

# PHD WORKSHOP 2019

*Michal Vích, \**

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
michal.vich@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Předmětem této práce je analýza vlivu různých příměsí do betonu na smršťování od vysychání. Cílem experimentální práce bylo analyzovat, zdali přidáním příměsí můžeme omezit smršťování, nebo také určit do jaké míry je efektivní nahradit cement danou latentně hydraulickou příměsí tak, aby bylo stále dosaženo snížení smršťování od vysychání. Je zde popsán průběh experimentu a důsledky vyšší náhrady cementu mikrosilikou. Tento výzkum je zaměřen na materiály na bázi cementu, proto receptury testovaných vzorků neobsahují kamenivo. Měření smršťování probíhalo po dobu jednoho roku. Dále byly součástí experimentu zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a zkoušky pevnosti v tlaku. Výsledkem této práce je analýza naměřených dat o smršťování a vzájemné porovnání jednotlivých příměsí a jejich vlivu na objemové změny při určité náhradě cementu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Smršťování od vysychání • Mikrosilika • Metakaolin • Popílek  
• Pevnost v tlaku • Pevnost v tahu za ohybu

## ABSTRACT

The subject of the thesis is the analysis of effects of various additives on concrete shrinkage caused by drying. The main goals were to determine whether, concrete additive can limit shrinkage, and specifying the most effective share of latent hydraulic additives in concrete to achieve reduced shrinkage. This article describes the experiment, and the consequences of the higher share of silica fume in cement paste. Materials of this research are based on cement, therefore the specimens examined do not contain aggregate. The experiment took place over the course of one year. Furthermore, flexural tensile strength and compression strength tests were included in the experiment. The result of this work is the analysis of measured shrinkage data and comparison of concrete additives and their effects on volume changes.

## KEYWORDS

Drying shrinkage • Silica fume • Metakaolin • Fly ash •  
Compressive strength • Flexural tensile strength

## 1. ÚVOD

Smršťování patří bezesporu mezi nejvýznamnější vlastnosti betonu, které zásadně ovlivňují dlouhodobé chování betonových konstrukcí. Spolu s dotvarováním tvoří dvojici reologických vlastností betonu způsobující objemové změny, což má za následek větší průhyby konstrukcí, více trhlin na povrchu konstrukce nebo také vliv na trvanlivost konstrukcí. V případě dopravních staveb je smršťování příčinou významných ztrát napětí v předpínací výztuži. Existují však i malé typy konstrukcí jako jsou např. bílé vany nebo retenční nádrže apod. Zde z důvodu omezení velikosti maximální povolené trhliny, vstupuje smršťování do role rozhodující vlastnosti pro návrh výztuže. Rostoucí trend používání příměsí do betonu se stal hlavním motivem tohoto experimentu, který je zaměřen na latentně hydraulické příměsí.

### 1.1. Experimentální práce

Cílem experimentální práce je výroba cementových vzorků s různými latentně hydraulickými příměsmi – mikrosilika, metakaolin a elektrárenský popílek. Pro porovnání byl vyroben také referenční vzorek, který je složen pouze z cementu – viz tabulka 1. Pro každou příměs byly vyrobeny tři trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. V tomto složení byly vyrobeny dvě sady vzorků, které se od sebe liší procentuální náhradou cementu – 20 % a 50 %. Pro všechny zkoumané receptury byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a zkoušky pevnosti v tlaku – jednou po 28 dnech od vybetonování vzorků a podruhé po ukončení měření smršťování, tj. 280 dní po vybetonování vzorků. Nakonec jsou ukázány průběhy smršťování z celého experimentu včetně vzájemného porovnání. Dále jsou zde porovnány průběhy smršťování vybraných matematických modelů. Závěrem by měla být odpověď na otázku, zdali je možné použít predikční modely i pro cementové směsi s vyšší náhradou cementu.

---

\* Školitel: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Tabulka 1: Receptury.

