

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VLIV PŘÍMĚSÍ BETONU NA SMRŠŤOVÁNÍ CEMENTOVÉ MATRICE**

**CONCRETE ADDITIVE EFFECT ON SHRINKAGE OF CEMENT MATRIX**

Studijní program a studijní obor:

Stavební inženýrství – Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Bc. Michal Vích

Leden, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Tháškova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vích</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>412693</u>
Zadávající katedra: <u>K133 Kate dra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Vliv příměsí betonu na smršťování cementové matrice</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Concrete additive effect on shrinkage of cement matrix</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši k tématu smršťování betonu s velkými dávkami cementu: - Popište co je smršťování. - Popis vlivu velké dávky cementu, který se používá pro UHPC na smrštění betonu proti běžným betonům. - Popište metody zmínění vlivu smršťování betonu na betonovou konstrukci.	
Realizujte experimentální program v následujících bodech: - Vytvořte sérii trámečků 40/40/160 s cementovou náhradou mikrosilikou, popílčkem a metakaolinem v dávkách 20% a 50%. - Na těchto tělesech zjištěna pevnost v tahu za ohybu a tlaku po 28 dnech a v co největším stáří. - Dále na těchto tělesech sledujte změnu velikosti tělesa od 1 dne od vybetonování až do ukončení práce. - Porovnejte vliv smršťování pro jednotlivé náhrady v čase a porovnejte změnu tlakové pevnosti a pevnosti v tahu za ohybu během prováděného experimentu. - Zhodnotte přínos těchto příměsí.	
Seznam doporučené literatury: Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Bmo 2000 Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005 Colleparidi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Josef Fládr, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>19.9.2018</u> Termín odevzdání diplomové práce: <u>7.1.2019</u> <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)

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Vliv příměsí betonu na smršťování cementové matrice*“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Josefa Fládra, Ph.D. za použití literatury a programů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 6. 1. 2019

.....  
Michal Vích

### ***Poděkování***

Velmi rád bych tu poděkoval svým blízkým za podporu během tvorby této práce, a především moc děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Josefovi Fládrovi, Ph.D. za bezproblémový doprovod při psaní těchto řádků a také za patřičné připomínky a komentáře, které tuto práci jistě pozvednou. Poděkování bych rád směřoval také k panu Ing. Petrovi Bílému, Ph.D., který se rovněž podílel mnoha cennými radami.

**VLIV PŘÍMĚSÍ BETONU NA SMRŠŤOVÁNÍ CEMENTOVÉ MATRICE**  
CONCRETE ADDITIVE EFFECT ON SHRINKAGE OF CEMENT MATRIX

## ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je analýza vlivu různých přísad do betonu na smršťování od vysychání. Tato práce je rozdělena na dvě hlavní části, první část se zabývá obecnou teorií úzce související se smršťováním, část druhá spočívá v experimentální analýze smršťování od vysychání na vybraných recepturách.

V první části je nejdříve vysvětlen základní princip hydratace cementu. Úkolem je představit složky cementu a vysvětlit proces jeho tuhnutí a tvrdnutí. Dále je objasněno, jaký vliv má vodní součinitel na porézní mikrostrukturu betonu, která úzce souvisí se smršťováním betonu. Nechybí zde klasifikace druhů smršťování s vysvětlením, v jaké fázi stárí betonu vzniká a proč vzniká. Samostatnou kapitolou jsou matematické modely, které slouží k predikci smršťování při návrhu konstrukcí. Jsou zde představeny dva velmi známé modely od prof. Bažanta (model B4 a B3) a dále dva modely z eurokódu 2. V závěru teoretické části jsou stručně popsány přísady do betonu a vybrané studie o vlivu těchto přísad na smršťování materiálů na bázi cementu.

Ve druhé části je popsán průběh experimentální práce a následně je provedena analýza výsledků. V rámci experimentu byl vytvořen také program pro výpočet smršťování, dle matematických modelů, které jsou představeny v první kapitole. Jsou zde porovnány výsledky smršťování jednotlivých přísad a následně je ověřeno, zdali naměřené průběhy odpovídají těm, které předpovídají matematické modely.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Smršťování od vysychání, portlandský cement, hydratace, mikrosilika, metakaolin, popílek, struska, predikční modely smršťování, model B4, model B3, model smršťování eurokódu 2, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu.

## ABSTRACT

The subject of the thesis is the analysis of effects of concrete additives on drying shrinkage. The thesis is divided in two parts. The first part deals with general theory closely related with shrinkage, the second part of the thesis is focused on experimental analysis of selected concrete recipes on drying shrinkage.

The fundamental principle of cement hydration is explained at the very beginning of the first part. The main objective of the thesis is to introduce the composition of the portland cement and explain the setting and hardening process. Next, the dependency of microstructure of concrete on water content is mentioned, because it is very important for the shrinkage behaviour. Then there is part with classification of shrinkage types, where is explained when and why is shrinkage development going on. Next chapter is devoted to shrinkage prediction models for designing concrete construction where two well known models from prof. Bažant (B4 and B3 model) and also two eurocode 2 models are mentioned. In the last part are briefly described concrete additives and selected studies of influence of these additives on cement matrix shrinkage.

The second part of the thesis describes experimental study and conducted results of analysis. Part of the experiment was to create program for shrinkage calculation according to mathematical models from theoretical part of the thesis. Measured data of shrinkage of different additives are compared and then is verified if comparison of measured data and results of mathematical models is correct.

## KEYWORDS

Drying shrinkage, portland cement, hydration, silica fume, metakaolin, fly ash, slag, shrinkage prediction models, B4 model, B3 model, Eurocode 2 shrinkage model, compressive strength, tensile strength.

## OBSAH

<b>1 Úvod .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>2 Teoretická část .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>2.1 Hydratace cementu.....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1.1 Průběh hydratace .....	- 10 -
2.1.2 Klasifikace pórů .....	- 13 -
2.1.3 Voda v betonu .....	- 15 -
<b>2.2 Druhy smršťování .....</b>	<b>- 16 -</b>
2.2.1 Plastické smršťování .....	- 16 -
2.2.2 Autogenní smršťování .....	- 17 -
2.2.3 Smršťování vysycháním .....	- 19 -
<b>2.3 Predikční modely pro smršťování .....</b>	<b>- 21 -</b>
2.3.1 Model ČSN EN 1992-1-1 .....	- 21 -
2.3.2 Model ČSN EN 1992-2 .....	- 23 -
2.3.3 Model B3 .....	- 25 -
2.3.4 Model B4 .....	- 27 -
<b>2.4 Příměsi do betonu .....</b>	<b>- 33 -</b>
2.4.1 Inertní příměsi .....	- 33 -
2.4.2 Latentně hydraulické příměsi .....	- 34 -
<b>2.5 Faktory ovlivňující smršťování betonových konstrukcí.....</b>	<b>- 41 -</b>
2.5.1 Vliv technologie výroby .....	- 41 -
2.5.2 Vliv příměsí do betonu .....	- 42 -
<b>2.6 Vznikající problémy v důsledku smršťování betonové konstrukce.....</b>	<b>- 45 -</b>
<b>3 Experimentální část.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>3.1 Cíl experimentu .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>3.2 Receptury .....</b>	<b>- 48 -</b>
<b>3.3 Výroba vzorků cementové pasty .....</b>	<b>- 50 -</b>
3.3.1 Pomůcky pro betonáž.....	- 50 -
3.3.2 Postup výroby.....	- 50 -
3.3.3 Problémy při betonáži .....	- 51 -
<b>3.4 Měření smršťování vzorků .....</b>	<b>- 54 -</b>



---

3.4.1	Podmínky prostředí .....	- 54 -
3.4.2	Průběh měření.....	- 55 -
3.4.3	Faktory ovlivňující přesnost naměřených dat .....	- 56 -
3.4.4	Výsledky měření hlavní fáze smršťování .....	- 58 -
<b>3.5</b>	<b>Výsledky smršťování podle predikčních modelů .....</b>	<b>- 64 -</b>
<b>3.6</b>	<b>Porovnání naměřených dat s výpočetními modely.....</b>	<b>- 73 -</b>
<b>3.7</b>	<b>Zkoušení pevnosti.....</b>	<b>- 77 -</b>
3.7.1	Pevnost v tahu za ohybu .....	- 77 -
3.7.2	Pevnost v tlaku .....	- 79 -
3.7.3	Vyhodnocení zkoušek pevnosti .....	- 81 -
<b>3.8</b>	<b>Chyby měření .....</b>	<b>- 84 -</b>
<b>4</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>- 88 -</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>- 90 -</b>
	<b>Zdroje .....</b>	<b>- 90 -</b>
	<b>Normy:.....</b>	<b>- 90 -</b>
	<b>Literatura a internetové zdroje: .....</b>	<b>- 91 -</b>
	<b>Zdroje obrázků .....</b>	<b>- 93 -</b>

# 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. Pokud se zaměříme na menší železobetonové stavby, smršťování nemá při navrhování výztuže příliš velký vliv. 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. Dalším příkladem, kde je potřeba kontrolovat tahové napětí od smršťování, jsou konstrukce z pohledového betonu, kde navíc vstupuje další vlastnost, a to je barva. Jednotlivé příměsi mohou mít negativní vliv na stálost barevného odstínu povrchu betonu a na kontrast i jas probarveného betonu.

Tato práce si klade za cíl podrobně představit smršťování betonu. Nejdříve bude stručně charakterizován průběh hydratace cementu, při kterém se dostavuje prvotní část smršťování. Dále bude popsáno, kdy a za jakých podmínek ke smršťování dochází, jaké známe druhy, co vše ho může ovlivnit a především omezit. Předmětem této práce je ukázat negativní účinky smršťování na konstrukcích, představit predikční modely pro smršťování a podrobněji popsat příměsi do betonu, jejichž trend používání v současné době čím dál více roste.

Součástí práce je také experiment, který bude mít za úkol potvrdit či vyvrátit platnost jednotlivých predikčních modelů pro smršťování. Cílem experimentální práce je výroba cementových vzorků s různými latentně hydraulickými příměsi – mikrosilika, metakaolin a elektrárenský popílek. Pro porovnání byl vyroben také referenční vzorek, který je složen pouze z cementu. 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 %. Dále byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a zkoušky pevnosti v tlaku. V této části budou také představeny problémy, se kterými jsem se během experimentální práce potýkal. Budou zde uvedeny chyby a jiné vlivy, které mohou celé měření zásadně ovlivnit a také popsán můj postoj k této problematice. Úplně nakonec bude čtenář seznámen s detailním rozbohem výsledků a jejich porovnáním s dodnes nasbíranými údaji.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 HYDRATAČE CEMENTU

Na úvod je vhodné udělat přehled o tom, co samotnému smršťování předchází. Hydratace Portlandského cementu je velmi složitý proces skládající se z mnoha chemických reakcí jednotlivých jeho složek. Portlandský cement se skládá z oxidů a slínekových minerálů. Tab. 2.1 uvádí přehled hlavních složek cementu sestupně dle procentuálního zastoupení.

Tab. 2.1 – Hlavní složky portlandského cementu [7]

Oxidy			Slínekové minerály		
slovní pojmenování	chemické označení	zkratka	slovní pojmenování	chemické označení	zkratka
oxid vápenatý	CaO	C	trikalciurní silikát (alit)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
oxid křemičitý	SiO <sub>2</sub>	S	dikalciurní silikát (belit)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
oxid hlinitý	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	trikalciurní aluminát	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
oxid železitý	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	kalcium aluminát ferit	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
oxid hořečnatý	MgO	M	volné CaO	CaO	C <sub>v</sub>
oxid sírový	SO <sub>3</sub>	S'	volné MgO	MgO	M <sub>v</sub>

#### 2.1.1 PRŮBĚH HYDRATAČE

Hydratace cementu startuje ve chvíli, kdy jsou slínekové minerály smíchány s vodou (voda je v rovnicích ozn. jako H, tj. H<sub>2</sub>O). Je to chemická exotermická reakce, při které vznikají jemné krystaly a pevné vazby v cementové směsi. Průběh chemických reakcí je doprovázen uvolňováním energie ve formě tepla. Výsledkem hydratace slínekových minerálů jsou produkty, které se liší v závislosti na poměru složek obsažených v cementové směsi, ale také na množství vody účastnící se reakce. Je potřeba určit množství vody tak, aby současně docházelo ke zhydratování většiny cementových zrn a zároveň, aby bylo docíleno co nejmenšího množství zbytkové vody v cementovém kameni, která by se mohla odpařovat. V rovnicích (2.1)-(2.4) jsou uvedené nejčastěji interpretované chemické rovnice hydratace [7].

##### Hydratace C<sub>3</sub>S:



##### Hydratace C<sub>2</sub>S:

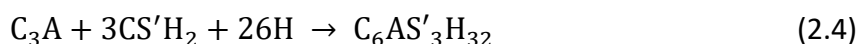


Během hydratace křemičitanových slínekových minerálů dochází k odlučování hydroxidu vápenatého (CH) a ke tvorbě hydrosilikátového gelu (CSH). Trikalciem silikát  $C_3S$  je díky největšímu objemovému zastoupení nejvíce odpovědný za finální pevnost cementového kamene a také za množství uvolněného hydratačního tepla, což má za následek tzv. autogenní smršťování (více v kapitole 2.2.2) v rané fázi tvorby betonu.

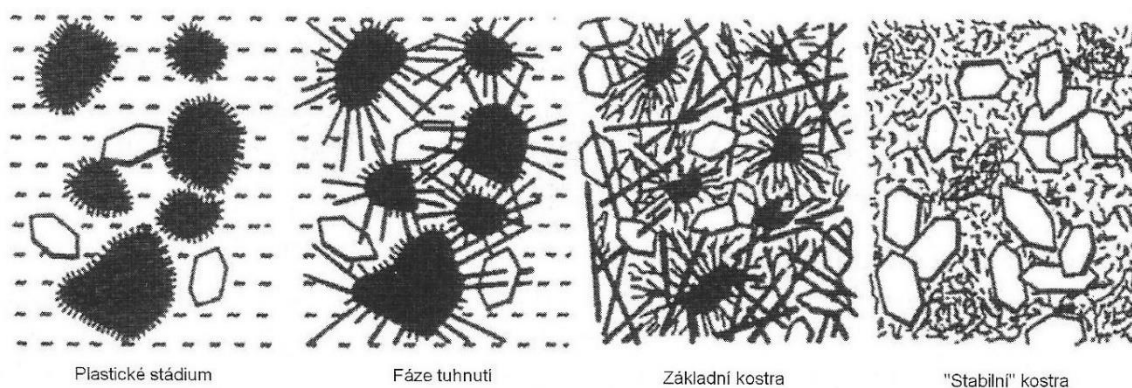
#### Hydratace $C_3A$ (bez sádrovce):



#### Hydratace $C_3A$ (za přítomnosti sádrovce):



Během hydratace aluminátových slínekových minerálů vznikají hydroalumináty výrazně krystalického charakteru. Trikalciem aluminát  $C_3A$  reaguje s vodou ze všech slínekových minerálů nejrychleji a vytváří proto velké množství tepla v cementové směsi, čímž dochází ke snížení konečné pevnosti betonu. Tento rychlý proces reakce je eliminován přidáním sádrovce<sup>1</sup>, který de facto působí jako zpomalovač tuhnutí. Sádrovec se také zaslouhuje o tvorbu ettringitu (AFt), ozn. jako trisulfát a vyznačuje se krystalizací v podobě krátkých jehliček. Není-li sádrovec přítomen nebo je-li kompletně spotřebován v rámci chemických reakcí začne se vytvářet tzv. hydrogarnet  $C_3AH_6$ , který dále reaguje s ettringitem a rekrytalizací dochází ke vzniku monosulfátu (AFm). Z hlediska smršťování betonu působí sádrovec příznivě. Díky eliminaci tvorby hydratačního tepla snižuje objemové změny během tuhnutí betonu [6] [7].



