube [MPa]	Relativní vlhkost [%]					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

Tab. 2: Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smršťování vysycháním $\epsilon_{cd,0}$ (%) betonu s cementem CEM třídy N [10]

V případě výpočtu poměrného smršťování vysycháním v čase bude použit vztah:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \times k_h \times \epsilon_{cd,0}$$

k_h – součinitel, který závisí na h_0 (náhradní tloušťka) dle tabulky 2

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

h0 [mm]	kh
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Tab. 3: Hodnoty k_h ve vztahu [10]

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \times \sqrt{h_0^3}}$$

t – stáří betonu v daném okamžiku (dny)

t_s – stáří betonu na začátku smršťování, obvykle konec ošetřování betonu (dny)

h_0 – náhradní rozměr průřezu = $2A_c/u$ (mm), kde A_c je průřezová plocha betonu a u je obvod části průřezu vystavené vysychání [10]

Poměrné autogenní smršťování je dáno vztahem:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ca}(t) &= \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty) \\ \varepsilon_{ca}(\infty) &= 2,5 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \end{aligned}$$

t ve dnech

Výpočet $\varepsilon_{cd,0}$ dle přílohy B ČSN EN 1992-1-1

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \times \left[A - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

f_{cm} – průměrná hodnota pevnosti v tlaku betonu (MPa)

$f_{cm0} = 10$ MPa

α_{ds1} – součinitel závisející na druhu cementu

= 3 pro cement třídy S

= 4 pro cement třídy N

= 6 pro cement třídy R

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

α_{ds2} – součinitel závisející na druhu cementu

= 0,13 pro cement třídy S

= 0,12 pro cement třídy N

= 0,11 pro cement třídy R

RH – relativní vlhkost okolního prostředí (%)

$RH_0 = 100 \%$

[10]

1.6 Normové požadavky na silniční panely

Požadavky na složení a na mechanické vlastnosti cementobetonových krytů se zabývá norma ČSN 73 6123–1, Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shody. Tato norma rozděluje cementobetonové kryty do třech tříd:

- CBI – Letištní dráhy a plochy, dálnice, rychlostní silnice, rychlostní místní komunikace, silnice I. třídy,
- CBII – Silnice II. a III. třídy, sběrné místní komunikace, obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy,
- CBIII – Obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy, dočasné komunikace a účelové komunikace.

Pro tyto jednotlivé třídy specifikuje norma minimální pevnostní třídu a požadavky na odolnost proti CHRL. Pro CBI a CBII je minimální pevnostní třída C 30/37 a pro CBIII C 25/30. Pro CBIII není pevně stanovena odolnost proti CHRL, je zde uvedeno, že záleží na požadavcích dokumentace. Pro CBII je požadavek 1000 g po 75 cyklech metodou A a pro CBI 1000 gramů po 100 cyklech stejnou metodou. Dále je zde uveden maximální součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů, který je pro CBI a CBII 0,24 a pro CBIII není předepsán. Stupeň vlivu prostředí pro CBI a CBII je XF4, XF3 a pro CBIII je udán dokumentací.

Mimo jiné nám tato norma také definuje předepsané hodnoty obsahu vzduchu v čerstvém betonu v závislosti na velikosti maximálního zrna.

[12]

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovépenatého popílku

Max. zrno [mm]	Minimální hodnoty obsahu vzduchu [%]		Max doporučená hodnota jednotlivého měření obsahu vzduch
	Průměrná hodnota měření	Jednotlivá hodnota měření	
8	5,0	4,5	7,0
16	4,5	4,0	6,5
32(resp. 22)	5,0	3,6	6,0

Tab. 4: Předepsané hodnoty obsahu vzduchu [12]

KONEC VEŘEJNÉ ČÁSTI

Seznam použitých zdrojů

- [1] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. MasterGlenium ACE 40. Technický list. Srpen 2015.
- [2] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. MasterAir 178. Technický list. Srpen 2015.
- [3] SKUPINA ČEZ, *Uhelné elektrárny, Ledvice*. [online]. ČEZ. [cit. 9. 12. 2018]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/uhelne-elektřarny/cr/ledvice.html>
- [4] ČSN EN 206, *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [5] ČSN EN 206-1/Z3, *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] ČSN EN 933-1, *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*, Praha: Český normalizační institut, 1997
- [7] ČSN EN 12350-2, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [8] ČSN EN 12350-7, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [9] ČSN 12390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006
- [11] ČSN 73 1326, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1984
- [12] ČSN 73 6123–1 *Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

- [13] HAVLÁSEK, Petr. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions*. Doctoral Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Vedoucí práce: Prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc
- [14] KRÁSA, Matouš. *Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Vedoucí práce: Ing. Rostislav Šulc Ph.D.
- [15] LITOŠ, Jiří. *Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí*. Sborník. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2011.
ISBN: 978-80-01-04700-2
- [16] STRNAD, Tomáš. *Fyzikálně – mechanické vlastnosti materiálu na bázi alkalicky aktivovaného popílku*. Doktorská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Svoboda, CSc.
- [17] ŠMERDA, Zdeněk. *Význam autogenního smršťování na napjatost betonových průřezů*, Odborná příloha. 1998. 9s

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

Seznam obrázků

Obr. 1: Aparatura na měření chemického smrštění.....	18
Obr. 2: Měření smrštění na krychli pomocí indikátorových hodinek [16]	20
Obr. 3: Měření smrštění pomocí posuvných extenzometrů [16].....	20
Obr. 4: Aparatura na měření smrštění vysycháním.....	21

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenatého popílku

Seznam grafů

Graf 1: Průběh délkové změny v čase, vliv druhu cementu [15]	15
Graf 2: Průběh délkové změny v čase, vliv vodního součinitele [15]	15
Graf 3: Průběh délkové změny v čase, vliv druhu plastifikátoru [15]	16
Graf 4: Průběh délkové změny v čase, vliv mikroplniv [15]	17

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu na bázi sulfátovápenného popílku

Seznam tabulek

Tab. 1: Technické parametry měřícího senzoru [15]	18
Tab. 4: Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smršťování vysycháním $\epsilon_{cd,0}$ (%) betonu s cementem CEM třídy N [10].....	22
Tab. 5: Hodnoty k_h ve vztahu [10]	23
Tab. 6: Předepsané hodnoty obsahu vzduchu [12]	25