Component	REF	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
Cement CEM I 42.5	1375	1118	874	1164	946	1030	938
Metakaolin	-	223,6	437	-	-	-	-
Fly ash	-	-	-	232	472	-	-
Silica fume	-	-	-	-	-	206	369
Water	550	537	524	503	454	577	649
Aggregate type	-	-	-	-	-	-	-
w/c	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

## 2. PRŮBĚH EXPERIMENTU

### 2.1. Výroba

Pro zpřesnění měření smršťování byli zkušební vzorky osazeny měřicími trny, které byly vloženy přímo do formy. Míchání jednotlivých komponent probíhalo tak, že se nejprve smíchaly suché složky, tedy cement a daná příměs a po 30 vteřinách míchání byla přidána voda. Celková doba míchání probíhala dvě a půl minuty. Zhutnění cementové pasty ve formách bylo prováděno na vibračním stole. Po betonáži byla zkušební tělesa zakryta izolační fólií a uložena v laboratorních podmínkách do druhého dne a po uplynutí 24 hodin došlo k jejich odbednění. Autogenní smršťování probíhající během hydratace nebylo předmětem této práce a nebylo na těchto vzorcích měřeno.

Během betonáže bylo nutné vyřešit dva problémy. Jedním z nich bylo zvětšení kotevní délky šroubů, které byly při prvním odbedňování ze vzorků vytrženy. Kotevní délka, pro kterou proběhlo bezproblémové odbednění, byla rovna 20 mm. Druhý problém byl spojen s korekčním součinitelem  $k$  u vzorků obsahujících mikrosiliku. Ačkoliv na tento fakt norma upozorňuje (norma stanovuje korekční součinitel  $k = 2$  pouze pro 10% náhradu cementu mikrosilikou), při první betonáži byl zvolen korekční součinitel  $k = 2,0$  a to pro obě varianty náhrady cementu. Při výrobě vzorků MI-20 byla nepatrně ovlivněna výroba sníženou mírou zpracovatelnosti cementové pasty, ale žádným dalším negativním způsobem se tato volba neprojevila. Ve druhém případě při výrobě vzorku MI-50 již nízký podíl vody znemožnil správné zhutnění vzorků, což se projevilo při odbednění, viz obrázek 1. Tyto vzorky nebyly pro tento výzkum použitelné a betonáž musela být zopakována za současného zvětšení korekčního součinitele na  $k = 2,4$ .

### 2.2. Měření

Experiment je soustředěn na zmenšení objemu vzorku vlivem vysychání, tedy během období, kdy konstrukce odpařuje vodu, která nebyla spotřebována k hydrataci cementu. Autogenní smršťování, při kterém dochází ke zmenšení objemu vlivem chemických procesů během hydratace v prvních hodinách životnosti betonu, v této práci není zachyceno. První hodnota délky vzorku byla zaznamenána po 24 hodinách od odbednění forem, celková doba měření vysychání byla 280 dní. Po dobu celého měření

byly vzorky umístěny na stejném místě v laboratoři. Vzorky byly vystaveny okolnímu prostředí v interiéru laboratoře, ve kterém kolísala teplota v rozmezí 22 °C až 28 °C. Relativní vlhkost vzduchu se pohybovala v rozmezí 33 % - 49 % a absolutní vlhkost cca 8-13 g/m<sup>3</sup>.

Samotné měření bylo prováděno pomocí digitálního úchylkoměru. Data byla měřena s přesností na tisícinu milimetru. Pro každou recepturu byly vyrobeny tři trámečky a při každém měření byly odečteny tři hodnoty – výsledná hodnota smrštění se tedy skládala celkem z devíti zprůměrovaných hodnot. Měření bylo rozděleno do několika částí s prodlužující se frekvencí opakování měření v souladu se zpomalováním rychlosti smršťování – viz tabulka 2.