Obr. 2.1 – schématické znázornění hydratačního procesu [7]

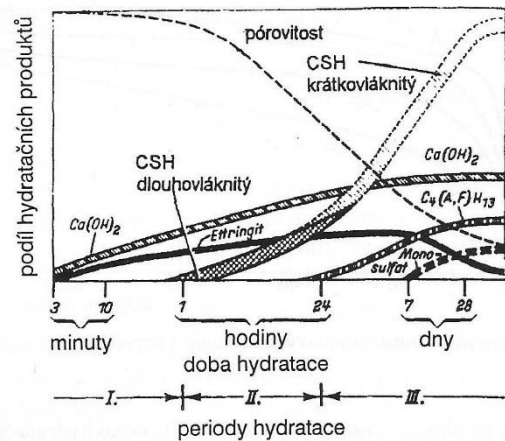
<sup>1</sup> Sádrovec = zhydratovaný síran vápenatý

### 2.1.1.1 PERIODY HYDRATACE

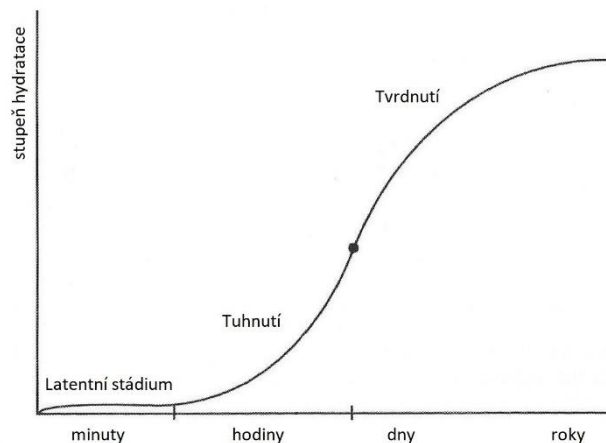
Proces hydratace lze rozdělit do několika period, úvodní tzv. indukční perioda, tuhnutí a tvrdnutí. Na Obr. 2.3 je schématicky znázorněna hydratace a tvorba novotvarů.

**Indukční perioda** se dá rozdělit na dvě části. V té první dochází k prvním chemickým reakcím slínekových minerálů a vyznačuje se velkou rychlostí uvolňování hydratačního tepla rozpouštěním aluminátů a síranů a tvorbě hydroxidu vápenatého (portlanditu) a ettringitu. V této fázi stále hovoříme o tekutosti nebo plasticitě pasty, která trvá přibližně 10-15 min. Ve druhé části dochází k prudkému poklesu aktivních chemických reakcí a s tím i ke snížení tvorby hydratačního tepla, pokračuje tvorba Aft a voda postupně proniká ke zrnům cementu [6] [7].

**Tuhnutí** začíná přibližně po 1-2 hodinách od zamíchání čerstvého betonu a trvá maximálně 1 den. O tom, jak dlouhé budou jednotlivé fáze rozhoduje opět složení cementové pasty, vodní součinitel a teplota. Je-li vody příliš, cementová zrna jsou od sebe více vzdálena a tím se zpomaluje celý proces tuhnutí. V této fázi dochází ke vzniku již zmiňovaného hydro-silikátového gelu a hydroxidu vápenatého, což opět vyvolává zvýšení tvorby tepla. Je známo, že zvýšení teploty má příznivý vliv na hydrataci hlavního slínekového minerálu alitu. Produkty hydratace mají tvar dlouhých vláken. Po pár hodinách se cementová zrna propojí a cementová pasta začíná tuhnout. Během tuhnutí již nemůže být beton ukládán a zhutňován. Pro jednotlivé třídy cementu je v normě definována minimální doba, kdy se mění stupeň hydratace z úvodní periody na tuhnutí. Například pro pevnostní třídu cementu CEM 32,5 je zaručená minimální doba pro zpracování až 75 min, naopak pro CEM 52,5 je to pouze do 45 min od zamíchání cementu s vodou [6] [7] [12].



Obr. 2.2 – tvorba hydratačních produktů [6]



Obr. 2.3 – Indukční období, tuhnutí a tvrdnutí [7]

**Tvrdnutí** je konečná fáze celého hydratačního procesu a může trvat i několik let, přičemž jeho zásadní část se odehraje zpravidla během prvního měsíce zrání betonu. Během tvrdnutí se vytvářejí C-S-H gely a ettringit reaguje s aluminátovými slídkovými minerály, čímž vzniká monosulfát. Díky reakci se v systému generuje další teplo a dochází k urychlení hydratace silikátových fází. Následně se již celý proces postupně zpomaluje, protože pro molekuly vody je čím dál obtížnější dostat se k nezhydratovaným zrnům cementu, které jsou obklopeny zhydratovanými produkty. Na konci celého procesu je cementový kámen, který se skládá z nezhydratovaného cementu, hydrosilikátů (C-S-H), sulfoaluminátů (C-S-A-H) a pórovitých produktů jako je hydroxid vápenatý (C-H) – viz Tab. 2.2. Póry, ve kterých se může vyskytovat voda, mají zásadní vliv na konečné vlastnosti betonu. [6] [7] [10].

Hydratace ostatních látek (např. oxid hořečnatý, oxid sírový) již není pro vlastnosti finálního produktu tolik důležitá, proto se o nich v rámci této práce nebude více pojednávat.

Tab. 2.2 – Výsledné produkty po zhydratování portlandského cementu

Výsledné produkty po zhydratování portlandského cementu			
produkt	označení	množství v %	typická vlastnost
hydrosilikátový gel	C-S-H	50-60 %	výrazně ovlivňuje pevnost
sulfoaluminátový gel	C-S-A-H	15-25 %	zhoršuje odolnost proti síranu
hydroxid vápenatý	C-H	20-25 %	snižuje chemickou odolnost
nezhydratovaný cement	-	různé	snižuje pevnost

### 2.1.2 KLASIFIKACE PÓRŮ

Se změnou skupenství cementové suspenze na tuhou je spojen vznik pórovité struktury. Množství a velikost pórů zásadně ovlivňuje konečné vlastnosti betonu. Mezi nejvýznamnější vlastnosti, které jsou ovlivněny patří odolnost konstrukce v mrazu, pevnost, smršťování, dotvarování, voděodolnost a trvanlivost. Obecně platí, čím je větší vodní součinitel, tím obsahuje vzorek více pórů, což v důsledku znamená menší pevnost. Čím je vyšší jemnost mletí cementu nebo příměsí betonu, tím roste stupeň hydratace a zároveň klesá celková pórovitost, což naopak znamená větší pevnost cementového kamene a nižší propustnost pro nežádoucí látky do vnitřní struktury betonu. Tvorba pórů lze také výrazně ovlivnit ošetřováním betonu a teplotou při které hydratace probíhá [6].

Porézní struktura může vznikat provzdušňující přísadou, zachyceným vzduchem, který uvnitř vytváří bubliny či vzduchové kapsičky nebo póry vytvořené vodou, která nebyla spotřebována k hydrataci anebo se nestačila odpařit. V současné době se však snažíme množství pórů ve finálním betonovém produktu minimalizovat, abychom dostali co nejlepší vlastnosti betonu. Velmi často se proto používají plastifikátory, které umožní snížit vodní součinitel a současně zaručit velmi dobrou zpracovatelnost betonu.

V odborné literatuře najdeme rozdělení zhydratované cementové pasty na gelové póry (mikropóry), kapilární póry a vzduchové dutiny (makropóry). Gelové póry vznikají mezi produkty hydrosilikátového gelu (CSH), jejich velikost se pohybuje od 0,5 do 2,5 nm. Tyto rozměry se považují za příliš malé, aby měly nějaký vliv na pevnost a propustnost cementového kamene. Avšak voda obsažena v gelových pórech má vliv na smršťování a dotvarování betonu. Kapilární póry vznikají v důsledku zmenšení objemu finálního produktu oproti původnímu objemu cementu a vody. V dobře hydratovaných cementových pastách s nízkou hodnotou vodního součinitele se jejich velikost pohybuje mezi 10 až 50 nm. U mladých cementových past s vysokou hodnotou vodního součinitele se velikost kapilárních pórů pohybuje v rozmezí 3 až 50  $\mu\text{m}$ . Zatímco větší kapilární póry mají prokázaný vliv pouze na pevnost a propustnost, ty menší se podílejí i na smršťování od vysychání. Poslední skupinou jsou vzdušné póry, ty se již vyznačují značnou velikostí a jsou převážně kulovitěho charakteru. Vznikají vneseným a zachyceným vzduchem a mají významný vliv na pevnost a propustnost betonu. V Tab. 2.3 jsou přehledně shrnuty základní vlastnosti pórů [7].

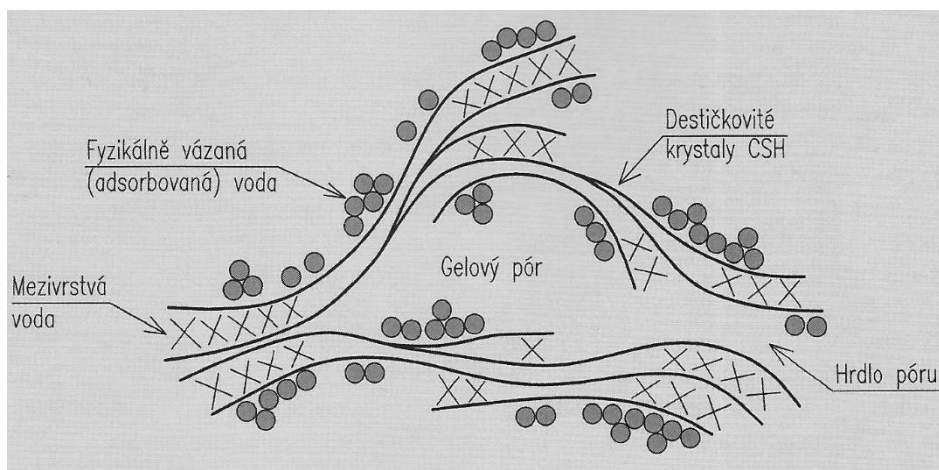
Tab. 2.3 - Klasifikace pórů

Klasifikace pórů			
póry	průměr	popis	ovlivněné vlastnosti
gelové póry	0,5 nm 0,5-2,5 nm	mikropóry „mezivrstvy“ mikropóry	smršťování a dotvarování
gelové póry a kapilární póry	2,5-10 nm	malé kapiláry	smršťování mezi 50% a 80% vlhkosti
kapilární póry	10-50 nm	střední kapiláry	pevnost, propustnost, smršťování nad 80% vlhkosti
	0,05-10 $\mu\text{m}$	velké kapiláry	pevnost a propustnost
vzdušné póry	0,005-1,0 mm	vnesené vzduchové póry	pevnost
	0,01 mm	zachycené vzduchové póry	pevnost
	0,25 - 2mm	napěněné struktury	pevnost a hustota

### 2.1.3 VODA V BETONU

Voda se v cementovém kameni po hydrataci vyskytuje hned v několika podobách. Ta nejnáze odpařitelná a zároveň nejméně ovlivňující mechanicko-fyzikální parametry betonu je tzv. volná voda, která se vyskytuje se v makropórech. Mezi odpařitelnou vodu se dále zařazuje voda fyzikálně vázaná, kterou podle velikosti pórů na jejichž stěnách se voda vyskytuje, můžeme rozdělit na gelovou a kapilární vodu. Jsou to molekuly vody vyskytující se na povrchu krystalických produktů hydratace. Obecně platí, čím je velikost pórů větší, tím lépe se voda odpařuje. Aby došlo k vysušení kapilární vody, jehož důsledkem je smršťování, je třeba ohřátí betonu alespoň na 105°C. Speciálním případem je voda mezivrstevová (tzv. interlayer water). Produkty CSH se skládají z několika vrstev a právě mezi těmito vrstvami může být uvězněná voda. Voda v této vrstvě sice patří mezi odpařitelné, avšak k jejímu zmizení je potřeba intenzivní vysušování, což vede k vyššímu smrštění vzorku. Schématické znázornění vody v pórové struktuře cementového tmele je znázorněna na Obr. 2.4. Posledním druhem je voda chemicky vázaná, v některých zdrojích nazývána také jako voda hydratovaná. Chemicky vázaná voda se podílí na pevné struktuře cementového kamene a jejím vysušením dochází k rozkladu produktů hydratace, což vede postupně k úplné destrukci betonu. Pro docílení vysušení chemicky vázané vody je potřeba teploty vyšší jak 1000 °C. [7] [11] [12] [13]

Voda v betonu slouží jako transportní prostředí pro různé látky, což může způsobovat problémy, pokud se konstrukce vyskytuje v agresivním prostředí. Transport vody může vzniknout několika hnacími silami mezi které patří například, gradient koncentrace vodní páry v prostředí s rozdílnou relativní vlhkostí, hydraulický gradient v případě, že se konstrukce vyskytuje ve vodě, teplotní gradient nebo elektrický gradient [13].



Obr. 2.4 – Schématické znázornění vody v pórové struktuře cementového tmele [13]



## 2.2 DRUHY SMRŠŤOVÁNÍ

Smršťování patří bezesporu mezi nejvýznamnější vlastnosti betonu, které zásadně ovlivňují dlouhodobé chování betonových konstrukcí. Spolu s dotvarováním tvoří dvojici reologických vlastností betonu způsobujících objemové změny. Smršťování a dotvarování jsou často hodnoceny dohromady, jelikož jejich původ v obou případech přímo souvisí s hydratací. Předmětem této práce je smršťování, proto je nezbytné rozlišovat mezi základními typy smršťování, které se často vyskytují při realizaci betonových konstrukcí, tj. plastické smršťování, autogenní smršťování, chemické smršťování a smršťování vysušováním. Všechny mají jedno společné, hlavní příčinou je voda.

### 2.2.1 PLASTICKÉ SMRŠŤOVÁNÍ

Plastické smršťování vzniká na povrchu betonové konstrukce v prvních hodinách od uložení betonu. Pokud není zajištěno řádné ošetřování betonu, dochází k odpařování vody z cementové směsi. Z počátku je úbytek vody v povrchové části doplňován vodou z vnitřní oblasti cementové směsi, jakmile však odpařování vody z povrchu bude rychlejší než migrace vody z vnitřní oblasti směrem k povrchu, dojde k lokálnímu povrchovému zmenšení objemu, čemuž říkáme plastické smršťování [15].