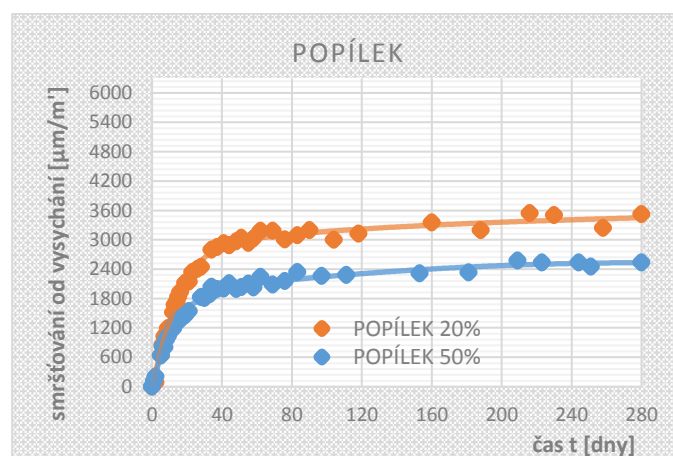
Obrázek 1: Špatně zhutněný vzorek mikrosiliky.

## 3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ

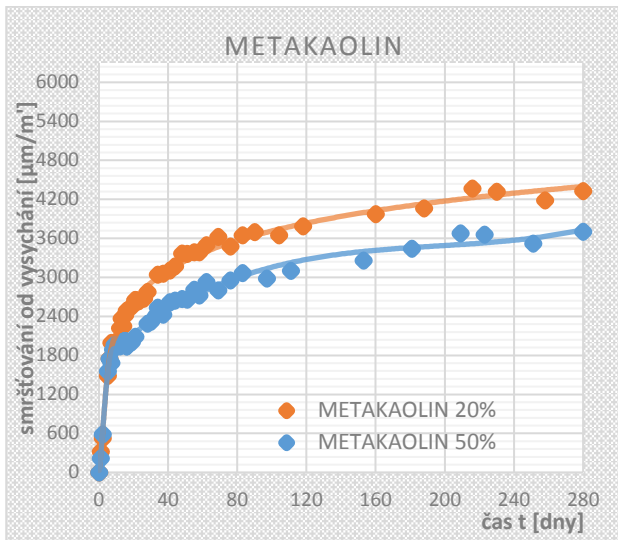
V jednotlivých grafech jsou nejprve porovnány stejné příměsi s různou procentuální náhradou cementu a poté jsou mezi sebou porovnány různé příměsi se stejnou procentuální náhradou cementu. Grafy uvádí časovou závislost smršťování od vysychání v mikrometrech na jeden běžný metr. Následně jsou zde zvedeny výsledky zkoušek pevnosti v tahu a zkoušek pevnosti v tahu za ohybu.

Tabulka 2: Frekvence měření.

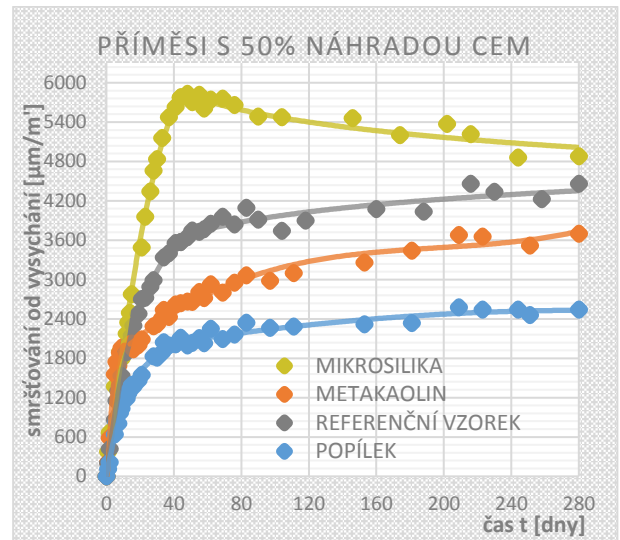
stáří vzorku	frekvence měření
1 - 16 dní	každý den
17 - 28 dní	3 x týdně
29 - 58 dní	2 x týdně
58 - 118 dní	2 x měsíčně
119 - 280 dní	1 x měsíčně



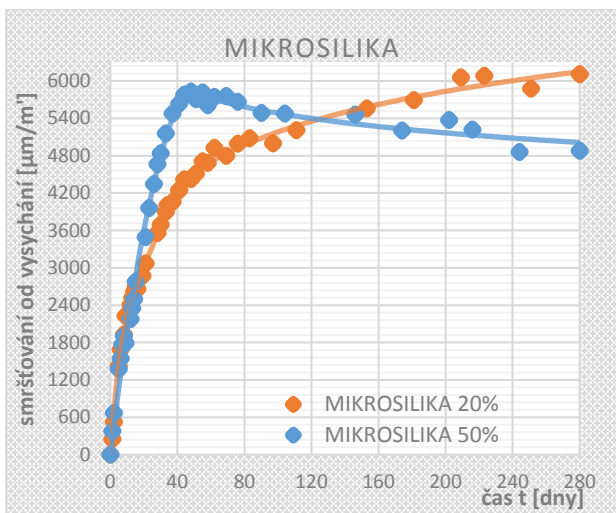
Obrázek 2: Průběh smršťování popílku.



Obrázek 3: Průběh smršťování metakaolinu.



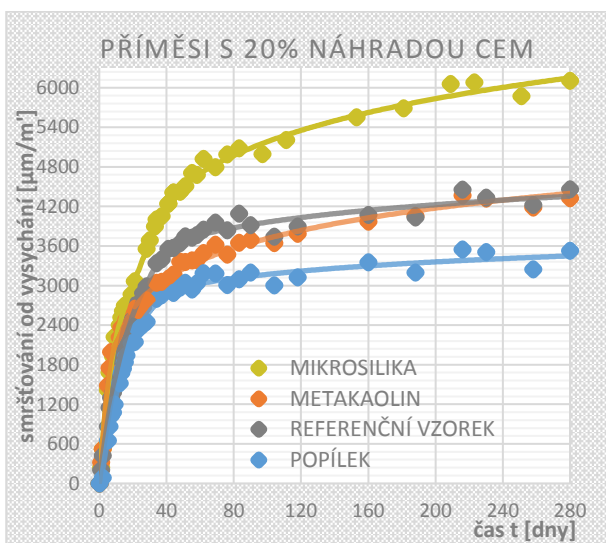
Obrázek 6: Porovnání příměsí s 50% náhradou cementu.



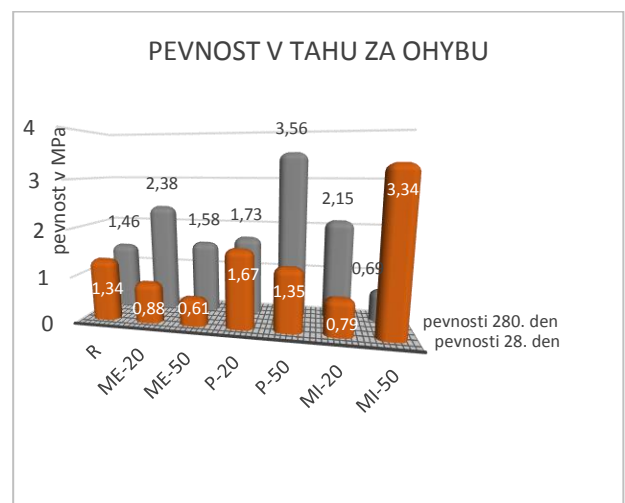
Obrázek 4: Průběh smršťování mikrosiliky.



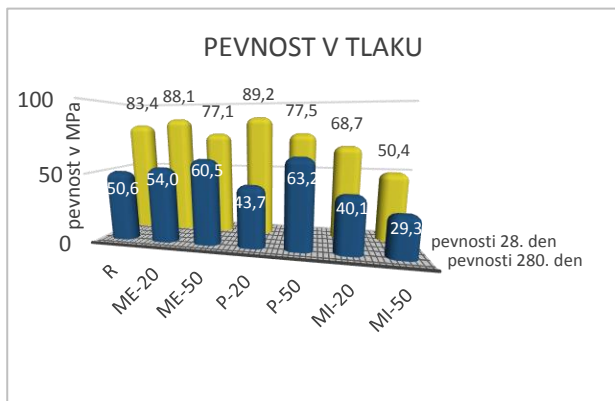
Obrázek 7: Měřené vzorky.



Obrázek 5: Porovnání příměsí s 20% náhradou cementu.



Obrázek 8: Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.



Obrázek 9: Zkoušky pevnosti v tlaku.