Smrštění povrchové vrstvy betonu s sebou přináší trhliny. Hloubka trhlin od plastického smršťování může dosáhnout 38–50 mm, tím je narušena krycí vrstva a otevírá se tím cesta agresivních látek až k výztuži betonu, což může způsobit korozi výztuže betonu a snížení životnosti konstrukce. V literatuře se můžeme setkat s radou, že přidáním výztuže či kameniva omezíme vznik těchto trhlin. V rané fázi však mezi betonem a výztuží není dosaženo dostatečné soudržnosti, aby vznikající tahové síly mohly být přeneseny do ocelových prutů, resp. kameniva. [15]

V prvních hodinách je tedy zásadní věnovat se ošetřování betonu a zamezit tím odpařování vody z horní vrstvy cementové směsi. Mezi aspekty, na které je třeba dát si pozor patří venkovní teplota, přímé vystavení slunečnímu záření, proudění vzduchu vlivem silného větru a relativní vlhkost venkovního vzduchu. To nejlepší, co však můžeme udělat, je aktivně zvlhčovat horní vrstvu betonu ve styku s okolním prostředím. Kromě běžných situací může být problém realizace betonové konstrukce v okolí dálnice, kde projíždějící automobily zvyšují rychlost proudění vzduchu v bezprostřední vzdálenosti od nově budované konstrukce

či betonové vozovky. Minimální doba ošetřování betonu byla přehledně zpracována v normě ČSN EN 206-1 (viz Tab. 2.4), která sice již pozbyla platnosti, nicméně řídit se těmito předpisy je správné i dnes. Mimo aktivní ochranu před smršťováním, můžeme zvolit některou z pasivních metod jako je například ponechání konstrukce v bednění nebo použití nástřiků chránících konstrukcí před vnějšími vlivy prostředí.

Tab. 2.4 - Minimální doba ošetřování v závislosti na okolních podmínkách [20]

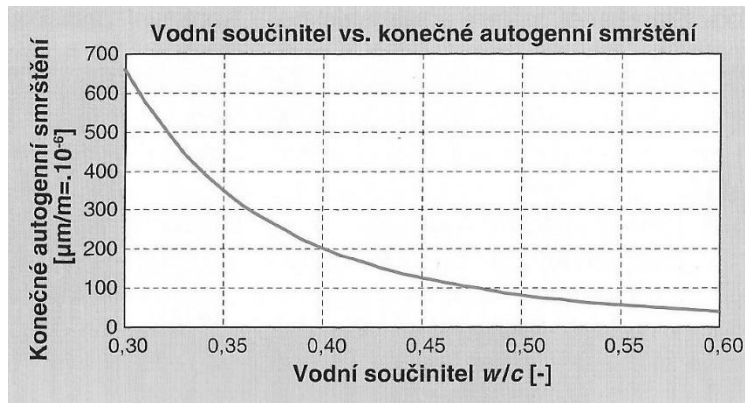
Růst pevnosti betonu		rychlý *			střední **			pomalý ***		
teplota betonu [°C]		0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15
počet dní ošetřování v závislosti na okolních podmínkách	stín, vlhkost > 80 %	2	2	1	3	3	2	3	3	2
	střední oslunění, střední vítr, vlhkost > 50 %	4	3	2	6	4	3	8	5	4
	silné oslunění, silný vítr, vlhkost < 50 %	4	3	2	8	6	5	10	8	6
* w/c < 0,5, CEM 42,5 R										
** w/c < 0,5, CEM 42,5 N nebo CEM 32,5 R nebo w/c = 0,5-0,6, CEM 42,5 R										
*** ve všech ostatních případech										

## 2.2.2 AUTOGENNÍ SMRŠŤOVÁNÍ

Při smíchání cementu s vodou začne probíhat hydratační reakce, při které se ionty cementu rozpustí ve vodě. Výsledkem je zhydratovaný produkt, který má menší objem než původní cement s vodou – tomuto jevu říkáme autogenní smrštění. Tento fakt byl zaznamenán již v roce 1900, zasloužil se o to La Chatelier.

Autogenní smršťování je definováno jako makroskopická objemová kontrakce betonu v raném stáří, tj. většinou do jednoho dne od zamíchání cementu s vodou. Během autogenního smršťování nedochází k úniku vody do okolního prostředí a není ovlivněno vlhkostí okolního prostředí. Vzniká v důsledku hydratačních reakcí především u cementové směsi s nízkým vodním součinitelem, které způsobují tzv. samovysychání betonu, jehož následkem je chemické smršťování na mikroúrovni cementové matrice. V dřívějších dobách bylo autogenní smršťování téměř bezvýznamné, to se změnilo v momentě, kdy technologové přišli na to, že snížením vodního součinitele zlepší pevnost betonu a chybějící vodu v cementové směsi vykompenzovali plastifikátory. Právě snížení množství vody zvyšuje míru

smrštění během hydratace (viz Obr. 2.5). Lze dokonce říci, čím vyšší je pevnost betonu, tím je vyšší autogenní smršťování. Pokročilejší návrh betonu s náhradou cementu za příměsi, přidávalo autogennímu smršťování na významu. V dnešní době má tento druh smršťování významný podíl na celkové objemové deformaci vysokohodnotných betonů a je mu věnována patřičná pozornost [13] [15].



Obr. 2.5 Autogenní smršťování v závislosti na vodním součiniteli [13]

Jak už bylo zmíněno u vysokohodnotných betonů s nízkým vodním součinitelem dochází k tzv. samovysychání. Tento stav může nastat v případě, kdy jsou vnitřní póry během hydratace odříznuty od vnějšího zdroje vody. Zbytek vody v oddělených pórech je spotřebován ke zhydratování zrn, což opět vede ke zmenšení objemu nazývanému smršťování samovysycháním. K tomuto jevu může docházet i při sebelepšimu ošetřování betonu.

Je nutné zmínit fakt, že název autogenní smršťování není úplně správný. Během prvních dní (většinou do 48 hod) často dochází také k bobtnání vzorků. Z tohoto důvodu se někdy místo pojmu autogenní smršťování používá termín autogenní deformace. Typickým příkladem, kdy dochází k nabobtnání, je hydratace vzorků umístěných ve vodě. Póry jsou totiž stále zásobovány vodou z vnějšího prostředí a tím je zabráněno tvorbě menisků, které mají tendenci prázdné póry uzavírat.

Důvodem, proč je u běžných betonů autogenní smršťování zanedbatelné, je množství větších pórů, které vznikají v důsledku většího vodního součinitele. Pokud je v cementové směsi více vody, cementová zrna jsou dále od sebe a tím se vytvářejí póry větších velikostí než u vysokohodnotných betonů. Ve větších pórech je voda vázána menšími silami a tím dochází ke snadnému odpařování vody do okolního prostředí. Úbytek vody v cementové směsi má sice

na svědomí tvorbu menisků, ale ve velkých pórech nejsou schopny vyvolat tak velké tahové síly, aby mohlo dojít k výraznějšímu autogennímu smrštění, avšak v tomto případě je poměrná deformace významně ovlivněna smršťováním od vysychání viz další kapitola. [10]

### 2.2.3 SMRŠŤOVÁNÍ VYSYCHÁNÍM

Smršťování od vysychání je definováno jako odpařování vody z pórovité mikrostruktury betonu, v jehož důsledku se zmenšuje objem vzorku. Platí, že nejdříve se odpařuje voda z větších pórů a blíže k povrchu a teprve poté začínají vysychat menší kapiláry a vnitřní struktury betonu. Existuje blízký vztah mezi velikostí smrštění a obsahem vody v cementové směsi za konkrétních vlhkostních podmínek okolního prostředí. Experimenty ukázaly, že vysychání začíná v momentě, kdy se relativní vlhkost okolního prostředí dostane pod 95 %. Se snižující se vlhkostí se zvyšuje míra smršťování betonu, vyplývá to z toho, že mezi vnitřním (na začátku velmi vlhkým prostředím) a okolním prostředím vzniká vlhkostní gradient ve směru k vnějšímu prostředí, kde je zpravidla vlhkost o desítky procent nižší. Vlhkost difunduje z místa s vyšším parciálním tlakem vodní páry do místa s nižším parciálním tlakem. Pro představu v České republice je průměrná roční hodnota relativní vlhkosti venkovního vzduchu cca 75 %.

V článku [14] najdeme vztah pro výpočet orientačního charakteristického času, za který se vysychací fronta v betonu přesune až k nejvzdálenějšímu okraji betonové desky a na základě které byl učiněn odhad doby vysychání, což jsou u masivnějších konstrukcí překvapivě velmi vysoké hodnoty. Při tloušťce desky 100 mm vychází odhad (vlhkost uprostřed desky je stejná jako vlhkost v okolním prostředí) na 100 až 150 dní. Při dvojnásobné tloušťce je to již 400 až 600 dní. Pokud bychom měli masivnější konstrukci s deskou o tloušťce 400 mm, vychází odhad mezi 1000 a 1500 dny. V extrémním případě, kde by výška průřezu desky čítala 800 mm, vychází horní limit na konec vysychání až na 6000 dní, což je necelých 17 let.

Existuje několik vysvětlení, proč dochází k objemové deformaci. Jedno říká, že rozdělení tlaků úzce souvisí s vodou absorbovanou ve vrstvách C-S-H gelu. C-S-H gel vstřebává veškerou vlhkost v okolí a tato vrstva se s rostoucí vlhkostí stále zvětšuje. Pokud relativní vlhkost přesáhne hodnotu 100 %, voda obklopující C-S-H gel je vlivem van der Waalsových sil<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Van der Waalsovy síly – přitažlivé a odpudivé síly mezi molekulami (v našem případě přitahování kladně a záporně nabitých iontů vody a hydrátů)

absorbována mezi dvě vrstvy gelu, což generuje tlak, který vede k mírné expanzi materiálu. Pokud relativní vlhkost klesne, odpovídajícím způsobem klesne také tlak uvnitř struktury betonu a opět za pomoci Waalsových sil se vrstva vody oddělí, v důsledku toho se zmenší objem a nastává smršťování. Tento jev nastává, pokud je relativní vlhkost vyšší jak 45 % [15].

Další možné vysvětlení smršťování je efekt kapilárního napětí. S postupující hydratací se v betonu zvyšuje objem vzduchu a následně jsou v rámci kapilárních pórů vytvořeny stykové plochy (menisky) mezi vzduchem a vodou, které vytvářejí kapilární napětí. Tento proces odpovídá hydrostatickému tlaku, který táhne vzduchové dutiny do vnitřní struktury C-S-H gelů. Se snižující se relativní vlhkostí se toto napětí zvětšuje. Tyto pravidla přestávají opět platit při snížení relativní vlhkosti pod 45 %. V ostatních případech hrají zřejmě roli změny povrchové energie, více v literatuře [15].

Důsledky smršťování od vysychání lze vysvětlit následujícím způsobem. Jelikož blíže k povrchu probíhá vysychání rychleji než uvnitř vzorku i deformace od smršťování je větší blíže k povrchu. Výsledkem rozdílného smršťování je vyrovnávací napětí, které způsobuje tlak uprostřed vzorku a tahové napětí na okrajích. Tento jev si můžeme představit jako oddělení jádra průřezu od „vnějšího pláště“ vzorku za vzniku smykového napětí na rozhraní těchto částí. Toto zmíněné rovnovážné napětí v praxi snižuje pevnost v ohybu. Například ohýbaný vetknutý nosník v železobetonových stěnách, kde ke smršťování dochází ve směru vetknutí, vzniká větší množství tahových trhlin od smršťování [15].

Smršťování vysycháním v sobě téměř vždy obsahuje i dílčí složku, kterou je karbonatační smršťování. Karbonatace je proces probíhající v povrchových vrstvách betonu. Principem je reakce mezi hydroxidem vápenatým a oxidem uhličitým z atmosféry za přítomnosti vody, jejímž produktem je uhličitán vápenatý a voda. Protože produkty této reakce mají menší objem než vstupní složky, je vyvolána tendence ke smrštění v povrchové vrstvě. Skutečné karbonatační smrštění celého průřezu je ale menší vlivem vnitřního omezení deformací jádrem průřezu, ve kterém karbonatace nenastává [13].

## 2.3 PREDIKČNÍ MODELY PRO SMRŠŤOVÁNÍ

V této části budou představeny nejznámější 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. Následující kapitola má za úkol udělat jasný přehled o vlastnostech a výpočtu modelů ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 1992-2 a modelu B3 a B4 od prof. Bažanta a jeho kolektivu.

### 2.3.1 MODEL ČSN EN 1992-1-1

Tento model jeden z nejzákladnějších predikčních modelů pro smršťování, který navazuje na dřívější model nesoucí název CEB-FIP Model Code 1990. Mezi parametry, se kterými model umí pracovat patří, základní rozměry vzorku, typ použitého cementu, relativní vlhkost okolního prostředí, doba ošetřování betonu nebo také 28denní tlaková pevnost. Výsledek modelu naopak není ovlivněn konkrétním složením cementové směsi, zejména pak vzorky obsahující příměsi nebo přísady se budou s křivkou předpovídající smršťování velmi rozcházet. Zvolený poměr frakcí kameniva či obsah vody v cementové pastě také zásadně ovlivní průběh smršťování, ale tento model ho bohužel nezachytí. Tento matematický model nejlépe vystihuje konstrukce běžných pevností betonu (do 58 MPa) a běžných velikostí průřezu [3].

Celková míra poměrného přetvoření od smršťování v daném čase je rovna součtu smrštění autogenního a smrštění od vysychání (viz (2.5)).

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cd}(t, t_0) + \varepsilon_{ca}(t) \quad (2.5)$$

Smršťování od vysychání je počítáno ze vztahu:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_0) = \beta_{ds}(t, t_0) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}(t, t_0) \quad (2.6)$$

kde,

$\beta_{ds}(t, t_0)$  je funkce charakterizující smršťování od vysychání v čase,  $t_0$  je pak obvykle čas, kdy končí ošetřování betonu.  $k_h$  je koeficient zohledňující efektivní tloušťku a  $\varepsilon_{cd,0}(t, t_0)$  je konečná hodnota poměrného smršťování vysycháním.

Vyjmenované prvky jsou popsány vztahy:

$$\beta_{ds}(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + 0,04\sqrt{h_0^3}}, \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{cd,0}(t, t_0) = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{10[\text{MPa}]}} \right] \cdot \beta_{RH} \cdot 10^{-6}, \quad (2.8)$$

kde,  $h_0$  je výška průřezu,  $\alpha_{ds1}$  a  $\alpha_{ds2}$  jsou součinitelé zohledňující vliv třídy cementu dle Tab. 2.5,  $f_{cm}$  je průměrná pevnost betonu v tlaku a parametr  $\beta_{RH}$  vyjadřuje relativní vlhkost okolního prostředí. Další jednotlivé parametry vycházejí ze vztahů:

Tab. 2.5 - koeficienty závislé na třídě cementu

součinitel/třída cementu	N	R	L
$\alpha_{ds1}$	4	6	3
$\alpha_{ds2}$	0,12	0,11	0,13

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100[\%]} \right)^3 \right], \quad (2.9)$$

$$h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{u_0} \quad (2.10)$$

kde,

$h_0$  je náhradní výška průřezu,  $u_0$  je obvod průřezu, který je vystavený okolnímu prostředí a může vysychat a  $A_c$  je průřezová plocha

Tab. 2.6 - hodnoty součinitele  $k_h$

$h_0$	100	200	300	$\geq 500$
$k_h$	1	0,85	0,75	0,7

Autogenní smršťování je vypočteno ze vztahu:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca,0}(\infty) \quad (2.11)$$

kde,  $\varepsilon_{ca,0}(\infty)$  je hodnota autogenního smrštění v čase  $t_{\infty}$  a  $\beta_{ca}(t)$  je funkce charakterizující autogenní smršťování v čase. Uvedené neznámé je možné vypočítat ze vztahu:

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}} \quad (2.12)$$

a

$$\varepsilon_{ca,0}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (2.13)$$

kde,

$t$  je stáří betonu ve dnech a  $f_{ck}$  je válcová pevnost betonu v MPa.