## 4. KOMENTÁŘ K VÝSLEDKŮM

### 4.1. Data o smršťování

Získaná data z experimentu nabývají vyšších hodnot, než je zvykem u běžných i vysokohodnotných betonů. Jak už bylo zmíněno, největší podíl na tom má složení směsi sledovaných vzorků, ve kterých není obsažen písek ani kamenivo. Dalším faktorem, který přispívá ke zvýšené míře vysychání je nízká vlhkost laboratorního prostředí, kde se průměrná hodnota relativní vlhkosti pohybovala kolem 42 %. V našem případě je však důležité, že všechny vzorky měly stejné podmínky a trendy smršťování jsou proto relevantní.

Výzkum potvrzuje dřívější studie o tom, že popílek snižuje míru smrštění. Křivka má pozvolný náběh a její hodnota se zastavuje hluboko pod ostatními příměsemi. Z uvedených grafů můžeme vidět, že již po 90 dnech dosáhla míra objemových změn 90 % své maximální hodnoty. Můžeme konstatovat, že se zvětšujícím se obsahem popílku ve směsi, klesá hodnota smršťování za současného zlepšování pevnosti v tahu i tlaku.

Metakaolin vykazuje oproti ostatním příměsím nejrychlejší počáteční nárůst smršťování, ale i přesto je u vzorků ME-50 výsledná hodnota na přijatelné míře. Z výsledků lze usoudit, že správným ošetřováním v prvních 7–8 dnech, bychom oddálili počáteční nárůst a tím efektivně docílili snížení celkového smrštění. Z grafů, ve kterých jsou jednotlivé příměsi porovnány můžeme pozorovat, že při náhradě cementu 20 % metakaolinu se tato příměs pro použití omezení smršťování nevyplácí, protože trend smršťování je téměř totožný s křivkou referenčního vzorku. Pokud však zvolíme vyšší náhradu metakaolinu, začne se trend křivky přibližovat směrem k příznivějším hodnotám.

V případě metakaolinu a popílku můžeme konstatovat, že navýšení podílu příměsi vede ke snížení konečného smrštění. Neočekávaný vývoj měla však křivka MI-50, která dosáhla svého maxima již po uplynutí 48 dní, kdy nastal zlom a vzorek dle měření začal bobtnat. Tento fakt bude zřejmě souviset s rychlým nárůstem vnitřního napětí během prvních 48 dní, kdy se s čím dál více rozvíjejícími se trhlinami vzorek začal „rozpadat“. Vzorek MI-50 číslo 3 nemohl být v posledních dvou týdnech doměřen, z důvodu destrukce pod vlastní tíhou.

Další vzorek byl potrhán těsně před změřením pevnosti a pevnost v tahu 0,69 MPa, která byla zjištěna u zbývajícího vzorku, vysokou mírou vysušení jen potvrzuje.

### 4.2. Zkoušky pevnosti

#### 4.2.1. Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušení pevnosti bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 12390-5. V dnešní době je k dispozici již mnoho experimentů, které se zabývaly zkoušením pevnosti při různé náhradě příměsi za cement. Z výsledných grafů je proto na první pohled patrné, že u měření pevnosti s 50 % náhradou mikrosiliky něco není v pořádku. Ačkoliv hydratace trámečků probíhala ve vodě, je vyloučeno, aby po 28 dnech dosahovala pevnost v tahu za ohybu několikanásobně vyšší než u ostatních příměsí. Absence kameniva v průřezu, je obecně příčinou snížení pevnosti, ať už se jedná o tah nebo tlak, což je další faktor, který správnost výsledku mikrosiliky zpochybňuje. Vznik takto vysoké hodnoty je možné vysvětlit tak, že se během zkoušení pevnosti zabořily zatěžovací válce.

Pokud vynecháme vzorek MI-50 lze obecně konstatovat, že pevnosti v tahu za ohybu jsou ve všech případech vyšší po 280 dnech než po 28 dnech. Příčinou nižších hodnot pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech mohla být právě vyšší koncentrace volné vody v pórech, což má samo o sobě za následek roztahování cementové matrice (bobtnání). Dále můžeme vidět, že pevnosti jsou, ve srovnání s referenčním vzorkem, nižší. Vzhledem k použití rychle tuhajícího cementu lze tento jev vysvětlit tak, že je způsoben spíše náhradou cementu příměsemi, které vykazují nižší rychlost hydratace a tím je nástup pevnosti zpomalen. Dále můžeme pozorovat, že nejméně smrštěný vzorek má pevnost v tahu zdaleka nejvyšší, což dokazuje také nízká ztráta objemové hmotnosti. s výjimkou MI-50 jsou po 280 dnech všechny hodnoty vyšší než u referenčního vzorku, což pokládám za očekávaný a správný výsledek.

#### 4.2.2. Pevnost v tlaku

Z výsledků je patrné, že vysychání bez přítomnosti výztužných prvků a kameniva, velmi razantně snižuje pevnost v tlaku, v některých případech až o polovinu. V případě mikrosiliky je dobré nepřekračovat náhradu cementu o více jak 20 %. Grafy jasně ukazují, že betony s vyšším podílem mikrosiliky mají tendenci snižovat pevnost v tlaku a je to způsobeno právě vysokou mírou vysychání. Je však nutné podotknout, že extrémně nízkou pevnost mikrosilika 50 % má za následek také zvýšení vodního součinitele, aby byla umožněna zpracovatelnost bez použití plastifikátoru.

V tomto experimentu se velmi dobře projevila 50% náhrada metakaolinu a popílku – zatímco v obou případech byla pevnost po 28 dnech oproti referenčnímu vzorku nižší, po 280 dnech už to bylo právě naopak, a to až o 25 %. ME-20 vykazuje téměř shodnou pevnost jako referenční vzorek, vyšší



vynaložené náklady za příměs se tedy v tomto případě nevyplácí. Naopak podíl mikrosiliky a popílku pod 20 % při tomto složení směsi má negativní dopad na konečnou únosnost konstrukce v tlaku. V případě MI-20 může být příčinou vyšší smrštění. Mimo jiné lze také konstatovat, že podíl metakaolinu a popílku do 20 % oproti referenčnímu vzorku nezpomaluje počáteční nárůst pevnosti. Dále je také zřejmé, že úbytek pevnosti v tlaku úzce souvisí s úbytkem objemové hmotnosti. Se snižující se hustotou se snižuje i pevnost vzorků v tlaku.

## 5. POROVNÁNÍ DAT S MATEMATICKÝMI MODELÝ

V této části budou stručně představeny některé matematické modely pro předpověď celkového smrštění betonu. Každý model je specifický svými požadovanými vstupními parametry, které ve výsledku dokáže zohlednit a na druhou stranu je každý nějakým způsobem limitován. Pro porovnání naměřených dat byly vybrány matematické modely smršťování B3 a B4 od prof. Bažanta a jeho kolektivu.

Model B3 publikoval v roce 2000 prof. Bažant a Baweja, je založený na dlouhodobém sběru dat pomocí nejrůznějších experimentů Northwestern University zaměřené na vliv prostředí a složení betonu na smršťování. Tento model již zohledňuje několik parametrů, patří mezi ně například metoda ošetřování, tvar průřezu, typ cementu, vodní součinitel, obsah cementu atd. Podmínkou je, aby doba ošetřování trvala nejméně 1 den. Specifická vlastnost tohoto modelu je, že ve výpočtu nerozlišuje smršťování autogenní a smršťování od vysychání, výsledkem je jedna hodnota zahrnující vliv obou typů deformací.

Tim nejnovějším matematickým modelem pro predikci smršťování je model B4 rovněž od prof. Bažanta a jeho kolektivu, který byl publikován relativně nedávno v roce 2015. Tento model reaguje na současný trend zvyšujících se pevností betonu přidáváním přísad a příměsí. Zavádí se zde několik nových součinitelů, pro co možná nejlepší vystihnutí složení daného betonu. Model velmi dobře zachycuje složení nejen přísad a příměsí, ale také množství a druh kameniva, teplotu prostředí, ve které je konstrukce během smršťování umístěna a také dokáže pracovat s velmi nízkým vodním součinitelem, jehož výskyt je u vysokopevnostních betonu běžnou záležitostí. Díky schopnosti reagovat na tyto parametry se model stává jednou z nejosfistikovanějších metod, které jsou v současné době k dispozici. Co by se modelu B4 dalo vytknout je vliv některých dalších přísad a příměsí, chybí např. zapracování vlivu protismršťovacích či expanzních přísad, příměsí jako je metakaolin nebo struska a jejich kombinace. Avšak vzhledem k přibývajícimu počtu výzkumů na toto téma se zřejmě vylepšení brzy dočkáme.