### 2.3.2 MODEL ČSN EN 1992-2

Model dle ČSN EN 1992-2 je pokročilý díky novému parametru, který dokáže zohlednit přítomnost mikrosiliky v betonu. Je to velmi důležitý parametr pro predikci smršťování, protože přidání mikrosiliky má negativní vliv na průběh reologického chování betonu v průběhu jeho zrání. Na druhou stranu však již neobsahuje součinitele, které by rozlišovaly typ použitého cementu, jako tomu bylo v modelu předchozím. Již z původu normy je zřejmá oblast použití, čímž jsou vysokopevnostní betonové konstrukce (63 - 98 MPa) sloužící především pro stavbu konstrukcí mostů. Stejně jako u modelu ČSN EN 1991-1-1 je celková míra poměrného přetvoření od smršťování sestavena z míry smrštění od autogenního smršťování a ze smršťování vysycháním – viz rovnice (2.5). Smršťování od vysychání je počítáno z níže uvedeného vztahu a je použitelný pro  $RH < 80\%$ . Výpočty ostatních parametrů jsou shodné s předchozím matematickým modelem. [4]

$$\varepsilon_{cd}(t, t_0) = \frac{K_{fck} [72 * e^{-0,046 * f_{ck}} + 75 - RH](t - t_0) \cdot 10^{-6}}{(t - t_0) + \beta_{cd} \cdot h_0^2} \quad (2.14)$$



kde,

$$K_{f_{ck}} = \begin{cases} 18 & \text{pro } f_{ck} \leq 55 \text{ MPa;} \\ 30 - 0,21f_{ck} & \text{pro } f_{ck} > 55 \text{ MPa.} \end{cases} \quad (2.15)$$

a

$$\beta_{cd} = \begin{cases} 0,007 & \text{pro beton s mikrosilikou;} \\ 0,021 & \text{pro beton bez mikrosiliky.} \end{cases} \quad (2.16)$$

Model pro výpočet autogenního smršťování je rozdělen na dvě části.

1) Pokud:  $t < 28$  dní a:

a) současně platí, že  $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} < 0,1$ , pak:

$$\varepsilon_{ca}(t, t_0) = 0 \quad (2.17)$$

b) současně platí, že  $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \geq 0,1$ , pak:

$$\varepsilon_{ca}(t) = (f_{ck} - 20) \cdot \left( 2,2 \cdot \frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} - 0,2 \right) \cdot 10^{-6} \quad (2.18)$$

kde,

$\varepsilon_{ca}(t, t_0)$  je autogenní smršťování, které proběhlo mezi počátkem tuhnutí a časem  $t$ .  
V případě že není známa hodnota pevnosti  $f_{cm}$  je možné ji stanovit podle ČSN EN 1992-1-1.

2) Pokud  $t \geq 28$  dní :

$$\varepsilon_{ca}(t) = (f_{ck} - 20) \cdot (2,8 - 1,1 \cdot e^{-\frac{t}{96}}) \cdot 10^{-6} \quad (2.19)$$

Vztah pro průměrnou hodnotu pevnosti betonu ve stáří  $t$  :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (2.20)$$

kde,

$$\beta_{cc}(t) = \min \left[ 1; e^{s \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right)} \right] \quad (2.21)$$

s je koeficient závisící na druhu cementu dle (2.22)

$$s = \begin{cases} 0,25 & \text{třída N – normální nárůst pevnosti} \\ 0,20 & \text{třída R – rychlý nárůst pevnosti} \\ 0,38 & \text{třída S – pomalý nárůst pevnosti} \end{cases} \quad (2.22)$$

### 2.3.3 MODEL B3

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., přehled konkrétních hodnot je uveden v Tab. 2.7. 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 uvedených deformací [16].

Tab. 2.7 - Rozsah parametrů modelu B3 [16]

relativní vlhkost (RH)	40 - 100 [%]
poměr kameniva a cementu (a/c)	2,5 - 13,5 [-]
obsah cementu (c)	160 - 720 [kg/m <sup>3</sup> ]
vodní součinitel (w/c)	0,35 - 0,85 [-]
průměrná válcová pevnost ve 28 dnech (f <sub>c</sub> )	17 - 70 [MPa]

Hlavní deformace průřezu od smršťování je spočtena ze vztahu:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{sh,\infty}(t, t_0) \cdot k_h \cdot S(t) \quad (2.23)$$

$\varepsilon_{sh,\infty}(t, t_0)$  vyjadřuje závislost smršťování v čase s přihlédnutím na typ cementu, způsob ošetřování, množství vody v cementové směsi a pevnost v tlaku. Součinitel  $k_h$  přihlíží k relativní vlhkosti prostředí a  $S(t)$  zahrnuje tvar a rozměr průřezu. Vztahy pro výpočet jednotlivých parametrů jsou uvedeny v rovnicích č. (2.24) - (2.31).

$$\varepsilon_{sh,\infty}(t, t_0) = -\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot (1,9 \cdot 10^{-2} \cdot \omega^{2,1} \cdot f_c^{-0,28} + 270) \cdot 10^{-6} \quad (2.24)$$

kde,

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{pro cement typu I;} \\ 0,85 & \text{pro cement typu II;} \\ 1,1 & \text{pro cement typu III.} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{parní ošetřování betonu;} \\ 1,1 & \text{ošetřování na vzduchu s poč. ochranou proti vysychání;} \\ 2,0 & \text{ošetřování pod vodou nebo v prostředí se 100% RH.} \end{cases} \quad (2.26)$$

Součinitel zohledňující vlhkost:

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \text{pro } h \leq 0,98; \\ -0,2 & \text{pro } h = 1,0; \\ \text{lin. interpolací} & \text{pro } 0,98 \leq h \leq 1,0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Časová závislost  $S(t)$  a závislosti na geometrii vzorku jsou dány vztahy a parametry:

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}} \quad (2.28)$$

$$\tau_{sh} = k_t (k_s D)^2 \quad (2.29)$$

$$k_t = 8,5 \cdot t_0^{-0,08} \cdot f_c^{-0,25} \quad (2.30)$$

$$k_s = \begin{cases} 1,0 & \text{pro nekonečnou desku;} \\ 1,15 & \text{pro nekonečný válec;} \\ 1,25 & \text{pro nekonečný čtyřhran;} \\ 1,30 & \text{pro kouli;} \\ 1,55 & \text{pro kostku.} \end{cases} \quad (2.31)$$

kde,

$D$  je efektivní tloušťka průřezu dána dvojnásobkem poměru objemu a obsahu průřezu.

Predikční model může být zlepšen, pokud upravíme některé parametry na základě krátkodobého měření vzorku (alespoň 28 dní). Je potřeba měřit současně objemové a hmotnostní úbytky v čase. Tato metoda využívá toho, že smršťování a hmotnostní úbytky jsou na sobě vzájemně závislé. Poločas hmotnostního úbytku lze vypočítat i při krátkodobém sledování vzorku, jelikož můžeme určit konečnou hodnotu hmotnostního úbytku na 100% vysušeném vzorku (dosaženo ohřátím vzorku nad 105 °C). Více o postupu v literatuře [16].

#### 2.3.4 MODEL B4

Tím nejs sofistovanějším matematickým modelem pro predikci smršťování je model B4 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 vystihnoutí 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 nejpřesnějších metod, které jsou v současné době k dispozici. Přehled parametrů se kterými model umí pracovat je opět shrnut v Tab. 2.8. Jediné, 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 zlepšení brzy dočkáme.

Tab. 2.8 - Rozsah parametrů modelu B4 [17]

relativní vlhkost (RH)	40 - 100 [%]
poměr kameniva a cementu (a/c)	1 - 13,2 [-]
obsah cementu (c)	200 - 1500 [kg/m <sup>3</sup> ]
vodní součinitel (w/c)	0,22 - 0,87 [-]
okolní teplota (T)	-25 - 70 [°C]
průměrná válcová pevnost ve 28 dnech ( $f_c$ )	15 - 70 [MPa]

Celkové smrštění betonového vzorku je zde dáno součtem autogenního smršťování a smršťování od vysychání viz rovnice (2.32).

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh,dr}(t, t_0) + \varepsilon_{sh,au}(t, t_0) \quad (2.32)$$

Výpočet smršťování od vysychání:

$$\varepsilon_{sh,dr}(t, t_0) = \varepsilon_{sh,\infty}(t_0) + k_h + S(t) \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_{sh,\infty}(t_0) = -\varepsilon_0 \cdot k_{\varepsilon a} \frac{E_{cm}(607)}{E_{cm}(t_0 + \tau_{sh})} \quad (2.34)$$

$$E_{cm}(t) = E_{28} \sqrt{\frac{t}{4 + \left(\frac{6}{7}\right)t}} \quad (2.35)$$

$$E_{28} = 4734\sqrt{f_c} \quad (2.36)$$

kde  $E_{cm}$  je sečnový modul pružnosti v čase  $t$ ,  $f_c$  je pevnost v tlaku ve 28 dnech,  $E_{28}$  je modul pružnosti ve 28 dnech, součinitel  $k_{\varepsilon a}$  vyjadřuje vliv použitého kameniva viz Tab. 2.10 a  $\tau_{sh}$  je poločas smršťování vysycháním ve dnech. Konečné smršťování od vysychání je dáno vztahem:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\varepsilon a}} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{p_{\varepsilon w}} \cdot \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\varepsilon c}} \quad \rho = 2350 \text{ kg/m}^3 \quad (2.37)$$

kde  $a/c$  je hmotnostní poměr kameniva k cementu,  $w/c$  je vodní součinitel a  $c$  je množství cementu. Koeficienty  $p_{\varepsilon a}$ ,  $p_{\varepsilon w}$  a  $p_{\varepsilon c}$  vnášejí vliv použité třídy cementu.

$$\tau_{sh} = \tau_0 \cdot k_{\tau a} \cdot \left( k_s \cdot \frac{D}{1mm} \right)^2 \quad (2.38)$$

$$\tau_0 = \tau_{cem} \left( \frac{a/c}{6} \right)^{p_{\tau a}} \cdot \left( \frac{w/c}{0,38} \right)^{p_{\tau w}} \cdot \left( \frac{6,5c}{\rho} \right)^{p_{\tau c}} \quad \rho = 2350 kg/m^3 \quad (2.39)$$

Parametr  $k_s$  zohledňující geometrii průřezu je shodný s modelem B3 viz rovnice (2.31), vliv použitého kameniva je zohledněn parametrem  $k_{\tau a}$  a parametr  $D$  je efektivní tloušťka průřezu dána dvojnásobkem poměru objemu a obsahu průřezu. Dále parametr  $k_h$  vyjadřuje vliv relativní vlhkosti prostředí ( $h = RH$ ):

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \text{pro } h \leq 0,98; \\ -0,2 & \text{pro } h = 1,0; \\ 12,94(1 - h) & \text{pro } 0,98 \leq h \leq 1,0 \end{cases} \quad (2.40)$$

Poslední prvek rovnice pro výpočet smršťování od vysychání je funkce popisující průběh smršťování v čase  $S(t)$ , která je dána vztahem:

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t}{\tau_{sh}}} \quad (2.41)$$

Tab. 2.9 Závislost smršťování od vysychání na třídě cementu  
(normální vývoj pevnosti – N, rychlý vývoj pevnosti – R, pomalý vývoj pevnosti – L)

parametr	N	R	L
$\tau_{cem}$	0,016 [den]	0,08 [den]	0,01 [den]
$p_{\tau a}$	-0,33	-0,33	-0,33
$p_{\tau w}$	-0,06	-2,4	3,55
$p_{\tau c}$	-0,1	-2,7	3,8
$\varepsilon_{cem}$	$360 \cdot 10^{-6}$	$860 \cdot 10^{-6}$	$410 \cdot 10^{-6}$
$p_{\varepsilon a}$	-0,8	-0,8	-0,8
$p_{\varepsilon w}$	1,1	-0,27	1,0
$p_{\varepsilon c}$	0,11	0,11	0,11

Tab. 2.10 - Parametry použitého kameniva [17]

druh kameniva	$k_{\tau a}$	$k_{\varepsilon a}$
diabas	0,06	0,76
křemen	0,59	0,71
vápenec	1,8	0,95
pískovec	2,3	1,6
žula	4,0	1,05
křemenný diorit	15	2,2
ostatní	1,0	1,0

Výpočet autogenního smršťování:

$$\varepsilon_{sh,au}(t, t_0) = \varepsilon_{au,\infty} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\tau_{au}}{t + t_0} \right)^\alpha \right]^{r_t} \quad (2.42)$$

kde  $r_t$  je dáno tabulkou v závislosti na druhu cementu a součinitel  $\alpha$  je vypočtený ze vztahu:

$$\alpha = r_\alpha \cdot \left( \frac{w/c}{0,38} \right) \quad (2.43)$$

Pro výpočet je třeba stanovit konečné autogenní smrštění  $\varepsilon_{au,\infty}$  a poločas autogenního smršťování ve dnech  $\tau_{au}$ . Tyto parametry jsou dány následujícími rovnicemi:

$$\varepsilon_{au,\infty} = -\varepsilon_{au,cem} \left( \frac{a/c}{6} \right)^{r_{\varepsilon a}} \cdot \left( \frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\varepsilon w}} \quad (2.44)$$

$$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \cdot \left( \frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\tau w}} \quad (2.45)$$

Koeficienty  $r_{\varepsilon a}$ ,  $r_{\varepsilon w}$  a  $r_{\tau w}$  vnáší vliv použité třídy cementu viz Tab. 2.11.

parametr	N	R	L
$\tau_{au,cem}$	1,0 [den]	41,0 [den]	1,0 [den]
$r_{\tau w}$	3,0	3,0	3,0
$r_t$	-4,5	-4,5	-4,5
$r_\alpha$	1,0	1,4	1,0
$\varepsilon_{au,cem}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$84 \cdot 10^{-6}$	$0 \cdot 10^{-6}$
$r_{\varepsilon a}$	-0,75	-0,75	-0,75
$r_{\varepsilon w}$	-3,5	-3,5	-3,5

Tab. 2.11 - Závislost autogenního smršťování na třídě cementu  
normální vývoj pevnosti – N,  
rychlý vývoj pevnosti – R,  
pomalý vývoj pevnosti – L

Všechny efekty vedoucí ke smršťování jsou řízeny zvyšováním či snižováním uvolněné, tzv. aktivační energie hydratace  $U$ , což má za následek horizontální posun křivky logaritmické funkce smršťování. Proto v modelu B4 existují ekvivalentní hodnoty pro čas, tj.  $\check{t}$  resp.  $\check{t}_0$ . Tento efekt teploty je prof. Bažantem popsán jako:

$$\check{t}_0 = t_0 \cdot \beta_{Th} \quad \text{resp.} \quad \check{t} = (t - t_0) \cdot \beta_{Ts} \quad (2.46)$$

kde,

$$\beta_{Th} = \exp \left[ \frac{U_h}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur} + 273} \right) \right] \quad (2.47)$$

resp.

$$\beta_{Ts} = \exp \left[ \frac{U_s}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur} + 273} \right) \right]$$

Pokud nemáme data k tomu, abychom určili hodnoty uvolněné energie během hydratace, můžeme uvažovat  $\frac{U_s}{R} = \frac{U_h}{R} = 4000 \text{ K}$ . Pokud je teplota  $T_{cur}$  rovna  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , pak ekvivalentní hodnota času je rovna skutečnému času:

$$\check{t}_0 = t_0 \quad \text{resp.} \quad \check{t} = (t - t_0) \quad (2.48)$$

#### 2.3.4.1 VLIV PŘÍMĚSÍ A PŘÍMĚSÍ

Jak již bylo zmíněno, model B4 umožňuje zahrnout vliv přísad a příměsí do betonu. Přítomnost příměsí a přísad má často příznivý vliv na konečné smršťování. Odpovídající hodnoty součinitelů jsou pro vybraná aditiva do betonu shrnuty v Tab. 2.12. Je však nutné mít na paměti, že každý výrobce má odlišné složení jednotlivých přídavných složek do betonu a to může způsobit, že model nebude zcela odpovídat. V případech kdy nebyl dostupný úplný chemický model, byly hodnoty součinitelů určeny empiricky, tyto hodnoty jsou v tabulce označeny hvězdičkou. Poměr množství jednotlivých složek významně ovlivňuje chemické reakce během hydratace, které mají na svědomí objemové změny [17].