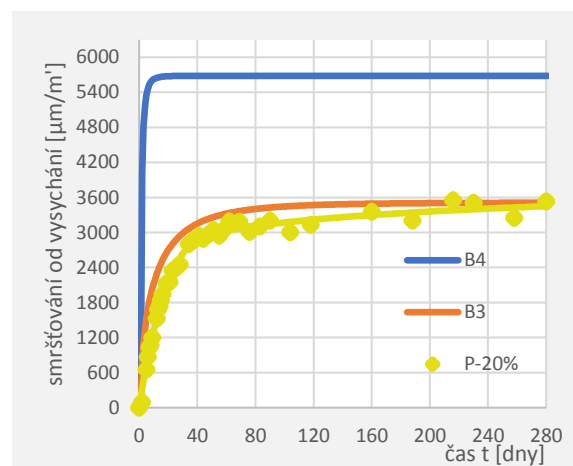
V rámci experimentu bylo provedeno porovnání naměřených dat s výsledky, které předpovídají uvedené matematické modely. Téměř bezchybným způsobem jsou popsány vzorky s příměsí popílku modelem B3. Konečný rozdíl se pohybuje do 5 %. Velmi dobře popisuje model B3 také cement bez příměsí, zde se výsledky liší přibližně o 10 %.

Je však nutné vzít v úvahu, že model B3 nerozlišuje složky smršťování od vysychání. Na druhou stranu vodní součinitel 0,4 je natolik vysoký, že složka od autogenního smršťování bude minimální.

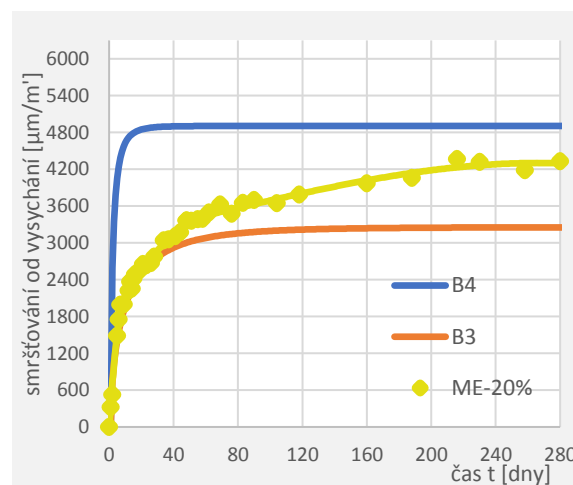
Průběh smršťování metakaolinu není matematickými modely ani v jednom případě přesněji vystihnutý. Jeho průběh má blíže ke křivce modelu B4, ale konečné hodnoty se liší o 12 - 15 %. V tomto případě je výsledek mírně zavádějící omezenými vstupními parametry modelu, kde nejsou definované koeficienty pro metakaolin a musela být nahrazena příměsí jinou (mikrosilika >18).

Jak již bylo zmíněno mikrosilika MI-50 vykazovala v rámci tohoto experimentu extrémně vysoké hodnoty smršťování od vysychání, není překvapující, že výsledné hodnoty daleko přesahují hodnoty získané oběma modely. Za relevantní výsledky můžeme považovat data od MI-20, jehož konečná deformace od smršťování přesahuje model B4 o 23%.

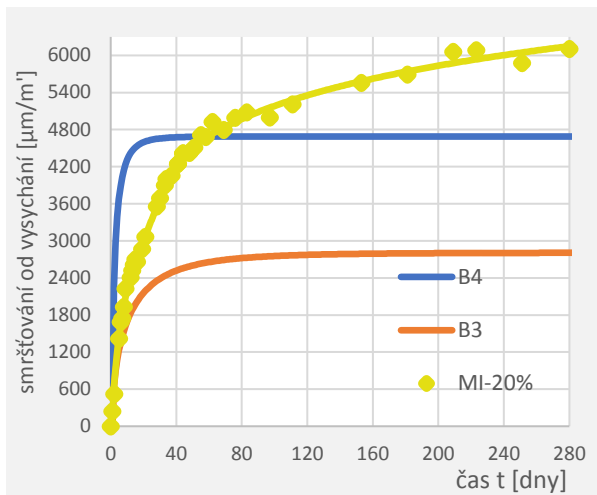
V grafech níže jsou porovnány průběhy matematických modelů s naměřenými daty receptur s 20% náhradou cementu a referenčního vzorku.



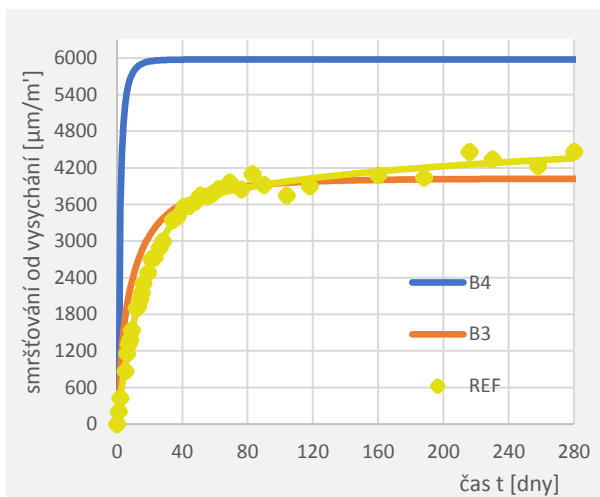
Obrázek 10: Porovnání matematických modelů s popílkem.



Obrázek 11: Porovnání matematických modelů s metakaolinem.



Obrázek 12: Porovnání matematických modelů s mikrosilikou.



Obrázek 13: Porovnání matematických modelů s ref. vzorkem.

## 6. ZÁVĚR

Experimentální část odpovídá názvu této práce a zabývá se vlivem latentně hydraulických příměsí na objemové změny materiálů na bázi cementu. Úkolem bylo vyrobit trámečky dle normy s obsahem popílku, metakaolinu a mikrosiliky s náhradou cementu 20 % a 50 %, na nichž bylo po dobu 280 dní měřeno smršťování od vysychání. Na těchto vzorcích byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu a to po 28 dnech s 28denním ošetřováním a po ukončení měření smršťování. Byla provedena analýza naměřených dat a vzájemné porovnání. V rámci experimentu byl vytvořen program pro výpočet smršťování dle matematických modelů. V poslední části byly naměřená data s těmito predikčními modely porovnány a bylo ukázáno, zdali je použití těchto modelů vhodné pro receptury s vysokým podílem příměsí, které navíc neobsahují kamenivo.

Analýzou výsledků bylo dospěno k závěru, že neoptimálnější predikční model pro práci s příměsí popílku je B3. V případě metakaolinu bych se osobně přiklonil spíše

k modelu B4 i přesto, že se pohybuje na straně velmi bezpečné. Použití mikrosiliky v tomto experimentu nedopadlo vůbec dobře. Vysoký podíl vedl k obrovskému počátečnímu nárůstu smršťování a vnitřních pnutí, což dokonce vedlo k destrukci většiny vzorků. Na základě zkušenosti z toho experimentu nemohu doporučit použití mikrosiliky bez použití písku a kameniva. Naopak lze jen doporučit příměs z popílku, kde je možné zvolit vyšší náhrady za cement nejen díky dobré ceně, ale i díky jeho skvělým pucolánovým vlastnostem.

Model B4 je v současné době z hlediska používání příměsí bohužel velmi omezen a žádá si doplnění matematických vztahů a součinitelů, které by byly schopné popsat chování materiálů na bázi cementu s obsahem metakaolinu, strusky či vyšších podílů popílku a mikrosiliky. Tento nedostatek se může stát výzvou pro další studium.

## References

- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2009), *ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2009), *ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2017), *ČSN EN 206+A1. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2012), *ČSN EN 197-1, Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, Praha.