Stejně jako u modelu B3 je možné aktualizovat predikční model na základě krátkodobějšího měření hmotnostních úbytků. Postup aktualizace jednotlivých parametrů je podrobně popsán v článku prof. Bažanta [16].



Tab. 2.12 - Parametry zohledňující vliv přísad a příměsí podle modelu B4

přísady a příměsí (% z cementu)	$x \tau_{cem}$	$x \varepsilon_{au,cem}$	$x r_{ew}$	$x r_{\alpha}$
Retardér ( $\leq 0,5$ ), Popílek ( $\leq 15$ )	6,00	0,58	0,50	2,60
Retardér ( $> 0,5; \leq 0,6$ ), Popílek ( $\leq 15$ )	2,00	0,43	0,59	3,10
Retardér ( $> 0,5; \leq 0,6$ ), Popílek ( $> 15; \leq 30$ )	2,10	0,72	0,88	3,40
Retardér ( $> 0,5; \leq 0,6$ ), Popílek ( $> 30$ )	2,80	0,87	1,60	5,00
Retardér ( $> 0,6$ ), Popílek ( $\leq 15$ )	2,00	0,26	0,22	0,95
Retardér ( $> 0,6$ ), Popílek ( $> 15; \leq 30$ )	2,10	1,10	1,10	3,30
Retardér ( $> 0,6$ ), Popílek ( $> 30$ )	2,10*	1,10	0,97	4,00
Popílek ( $\leq 15$ ), Superplastifikátor ( $\leq 5$ )	0,32	0,71	0,55	1,71
Popílek ( $\leq 15$ ), Superplastifikátor ( $> 5$ )	0,32*	0,55	0,92	2,30
Popílek ( $> 15; \leq 30$ ), Superplastifikátor ( $\leq 5$ )	0,50	0,90	0,82	1,25
Popílek ( $> 15; \leq 30$ ), Superplastifikátor ( $> 5$ )	0,50*	0,80	0,80	2,81
Popílek ( $> 30$ ), Superplastifikátor ( $\leq 5$ )	0,63	1,38	0,00	1,20
Popílek ( $> 30$ ), Superplastifikátor ( $> 5$ )	0,63*	0,95	0,76	3,11
Superplastifikátor ( $\leq 5$ ), mikrosilika ( $\leq 8$ )	6,00	2,80	0,29	0,21
Superplastifikátor ( $\leq 5$ ), mikrosilika ( $> 8$ )	3,00	0,96	0,26	0,71
Superplastifikátor ( $> 5$ ), mikrosilika ( $\leq 8$ )	8,00	1,95	0,00	1,00
mikrosilika ( $\leq 8$ )	1,90	0,47	0,00	1,20
mikrosilika ( $> 8$ )	2,60	0,82	0,00	1,20
mikrosilika ( $> 18$ )	1,00	1,50	5,00	1,00
provzdušňovací přísada ( $\leq 0,05$ )	2,30	1,10	0,28	0,35
provzdušňovací přísada ( $> 0,05$ )	0,44	4,28	0,00	0,36
plastifikátor ( $\leq 2$ )	0,50	0,38	0,00	1,90
plastifikátor ( $> 2; \leq 3$ )	6,00	0,45	1,51	0,30
plastifikátor ( $> 3$ )	2,40	0,40	0,68	1,40
*pouze předpokládaná hodnota				

Uvedené predikční modely a jejich konkrétní průběhy v čase budou předvedeny v experimentální části v rámci vzájemného porovnání. Následně budou využity ke srovnání s naměřenými údaji smršťování vzorků vybraných receptur. Již nyní lze očekávat, že vzhledem k použití příměsí a absenci kameniva, bude nejvíce vystihující matematický model B4. Model B4 je totiž jediný, který umí zohlednit velmi nízký podíl kameniva v betonu a v provedeném experimentu byly využity vzorky pouze s obsahem cementové malty a příměsí. V případě vzorku s mikrosilikou bude také zajímavé srovnání s predikčním modelem ČSN EN 1992-2, který do predikce smršťování zavádí vliv křemičitého úletu.

## 2.4 PŘÍMĚSI DO BETONU

### 2.4.1 INERTNÍ PŘÍMĚSI

#### 2.4.1.1 BAREVNÝ PIGMENT

Pigment je látka, která má po rozptýlení ve vhodném prostředí schopnost barvit. Mezi vhodné prostředí pro rozptýlení barevného pigmentu patří alkalické prostředí, takové prostředí se nachází právě v čerstvém betonu a to především díky přítomnosti hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Z hlediska chemie můžeme barevné pigmenty rozdělit na organické a anorgatické. Mezi organické pigmenty patří například ultramarín, ftalocyanin nebo uhlík (saze). Silně alkalické prostředí má vliv na organické látky, které za přítomnosti vlhkosti rozkládá, což v praxi znamená, že konstrukce už za 1 rok významně ztratí svůj barevný odstín vyblednutím. Vhodnějšími jsou pigmenty anorgatické, mezi které řadíme např. oxidy kovů nebo uhlík. Dávkování pigmentů je obvykle do 5 % hmotnosti cementu, při vyšších dávkách se již intenzita barvy příliš nezlepšuje a zároveň výrazněji ovlivňují konzistenci čerstvého betonu a snižují výslednou pevnost. Zejména pak při použití tekutých pigmentů je třeba zohlednit ztekucení v celkovém vodním součiniteli. Obecně platí, čím vyšší vodní součinitel, tím světlejší je finální barva betonu. Mezi další faktory, které ovlivňují kvalitu a stálost barevného odstínu patří doba míchání betonu, intenzita ultrafialového záření, množství srážek, nadmořská výška atd.

[27] [29]

#### 2.4.1.2 JEMNĚ MLETÉ KAMENIVO

Jemně mleté kamenivo se používá v recepturách vysokopevnostních betonů, kde plní funkci mikroplniva. Jedná se o velmi jemné částice (do 0,125mm), které působí jako filler mezi hrubšími zrny kameniva. Optimální poměr jemných frakcí lze stanovit vážením zvibrované směsi, která má mít co největší hmotnost. Jako mikrokamenivo se používá mikromletý vápenec, čedičový nebo granodioritový prach, křemenná moučka a nově se začínají zkoušet i mikroplniva nanokompozity s mikrovlákný. Množství mikroplniva závisí na skladbě zrnitosti hrubších frakcí kameniva [31].

## 2.4.2 LATENTNĚ HYDRAULICKÉ PŘÍMĚSÍ

Receptury vysokohodnotného betonu v současné době obsahují minerální příměsi pucolánových vlastností bohaté na obsah amorfního<sup>3</sup> oxidu křemičitého. Mezi tyto příměsi patří například popílek, vysokopecní struska, metakaolin a křemičité úlety označované také jako mikrosilika. Zatímco metakaolin je získáván pálením kaolinových jílu, mikrosilika, popílek a struska jsou získávány z odpadů průmyslového provozu. Společnou vlastností těchto příměsí je schopnost tvorby CSH gelů za přítomnosti vody a cementu. Vzniklé CSH gely mají stejný charakter jako hydratační produkty portlandského cementu. V následujících kapitolách jsou výše uvedené příměsi podrobněji představeny.

Na jednotlivé příměsi jsou normou kladeny požadavky na některé vlastnosti. Jsou jimi například omezení na množství síranů a chloridů, požadavky na ztráty žíháním nebo předepsaná pevnost v určité době životnosti mladého betonu, označováno jako index účinnosti. Vyšší obsah síranů může ohrozit trvanlivost konstrukce vlivem síranové koroze, kdy oxidy síranů reagují s hydratovanými kalciumalumináty zhydratované cementové pasty za tvorby nového ettringitu. Na rozdíl od plastického stavu raného betonu, se ve zatvrdlém betonu již projevuje objemový nárůst výsledného produktu (ettringitu), což vede k roztrhání betonové konstrukce. Omezení chloridů v betonu norma předepisuje z důvodu účasti chloridů na korozi výztuže betonu v přítomnosti vody. Podrobnější požadavky jsou dány pro popílek normou ČSN EN 450-1, pro křemičitý úlet platí norma ČSN EN 13263-1 + A1, pro vysokopecní strusku předepisuje požadavky norma ČSN EN 15167-1 + A1. Metakaolin nemá požadavky stanovené normou, ale jsou zohledněny již v rámci samotné výroby.

### 2.4.2.1 METAKAOLIN

Metakaolin je reaktivní pucolán tvořen kalcinací čistého kaolinitu (jílový minerál, který obsahuje hornina kaolin) za teploty 600–800 °C, při které se odpařuje chemicky vázaná voda a mění se krystalická struktura za vzniku amorfního aluminosilikátu (hlinitokřemičitan). Dle původu můžeme metakaolin rozdělit na dvě kategorie. První je přímo organického původu, můžeme ho najít např. v okolí Říma nebo na ostrově Santorini v Řecku. Druhého původu jsou brány všechny ostatní anorganické materiály ať už přírodní nebo umělé, které

---

<sup>3</sup> Amorfní látky – látky v pevném skupenství, které nemají pravidelnou strukturu. Uspořádání částic je v těchto látkách náhodné. Opakem jsou látky tvořené krystalizací.

v kontaktu s vodou, díky reakci s hydroxidem vápenatým, nabývají pojivě vlastnosti. Ve srovnání s cementem, jehož jemnost mletí se pohybuje od 250 do 400 m<sup>2</sup>/kg, je na tom metakaolin lépe s velikostí zrna, které je až 10x menší [8].

Mezi výhodné vlastnosti metakaolinu kromě toho, že jeho přidáním snižujeme spotřebu cementu, který je velmi náročný na energetickou spotřebu, patří významné ovlivnění difuzivity, což znemožňuje průchod sodných a chloridových iontů. Reakce s hydratačními produkty cementu jako je např. portlandit, příznivě ovlivňuje strukturu na mikroúrovni cementové matrice. Díky tomu ubývá kapilárních pórů a mikrotrhlin, které otevírají cestu agresivním látkám do vnitřní struktury betonu a díky úbytku volné vody v pórech dochází ke zvýšení trvanlivosti, protože je tím snížen vliv opakovaného zmrazování a rozmrazování vody v konstrukci. Další charakteristickou vlastností metakaolinu je např. velmi světlá barva, která je atraktivní pro architekty, kteří navrhují stavby z pohledového betonu. Nevýhodou je velmi negativní vliv na zpracovatelnost směsi a nutnost použití superplastifikátorů, např. při 10 % náhradě cementu metakaolinem je potřeba minimálně 2 % superplastifikátoru, aby bylo dosaženo obdobné tekutosti jako bez použití metakaolinu. Použití této příměsi je také spojeno s vývinem vysokého množství tepla během hydratování obsažených složek [8].

V kombinaci s nízkým vodním součinitelem metakaolin přináší mírné zlepšení mechanických vlastností oproti jemnozrnným betonům bez příměsí, zejména tlakovou a tahovou pevnost. Pokud k tomuto složení přidáme superplastifikátor, rapidně snížíme celkovou pórovitost vzorku a dosáhneme velmi dobrých pevností v tahu i tlaku [18].

Metakaolin se ve stavebním odvětví osvědčil nejen jako příměs do betonu, ale také se objevuje v suchých omítkách, ve štuky, působnost si našel také v protipožárních nátěrech či pěnách, dále to můžou být obkladové prvky, žáruvzdorné materiály, a dokonce i malířské nátěry. Pro zlepšení mechanických vlastností či tepelně technických vlastností se přidává také do vápenných omítek.

Oproti ostatním příměsím je metakaolin ekonomicky znevýhodněn dražší výrobou a jen těžko dokáže konkurovat příměsím získávaných z odpadu průmyslového provozu. Na druhou stranu v České republice není o kaolin nouze a cenu tím pádem kompenzuje krátká přepravní vzdálenost.

#### 2.4.2.2 POPÍLEK

Elektrárenským popílkem jsou malé prachové částice zachytávané v elektrostatických odlučovačích tepelných elektrárn nejčastěji spalujících uhlí nebo antracit. Působením elektrostatického pole obdrží částičky popílku záporný náboj a jsou přitahovány k opačně nabitým elektrodám, odkud jsou hromadně setřeseny do výsypky, takový popílek označujeme jako fluidní. Do kategorie fluidních popílků zařazujeme také ložový popílek, který při spalování uhlí propadá roštem. Ložový popílek vyniká svými hydraulickými vlastnostmi a má schopnost tvrdnout již za přítomnosti samotné vody. Druhá kategorie zahrnuje vysokoteplotní popílek. Zatímco těkavé látky a uhlík jsou při vysokých teplotách v peci spáleny, jíly, křemen a živec se roztaví, poté jsou zachyceny a přesunuty do zóny s nižší teplotou, kde opět ztuhnou. Tyto odpadní produkty mají pucolánové vlastnosti a pozitivně ovlivňují vlastnosti betonu. Z hlediska tvaru převažují částice plného kulovitěho tvaru na jejímž povrchu je sklo. Někdy jsou však tyto koule duté a obsahují další částice uvnitř. Velikost je často o něco menší než částice portlandského cementu.

Chemické, mineralogické a granulometrické složení popílku se liší v závislosti na spalovacím systému elektrárny a nečistot v něm obsažených. Existuje několik způsobů, jak popílek získat a několik druhů surovin, které se spalují. Kvůli regulaci síranů ve spalinách se také často k uhlí nebo lignitu přidává vápenec a to zvyšuje obsah vápníků ze síranu vápenatého. Co se týká složení, je popílek velmi rozmanitou příměsí. Před použitím popílku jako příměsi do betonu je proto potřeba pečlivě ověřovat jeho vlastnosti. Platí, že čím více obsahuje popílek skelné fáze, tím lepší vykazuje pucolánovou aktivitu.

Podle ASTM C618 lze popílek rozdělit na dvě kategorie. Třídu F, která zahrnuje popílek získaný spalováním antracitu a černého uhlí a třídu C obsahující popílek produkovaný během spalování hnědého uhlí nebo lignitu. Tyto dvě třídy se liší především v obsahu CaO, kde třída C disponuje těmito oxidy až trojnásobně větším množstvím. Hlavním rozdílem mezi jednotlivými třídami je dán součtem oxidů křemíku, hliníku a železa. V případě, že se součet oxidů pohybuje do 70 % klasifikujeme to jako třídu F a do 50 % jako třídu C. Ve stavebnictví se používá častěji popílek z černého uhlí (třída F). V literatuře můžeme také najít rozdělení v závislosti na tom, zdali se popílek aktivně zúčastňuje hydratace či nikoliv. Pro tento účel existuje třída I a II, kde třída I náleží inertním příměsím a do třídy II spadají popílky s pucolánovou aktivitou. [10] [15]

Použití popílku s sebou samozřejmě přináší pozitivní i negativní vlastnosti. Například díky kulatému tvaru částic má mimo jiné velmi dobrý vliv na zpracovatelnost a čerpatelnost čerstvého betonu. Popílek se často používá pro masivnější konstrukce, protože snižuje hydratační teplo a tím se snižuje počet trhlinek mladého betonu. Nevýhodou použití popílku je pomalá reaktivita s ostatními produkty, což v důsledku znamená nízký nástup předepsané pevnosti. V minulosti bylo provedeno již několik experimentů, které měly za cíl zrychlit počáteční chemické reakce. Jedním z nich bylo například mletí popílku za mokra, což přineslo celkem příznivé výsledky. Přidáním popílku se také snižuje hloubka karbonatace, snižuje se objemová deformace od smrštění a za snížení vodního součinitele se oproti běžnému cementu zvyšuje pevnost mnohem rychleji. Popílek může také obsahovat uhlík, což vede ke ztrátě vzduchu v betonu a snížení odolnosti proti cyklickému působení mrazu. [10] [15]

S využitím popílku se mimo betonové konstrukce můžeme setkat při výrobě dlažby, chodníků nebo je použitý jako filler do asfaltových výrobků. Dále se s popílkem můžeme setkat u izolačních obsypových materiálů nebo jiných zásypů a je aktivní složkou různých maltovin.

#### 2.4.2.3 KŘEMIČITÝ ÚLET

Křemičitý úlet je odpadem některých hutnických provozů zabývajících se výrobou křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku. Křemík se vyrábí v obloukové elektrické peci, kde je křemen redukován za přítomnosti paliva, čímž vznikají plynné fáze křemíku, které se následně ochlazují, v důsledku čehož kondenzují, a nakonec oxidují do formy jemných sklovitých částic oxidu křemičitého, již známého z oblasti stavebního inženýrství. Specifickou vlastností mikrosiliky je velký měrný povrch a výborné pucolánové vlastnosti. Obsahují 80 - 98 % amorfního  $\text{SiO}_2$  (silika), proto křemičitý úlet často najdeme pod označením mikrosilika.

Extrémní jemnost mikrosiliky s sebou nese jednak zvýšenou potřebu množství vody o 1 litr na 1 kg křemičitých látek a jednak v kombinaci se superplastifikátorem, který dokáže dokonale rozptýlit částice mikrosiliky mezi zrna cementu, perfektně vyplňuje zbývající mezery na mikroúrovni struktury cementové matrice. Při správném složení betonu díky tomu také téměř zcela mizí tranzitní zóna<sup>4</sup> v cementovém kameni, CSH gel je potom spolu s kamenivem zcela kompaktní. Jedna částice mikrosiliky je velká přibližně 100 nm, což je pro představu

---

<sup>4</sup> Tranzitní zóna – oblast v mikrostruktuře betonu mezi CSH gely a kamenivem. Vzniká v důsledku hromadění vody v blízkosti kameniva a patří mezi zranitelné oblasti betonu (zárodek trhliny).

zhruba 1000x méně než průměr lidského vlasu. Při vyšších dávkách mikrosiliky může být velký problém vodní součinitel, pokud je vody v cementové směsi nedostatek, vytváří se velké póry uvnitř cementového kamene v důsledku nízké zpracovatelnosti a znemožnění řádného zhutnění. Obecně se přidáním křemíku velmi zlepšuje pevnost, proto se používají především pro vysokohodnotné betony. Dále zvyšují odolnost betonu, což se projevuje snížením propustnosti a snížením rychlosti karbonatace betonu. Vzhledem k tomu, že křemičitý úlet díky své jemnosti velmi rychle reaguje s hydroxidem vápenatým, redukuje nejenom množství pórů, ale i množství samotného hydroxidu vápenatého, který snižuje chemickou odolnost betonu. Dále také vědci prokázali, že vysokopevnostní betony obsahující mikrosiliky zvyšují odolnost kameniva vůči alkalicko-křemičité reakci a difuzi chloridů [7] [10] [15].

S mikrosilikou se můžeme setkat ve dvou podobách, je dodávána buď jako prášek nebo jako řídká suspenze. Kašovitá suspenze je lepší především z hlediska nebezpečí vdechnutí extrémně malých částic mikrosiliky a následných zdravotním problémům dýchacích cest.

#### 2.4.2.4 MLETÁ GRANULOVANÁ VYSOKOPECNÍ STRUSKA

Vysokopecní struska je vedlejší produkt výroby železa. Vzniká při reakci vápence s materiály bohatými na  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které se nacházejí v rudě nebo v koksu. K získávání strusky se využívá její nízké objemové hmotnosti oproti železu. Struska vždy plave nad povrchem roztaveného železa a tím pádem mohou být tyto dvě složky od sebe jednoduše odděleny. Pro získání požadovaných hydraulických vlastností nesmí rozžhavená směs pozvolna chladnout (taková struska může být využita pouze jako plnivo betonu), ale musí dojít k, tzv. hašení. Hašení může probíhat různými způsoby, například prudkým zchlazením ve vodním bazénu, pod tekoucí vodou ihned po vypuštění z pece (granulovaná struska) nebo je ochlazována střídavě vodou a vzduchem (peletizovaná struska). Tímto způsobem dostává struska sklovitý charakter a vlastnosti latentně hydraulického materiálu, který je svým chemickým složením velmi podobný portlandskému cementu. Na rozdíl od ostatních příměsí (především popílků) má struska téměř neměnné složení. [15]

Granulovaná struska je schopna reagovat podobným způsobem jako cement, hlavní aktivní složkou při hydrataci je  $\text{C}_2\text{S}$  (belit). Čím víc strusky čerstvá cementová směs obsahuje, tím více se prodlužuje doba tuhnutí z toho vyplývá, že zpomaluje vývin hydratačního tepla. Vysokopecní struska má dále povětšinou stejné účinky jako ostatní příměsí – zvyšuje ohybovou

pevnost, vyšší jemnost mletí zajišťuje nižší pórovitost a propustnost pro škodlivé látky, zlepšuje se zpracovatelnost a nedochází k segregaci betonu v takové míře jako u obyčejného betonu bez příměsí.

#### 2.4.2.5 SHRNUTÍ PŘÍMĚSÍ

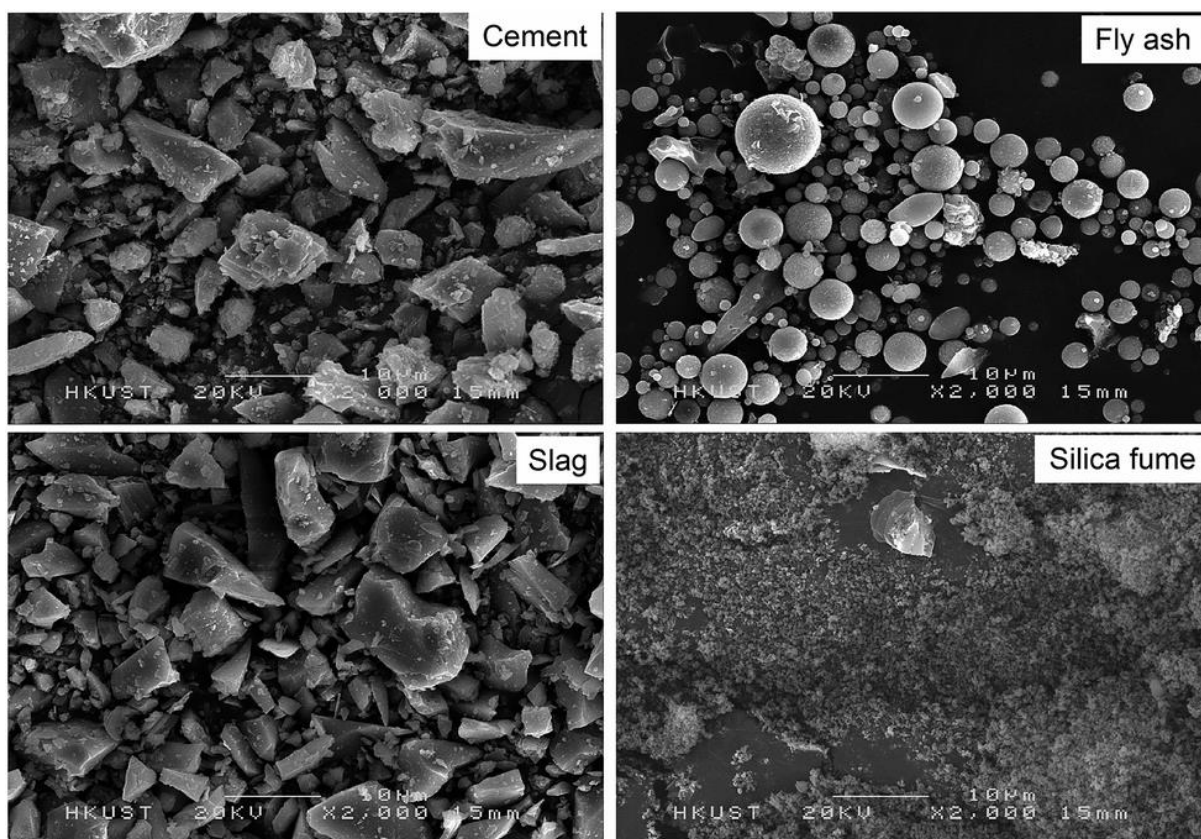
Typické chemické složení a základní vlastnosti jednotlivých latentně hydraulických příměsí jsou přehledně uspořádány v Tab. 2.13. Můžeme zde vidět vyšší obsah CaO v případě popílků a vysokopecní strusky. Větší obsah CaO ve srovnání s příměsemi s nízkým obsahem vápníku vede k rychlejšímu nárůstu pevnosti. Procentuální pevnost, kterou vysoce vápnité cementové směsi získávají už po 7 dnech se u nízko vápnitých směsí protahuje až na 28denní stáří betonu. Směsi s vysokým podílem vápníku nejsou vhodné pro konstrukce z předpjatého betonu. Koeficient  $k$  slouží ke korekci vodního součinitele, ve kterém je zohledněna spotřeba vody k hydrataci dané příměsí a je stanoven normou ČSN EN 197-1 ed.2. Další shodnou vlastností popílků a granulované strusky je zlepšování pevnosti betonu v tahu, zatímco ostatní vylepšují spíše pevnost tlakovou.

U metakaolinu a mikrosiliky jsme schopni dosáhnout velmi vysoké jemnosti mletí. Má to přínos především na snížení segregace, pórovitosti a odolnosti betonu vůči korozím různého druhu, chráněno je díky tomu jak kamenivo, tak ocelová výztuž betonu. Mikrosilika předčí všechny ostatní příměsi svou extrémně rychlou pucolánovou aktivitou, ale za její pořízení je třeba vynaložit vyšší náklady. Často však i přes vyšší cenu betonu na 1 metr krychlový je v konečném součtu dosaženo významných úspor, díky dosažení stejných pevností za menší velikosti průřezu konstrukčních prvků. Mikrosilika má také oproti ostatním horší zpracovatelnost při stejném vodním součiniteli a nepodílí se na snižování tepla při hydrataci. Všechny příměsi snižují segregaci, propustnost chemických látek způsobujících alkalicko-křemičité reakce, síranové koroze, srážení solí, zlepšují soudržnost a jejich používání chrání životní prostředí. Kromě vysokopecní strusky byl prokázán příznivý vliv na tvorbu trhlin.

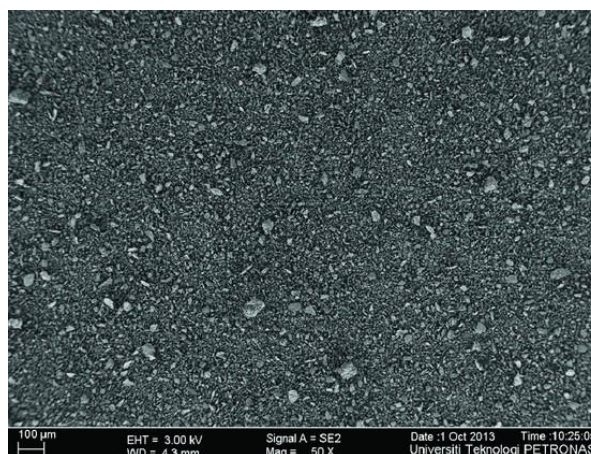


Tab. 2.13 - Porovnání základních vlastností příměsí

	<i>portlandský cement</i>	<i>metakaolin</i>	<i>popílek</i>	<i>mikrosilika</i>	<i>struska</i>
<b>jemnost mletí [m<sup>2</sup>/kg]</b>	250 - 400	12 000 - 15 000	300 - 500	15 000 - 25 000	400 - 700
<b>obsah SiO<sub>2</sub></b>	22 %	51 - 58 %	36 - 60 %	87 - 94 %	25 - 45 %
<b>obsah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5 %	39 - 42 %	18 - 30 %	< 1 %	5 - 18 %
<b>obsah CaO</b>	65 %	< 1 %	4 - 20 %	< 1 %	30 - 50 %
<b>cena [kč/kg]</b>	2 - 4	85 - 105	4 - 8	15 - 20	15 - 25



Obr. 2.6 – Mikrostruktura příměsí a cementu (10μm) [33]



Obr. 2.7 - mikrostruktura metakaolinu 100μm [36]

## 2.5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SMRŠŤOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

### 2.5.1 VLIV TECHNOLOGIE VÝROBY

Vliv ošetřování platí především pro vysokohodnotné betonové konstrukce s nízkým vodním součinitelem. V určitém stavu hydratace dochází k úplnému spotřebování vody obsažené v původní směsi a pro zhydratování dalších cementových zrn je potřeba dodat vodu z vnějšího zdroje, v některých případech i několikadenním ošetřováním povrchu tuhnoucího betonu. Díky tomu, že se dostaví další zhydratování slínkových minerálů, vyplní se většina zbývajících pórů a to má za následek potlačení objemových změn. Jedná se o případy, kdy se vodní součinitel pohybuje okolo hodnoty 0,3, v takovém případě je omezeno smršťování od vysychání na úplné minimum.

Alternativně si můžeme pomoci také přidáním kameniva, které je nasáknuté vodou. Pro tento účel se většinou používá jiný typ agregátu, který je poréznější a lehčí. Při hydrataci je možné čerpat vodu obsaženou v pórech kameniva. Tento způsob eliminuje množství kapilárních pórů v hydratující cementové pastě, což má vliv na objemové změny, jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci. Avšak dutiny porézního kameniva zůstanou prázdné, kde působící síly nemají dostatečnou sílu na to, aby překonaly tahovou pevnost kameniva a tím pádem ke smršťování betonového prvku nedochází.

Pokud však nedojde k řádnému ošetření může dojít k znehodnocení konstrukce, její vlastnosti nebudou odpovídat předepsané těm v návrhu projektanta či technologa betonárky. Konstrukce nejenom že nebude mít požadovanou pevnost, ale v důsledku extrémního množství vzniklých trhlin napříč celým průřezem, bude zcela propustná a její životnost se sníží o několik desítek let. Bohužel v dnešní době se v praxi často setkáváme, s tím že menší prováděcí stavební firmy tuto podstatnou část při realizaci betonových konstrukcí velmi zanedbávají a popraskané stěny v novostavbách jsou častou a nepříjemnou záležitostí, kterou musí noví majitelé nemovitostí řešit, na druhou stranu u větších stavebních firem má stavební dozor již lepší zkušenosti.

## 2.5.2 VLIV PŘÍMĚSÍ DO BETONU

V domácí ani zahraniční literatuře se nepodařilo najít výzkum podobného charakteru, kde by byl navzájem porovnán vliv vybraných příměsí na smršťování cementové matrice. Z tohoto důvodu byly vybrány dílčí studie s jednotlivými příměsmi. Tyto studie mají za úkol udělat představu o tom, jakou mírou se jednotlivé příměsi na smršťování podílejí.

### 2.5.2.1 METAKAOLIN

Jak už bylo zmíněno metakaolin během hydratace dokáže vyvinout mnohonásobně vyšší teploty než samotný portlandský cement. I přesto z výzkumů plynou závěry, že čím vyšší náhrada cementu metakaolinem, tím více se snižuje autogenní smrštění. Tento fakt je vysvětlen tak, že metakaolin se používá v kombinaci se superplastifikátory a jejich použití rychlost hydratace naopak snižuje. Např. v experimentu dle [22], kde byly zkoušeny válce o rozměrech 76 x 267 mm s vodním součinitelem 0,28, poměrem a/c cca 4,4, obsahem superplastifikátoru 3,5 % a průměrnou teplotou 20 °C se autogenní smršťování po 24 hod pohybovalo od 221  $\mu\text{m}/\text{m}'$  do 271  $\mu\text{m}/\text{m}'$  a celkové autogenní smršťování vyšlo v rozmezích od 516  $\mu\text{m}/\text{m}'$  do 713  $\mu\text{m}/\text{m}'$  v závislosti na množství použitého metakaolinu od MK 15% do MK 5%.

V souvislosti se smršťováním od vysychání bylo několikrát prokázáno, že oproti portlandskému cementu vykazuje metakaolin menší objemové změny. V experimentu dle [22] bylo změřeno, že již 5% náhrada cementu metakaolinem dokáže snížit smrštění, a to až o padesát procent. Je to dáno tím, že většina vody je spotřebována během hydratace a tím pádem k odpařování jí už příliš mnoho nezbývá. Rozdíl mezi cementy s vyššími dávkami metakaolinu, ve srovnání se vzorky s 5 % náhradou cementu, již není tak výrazný. Pro ilustraci v případě zmiňované MK 5 % bylo celkové smrštění od vysychání rovno 228  $\mu\text{m}/\text{m}'$ . Vždy však záleží na vlhkosti a teplotě prostředí, vodním součiniteli, době ošetřování apod.

Ve výzkumu dle [23] byly zkoušeny hranoly o rozměrech 75 x 75 x 285 mm. Vodní součinitel zde byl stanoven na hodnotu 0,4, poměr a/c byl roven 5 přičemž experiment byl prováděn v prostředí laboratoře. Smršťování od vysychání zde vyšlo 0,066 % pro náhradu cementu 5 % a 0,043 % pro 20 % náhradu cementu, což odpovídá 188  $\mu\text{m}/\text{m}'$  pro první případ a 123  $\mu\text{m}/\text{m}'$  pro případ druhý.

### 2.5.2.2 POPÍLEK

V řadách technologů je obecně známo, že popílek (dále jen FA – fly ash) má příznivý vliv na objemové změny, díky pomalejšímu průběhu hydratace. Níže budou uvedeny potvrzující studie o tom, že tento předpoklad platí a další postřehy ve vybraných výzkumech.

V experimentu dle [24] byly prováděny zkoušky samozhutnitelného betonu s různou náhradou FA na válcích o rozměrech 75 x 275 mm s vodním součinitelem průměrně 0,3, s proměnným poměrem a/c od 3 do 5,7, obsahem plastifikátorů v rozmezí hodnot 1,8 - 3,3 %, teplotou v rozmezí 25–32 °C a relativní vlhkostí v rozmezí 70–80 %. Měření probíhalo pro tři různé směsi, které se od sebe lišily procentuální náhradou FA – 35%, 55% a 65%. Výsledky autogenního smršťování 90. den od vybetonování u FA35 dosahovaly hodnoty 550  $\mu\text{m}/\text{m}'$  a u vzorku s největším zastoupením popílku to byla téměř poloviční hodnota – 310  $\mu\text{m}/\text{m}'$ . Poměrné přetvoření od smrštění z vysychání dosahovalo vzhledem k vysoké vlhkosti v místnosti poměrně vysokých hodnot a to 960  $\mu\text{m}/\text{m}'$  pro FA35 a 490  $\mu\text{m}/\text{m}'$  pro FA65.

Další studie autogenního smršťování a smršťování od vysychání byla zaměřena na popílek s náhradou 10%, 20% a 30%. Byť se jedná o geopolymery na bázi metakaolinu, výzkum ukazuje vliv popílku na objemové změny. Měření trvalo celkem 50 dní, probíhalo v interiéru s relativní vlhkostí 40–50 % a průměrnou teplotou 24 °C. Poměrné přetvoření bylo měřeno na vzorcích 20 x 20 x 80 mm s dobou ošetřování 24 hod. Výsledky autogenního smršťování na vzorcích FA10 resp. FA30 bez přítomnosti písku vyšlo 207  $\mu\text{m}/\text{m}'$  resp. 480  $\mu\text{m}/\text{m}'$  a deformace od vysychání vzorků byla zaznamenána 5713  $\mu\text{m}/\text{m}'$  resp. 4130  $\mu\text{m}/\text{m}'$ . Pro srovnání byly vyrobeny také vzorky obsahující písek při stejných náhradách FA. V tomto případě se autogenní smršťování na vzorcích FA10 resp. FA30 zastavilo na hodnotách 137  $\mu\text{m}/\text{m}'$ , resp. 260  $\mu\text{m}/\text{m}'$  a smršťování od vysychání 2087  $\mu\text{m}/\text{m}'$ , resp. 1713  $\mu\text{m}/\text{m}'$ . Platí tedy pravidlo, čím vyšší náhrada FA, tím vyšší je výsledné smrštění a současně čím vyšší množství agregátu, tím nižší je deformace od smršťování. Poměrně vyšší smrštění od vysychání v prvním případě je zapříčiněno právě tím, že směs neobsahuje žádné kamenivo a ve druhém případě vzorky obsahují pouze písek pouze v poměru písek / pojivo rovno 1. V rámci tohoto experimentu můžeme také sledovat vliv pórovitosti, která negativním způsobem ovlivňuje smršťování. [25]

### 2.5.2.3 KŘEMIČITÝ ÚLET

Křemičitý úlet díky své jemnosti sice vytváří velmi pevný a kompaktní cementový kámen, avšak z hlediska smršťování vychází často v porovnání s ostatními přísadami podstatně hůře.

Například v literatuře [28] najdeme porovnání tří různých receptur. První dvě směsi jsou bez přísady provedené ve dvou variantách – jedna bez superplastifikátoru (SP) a vodním součinitelem 0,5, druhá včetně SP s w/b rovno 0,4, třetí směs charakterizující HCP beton obsahuje mikrosiliku a vodní součinitel je roven 0,32. Smrštění po 100 hodinách měření vyšlo v pořadí od nejvíce se smršťující po nejméně takto: cement s mikrosilikou, prostý cement včetně SP a prostý cement bez SP.

Výzkum publikovaný v článku [26] porovnával vliv vodního součinitele a mikrosiliky na autogenní a celkové smršťování. Pro měření autogenního smršťování byly použity trámečky o rozměrech 100 x 100 x 300 mm, pro celkové smršťování vzorky 100 x 100 x 400 mm. Konečné hodnoty odpovídají 98dennímu stáří vzorků, které byly vystaveny prostředí o průměrné teplotě 30 °C a vlhkosti 65 %. Úbytek vody byl kompenzován superplastifikátorem. Poměr a/c se pohyboval okolo 3,7. Výsledky jsou uvedené v Tab. 2.14.

Tab. 2.14 - Výsledky výzkumu [26]

w/c	SF-0%		SF-5%		SF-10%	
	AS	CS	AS	CS	AS	CS
0,26	197	279	266	272	282	298
0,30	180	305	218	288	274	346
0,35	40	391	215	343	251	344

\* AS – autogenní smršťování v  $\mu\text{m}/\text{m}'$

\* CS – celkové smršťování v  $\mu\text{m}/\text{m}'$

\* SF x% – mikrosilika a procentuální náhrada cementu

V článku [21] je mimo jiné vyrobena směs HSC charakterizující vysokopevnostní beton překračující pevnost 100 MPa. Jedná se o trámečky s absencí drátků s velmi nízkým vodním součinitelem (0,24) o rozměru 100 x 100 x 500 mm. Pro výrobu byl využitý rychle tuhnutí cement CEM I 42,5R. Poměr a/c je roven 2,5. Náhrada mikrosiliky za cement byla v tomto případě 15 % a nechyběla zde superplastifikační přísada pro zachování zpracovatelnosti směsi. Výsledky po 90 dnech vykazovaly smrštění vzorku o 622  $\mu\text{m}/\text{m}'$  a po 365 dnech o 804  $\mu\text{m}/\text{m}'$ .

## 2.6 VZNIKAJÍCÍ PROBLÉMY V DŮSLEDKU SMRŠŤOVÁNÍ BETONOVÉ KONSTRUKCE

V praxi se objevuje nesčetná řada příkladů, kdy jsou betonové konstrukce porušené právě objemovými změnami od smršťování. Vznikající trhliny v materiálech na bázi cementu narušují estetický vzhled a časem může dojít i k omezení jejich použitelnosti nebo únosnosti. Příkladem jsou podlahy v průmyslových halách či lité cementové potěry s možností vysychání pouze z jedné strany povrchu, dále cementobetonové silniční povrchy, vodonepropustné konstrukce, tzv. bílé vany či stropní desky a stěny vyšších tloušťek.

Při provádění podlahových desek je nutné dodržovat správné technologické postupy. Z hlediska smršťování jsou to především smršťovací spáry, které je nutné nařezat do 24 hodin od vybetonování desky a také ve vhodném uspořádání, nejčastěji v souladu s modulovými osami konstrukčního systému. V oslabených místech smršťovacími spárami sice umožníme výskyt trhlin, ale z estetického pohledu nebude konstrukce nikterak poškozena. Jiným způsobem, jak si poradit s trhlinami od smršťování je husté vyztužení podlahové desky. Tímto způsobem namísto velkých trhlin vzniká více trhlin malé šířky, která je z hlediska norem přípustná. Obecně je dáno, že v betonových konstrukcích nemůžeme vznik trhlin vyloučit, ale pouze omezit. Musíme bohužel respektovat fakt, že je to přirozená vlastnost silikátových materiálů na jejichž bázi je beton postaven. [30]

Při realizaci podlah v průmyslových halách se můžeme setkat s problémy zvedání rohů jednotlivých nařezaných smršťovacích polí v důsledku smršťování. Při horním povrchu probíhá odpařování vody mnohem rychleji než ve spodních částech podlahové desky a tím vzniká smykové napětí. Trhlina ve smršťovací spáře však může znemožnit přenos posouvající síly z jednoho pole na druhé a tím dochází k přizvednutí horních krajů smršťovacího pole. Tyto nerovnosti často nejsou viditelné pouhým okem, ale představují problémy pro rychle se pohybující zařízení při provozu průmyslových hal. Pro eliminaci těchto poruch často nestačí pouhý drátkobeton, je nutné mezi jednotlivé smršťovací pole osadit trny. [30]

S mnoha problémy v souvislosti se smršťováním se setkáváme při realizaci bílých van. *“Bílé vany slouží jako hydroizolační bariéry proti pronikání spodní vody nebo zemní vlhkosti do interiéru a jejich návrh musí přihlídnout k mechanismům transportu vody betonem. Při návrhu bílé vany je třeba se důkladně zabývat stanovením limitní šířky trhliny, návrhem vyztuže na uvažovanou šířku trhliny, utěsněním dilatačních, řízených a pracovních prostupů, postupem*

*výstavby a kvalitou betonu. Vznik trhlin v bílé vaně je nejvíce zapříčiněn chladnutím konstrukce po jejím ohřátí při vývinu hydratačního tepla, prudkým smršťováním v raném stáří nebo omezenou deformací.“ [13]*

Některé příměsi mohou ovlivnit také pevnosti v tahu. V případě materiálů na bázi cementu, které se nepoužívají v kombinaci s drátovou nebo jinou výztuží, která by vnitřní pnutí od vysychání zachytila, je tento faktor rozhodující. Například cementové omítky nebo lité podlahy mají po estetické stránce přísné požadavky a jakýkoliv výskyt trhlin není připuštěn.

I proto je velmi důležité vliv různých příměsí na smršťování testovat. O jeden malý příspěvek k této problematice se pokusím následujícím experimentem.

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 CÍL EXPERIMENTU

Cílem této experimentální práce je výroba cementových vzorků určených pro měření smršťování od vysychání. Jedná se o vzorky s různými latentně hydraulickými přísadami, které jsou dnes v praxi velmi často používány zejména do vysokohodnotného betonu, ale i dalších materiálů na bázi cementu jako jsou omítky, cementové lité potěry, různé druhy nátěrů apod. Pro tento experiment byly vybrány přísady – mikrosilika, metakaolin a elektrárenský popílek. Pro porovnání byl také vyroben referenční vzorek, který je složen pouze z cementu a vody. Pro každou přísadu 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 % a danou recepturou. Smršťování bylo měřeno po dobu 280 dní v sestupné frekvenci v souladu s ubývajícím přírůstkem smrštění vzorků.

Dále byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a také zkoušky pevnosti v tlaku – jednou po 28 dnech od vybetonování vzorků a podruhé po ukončení měření smršťování, tj. 280 dní po vybetonování vzorků. Výsledky pevností jsou mezi sebou detailně porovnány. V této části budou také představeny problémy, se kterými jsem se během experimentální práce potýkal. Budou zde uvedeny možné chyby měření a jiné vlivy, které mohou celé měření zásadně ovlivnit a také popsán můj postoj k této problematice.

V poslední části této práce jsou ukázány průběhy smršťování z celého experimentu včetně vzájemného porovnání. Dále jsou zde porovnány průběhy smršťování jednotlivých matematických modelů, které byly detailně představeny v teoretické části. Průběhy z predikčních modelů na smršťování budou demonstrovány na typických konstrukčních prvcích používaných v praxi. Nakonec je provedeno porovnání naměřených dat s hodnotami, které uvádí výpočetní predikční modely. Závěrem by měla být odpověď na otázku, zdali je možné použít současné predikční modely i pro cementové směsi s vysokou náhradou cementu. Předmětem je také sledování smršťování na materiálech, které neobsahují žádné kamenivo a rovněž tak přispět malým dílem k tomuto hodně diskutovanému problému betonových konstrukcí.



## 3.2 RECEPTURY

Jak již bylo výše uvedeno, výroba byla rozdělena do dvou sad, podle množství náhrady cementu. Konkrétně v první sadě byly vyrobeny vzorky s dvacetiprocentní náhradou cementu s příměsemi popílek, mikrosilika a metakaolin. Spolu s první sadou byl vyroben také referenční vzorek obsahující pouze cement. Ve druhé sadě o týden později byly vyrobeny vzorky s padesátiprocentní náhradou cementu se stejnými druhy příměsí. Vodní součinitel pro obě sady byl zvolen 0,40. Detailní přehled receptur je uveden v Tab. 3.1

Tab. 3.1 - Receptury vzorků

RECEPTURY VZORKŮ							
komponenty	REF	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
obsah cementu [kg/m <sup>3</sup> ]	1375	1118	874	1164	946	1030	738
obsah příměsí [kg/m <sup>3</sup> ]	-	223,6	437	155+77*	315+157*	206	369
obsah kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-
obsah vody [kg/m <sup>3</sup> ]	550	536,6	524,4	502,8	454,1	576,8	649,4
vodní součinitel [-]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
korekční součinitel <i>k</i>	-	1,0	1,0	0,4	0,4	2,0	2,4**

\* příměs popílků tvoří směs, složená ze dvou kategorií – S1 a S2+S3. Kategorie S1-S4 rozlišují popílků na základě frakce. Odlišná granulometrie je způsobena tím, že se jednotlivé popílků odebírají z různé části filtru. Frakce odpovídají následujícím velikostem zrna: S1 (>45 μm), S2 (25 to 45 μm), S3 (15 to 25 μm) a S4 (5 to 15 μm) [32]

\*\* úprava korekčního součinitele je podrobně popsána v kapitole 3.3.3

Přehled použitých druhů jednotlivých složek objemových hmotností, které byly uvažovány pro návrh receptury jsou shrnuty v Tab. 3.2

Tab. 3.2 - specifikace složek vzorků

složka	druh	objemová hmotnost	
cement	42,5R - mokrá	3050	[kg/m <sup>3</sup> ]
metakaolin	Mefisto L05	2300	[kg/m <sup>3</sup> ]
popílek	S1, S2+S3	2000	[kg/m <sup>3</sup> ]
mikrosilika	Silika SK	2400	[kg/m <sup>3</sup> ]

Postup výpočtu jednotlivých složek cementového tmele dle normy ČSN EN 206+A1 [1]:

Množství příměsi je určeno zadáním, tj. 20 % resp. 50 % hmotnostní náhrada cementu a je dáno vztahem (3.1):

$$m_p = p * m_c \quad (3.1)$$

kde,

$p$  ... je procentuální náhrada cementu, v %

$m_c$  ... je množství cementu, v  $\text{kg.m}^{-3}$

$m_p$  ... je množství příměsi, v  $\text{kg.m}^{-3}$

Množství vody v cementovém tmelu je určeno ze vztahu (3.2)

$$m_v = (m_p * k + m_c) * w \quad (3.2)$$

kde,

$m_v$  ... je množství vody, v  $\text{kg.m}^{-3}$

$k$  ... součinitel náležitosti dané příměsi

$w$  ... vodní součinitel

Kontrola vodního součinitele je vypočtena dle vztahu (3.3):

$$\frac{w}{b} = \frac{m_v}{m_c + k * m_p} \quad (3.3)$$

Množství cementu je určeno ze vztahu (3.4) absolutních objemů:

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 \quad (3.4)$$

kde,

$\rho_c$  ... je objemová hmotnost cementu, v  $\text{kg.m}^{-3}$

$\rho_v$  ... je objemová hmotnost vody, v  $\text{kg.m}^{-3}$

$\rho_p$  ... je objemová hmotnost příměsi, v  $\text{kg.m}^{-3}$

### 3.3 VÝROBA VZORKŮ CEMENTOVÉ PASTY

Jak již bylo zmíněno, výroba zahrnovala dvě sady vzorků lišící se procentuální hmotnostní náhradou cementu a datem výroby. Výroba vzorků byla realizována v laboratoři Stavební fakulty ČVUT na katedře betonových a zděných konstrukcí.

#### 3.3.1 POMŮCKY PRO BETONÁŽ

Během betonáže byly použity následující pomůcky: kádinka, stolní váha s přesností měření  $\pm 0,01$  g, lopatka, misky pro vážení vzorků, lžíce, elektrická kotoučová stolní bruska, šrouby průměru 6 mm, matky pro kotvení šroubů ve formě, nerezová mísa pro umíchání směsi ve stroji, malý míchací stroj, ocelové bednicí formy o přesných rozměrech 40 x 40 x 160 mm, tyto formy byly použity ve dvou provedeních - jednak s otvory pro šrouby a jednak plné bez otvorů (podrobněji v následující kapitole), dále olejnatý odformovací prostředek na vymazání bednicích forem, vibrační stroj pro zhutnění cementové směsi a pomůcky pro čištění forem po odbednění.



Obr. 3.1 – Laboratorní míchačka

#### 3.3.2 POSTUP VÝROBY

Nejprve byly postupně naváženy jednotlivé složky pro každou recepturu. Před samotným mícháním bylo potřeba dát dohromady ocelové bednicí formy s předvrtanými otvory pro osazení šroubů viz Obr. 3.4. Šrouby v následném měření smršťování sloužily



Obr. 3.2 - Zarovnání plochy dříku šroubů

ke kontaktu s měřícím zařízením – tímto se kontaktní plocha zmenšila a díky tomu byla minimalizována chyba měření. Pro ještě větší zpřesnění výsledků byl nerovný povrch dříku šroubů zabroušen pomocí elektrické brusky viz Obr. 3.2. Dále byly sestaveny bednicí formy bez otvorů. Vzorky z těchto forem sloužily pro zkoušení pevností a tudíž do nich nebylo potřeba osazovat šrouby. Pro snadnější odbednění a čištění byly sestavené formy vytřeny olejovým roztokem. Po navážení byly jednotlivé složky smíchány dohromady.



Obr. 3.3 – Navážené složky – metakaolin (vlevo), mikrosilika (druhá zleva), popílek (třetí zleva), referenční vzorek (vpravo)

Míchání 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. Poté byla vybetonována forma do zhruba jedné třetiny a následně zhutněno na vibračním stole, tento krok byl několikrát opakován až do úplného vyplnění forem. Připravené formy byly odloženy do druhého dne a po uplynutí 24 hodin došlo k jejich odbednění. Autogenní smršťování probíhající během hydratace nebylo předmětem této práce a tudíž nebylo měřeno.

### 3.3.3 PROBLÉMY PŘI BETONÁŽI

Během betonáže jsem se potýkal s několika problémy. Ta nejvíce problémová příměs v celém experimentu se ukázala být mikrosilika, protože veškeré problémy se točily právě kolem křemičitého úletu.



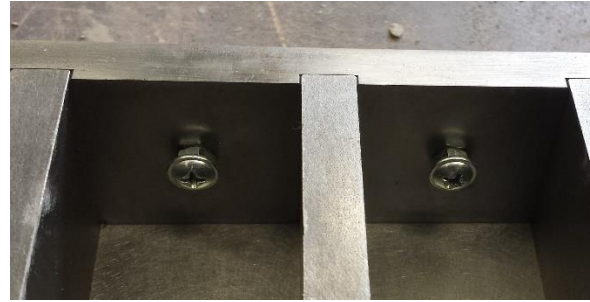
Obr. 3.4 - Forma s osazenými šrouby



Obr. 3.5 - Čerstvě vybetonované formy



Obr. 3.6 - Správné osazení šroubů



Obr. 3.7 - Nevhodné osazení šroubů

Po odbednění první sady vzorků, tj. s dvacetiprocentní náhradou cementu, se ukázalo, že šrouby nebyly zabetonovány do dostatečné hloubky cementového trámečku. Hlavička šroubu byla na doraz stěny bednicí formy a z tohoto důvodu musely být při další betonáži použity delší šrouby. Ukázky formy s dlouhými, resp. krátkými šrouby jsou na Obr. 3.6 resp. Obr. 3.7. U každého vzorku mikrosiliky byly při odbedňování šrouby ze vzorku přímo vytrženy nebo uvolněny, což by mělo fatální důsledek na přesnost měření smršťování. Výroba vzorků mikrosiliky s dvacetiprocentní náhradou cementu byla tedy zopakována o týden později spolu s druhou sadou vzorků. Detailní pohledy na porušené vzorky z první vyrobené sady jsou vidět na Obr. 3.8 a Obr. 3.9. Ve druhém cyklu betonování byl tento problém úspěšně vyřešen.

Bohužel ani druhá sada se neobešla bez problému. Opět problémy souvisely s mikrosilikou, v tomto případě však s padesátiprocentní náhradou cementu. Již při betonování nebyla zpracovatelnost směsi na dobré úrovni. Oproti ostatním příměsím byla směs velmi hutná. Jak je známo mikrosilika má měrný povrch až 100x vyšší než cement. Tudíž má mnohonásobně větší plochu, která je v kontaktu s vodou a ta pojme mnohonásobně více vody než ostatní použité příměsi. Ukázalo se, že koeficient  $k$ , který právě výše zmíněnou



Obr. 3.8 - Vytržení šroubů u mikrosiliky



Obr. 3.9 - Uvolnění šroubu popraskáním mikrosiliky

vlastnost každé příměsi koriguje úpravou množství vody přidávané do cementu, není při vyšší náhradě cementu dostatečně vysoký. Norma však připouští náhradu cementu mikrosilikou pouze do 20 % a vzhledem k použití 50 % náhrady byl tím pádem omezující požadavek normy jenom potvrzen. Vše se opět ukázalo při odbednění vzorků. V důsledku velmi špatné zpracovatelnosti cementové pasty nebyla směs dostatečně zvibrovaná a na vzorcích se to projevilo různými kavernami a vysokým podílem pórů uvnitř vzorku. Ačkoliv vzorek disponoval velkým počtem dutinek, hlouběji zapuštěné šrouby držely již velmi pevně. Detailní pohledy na nedokonale zvibrované vzorky jsou vidět na Obr. 3.10 a Obr. 3.11. Tento problém byl odstraněn navýšením koeficientu  $k$ . Pro mikrosilikou je v normě dán koeficient  $k = 2$ , ve druhé betonáži byl tento koeficient zvětšen na hodnotu 2,4. Při betonáži nebyla zpracovatelnost, ve srovnání s ostatními příměsemi, zdaleka ta nejlepší, nicméně koeficient  $k$  byl již pro správné zvibrovaní cementové pasty dostačující, což se také ukázalo po odbednění vzorků. Tímto byla betonáž úspěšně dokončena a následovala etapa měření smršťování.



Obr. 3.10 - Nedokonale zvibrovaný vzorek mikrosiliky 50 % po odbednění



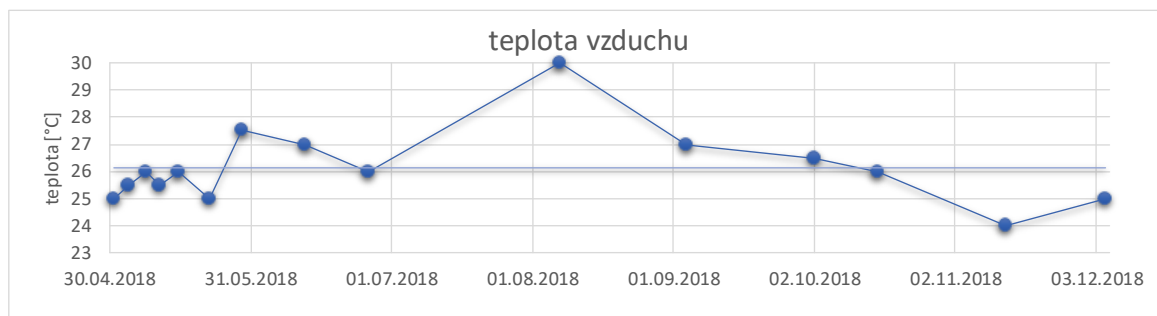
Obr. 3.11 - Nedokonale zvibrovaný vzorek mikrosiliky 50 % po odbednění (2)

### 3.4 MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ VZORKŮ

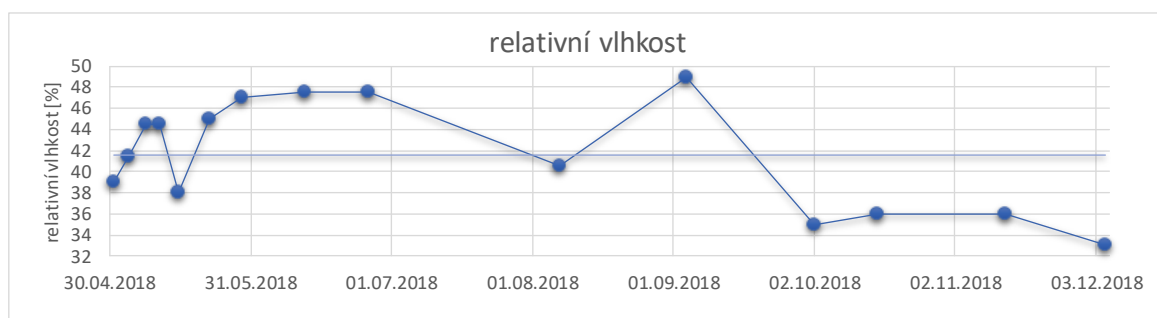
V tomto experimentu nebude zachyceno tzv. smršťování autogenní, kde dochází ke zmenšení objemu vlivem chemických procesů během hydratace v prvních hodinách životnosti vzorku. Experiment je soustředěn na zmenšení objemu vzorku vlivem vysychání, tedy během období, kdy konstrukce odpařuje vodu, která nebyla spotřebována k hydrataci cementu. První změna délky vzorku byla zaznamenána po 24 hodinách od odbednění forem. Ačkoliv vzorky nebyly umístěné ve vodě, byl zaznamenán i bobtnající průběh a dále bude podrobněji ukázán. V této kapitole budou uvedeny podmínky prostředí, ve kterém vzorky smršťovaly, dále bude popsán průběh měření a také problémy, se kterými jsem se potýkal. V závěru budou ukázány výsledky počátečního smršťování.

#### 3.4.1 PODMÍNKY PROSTŘEDÍ

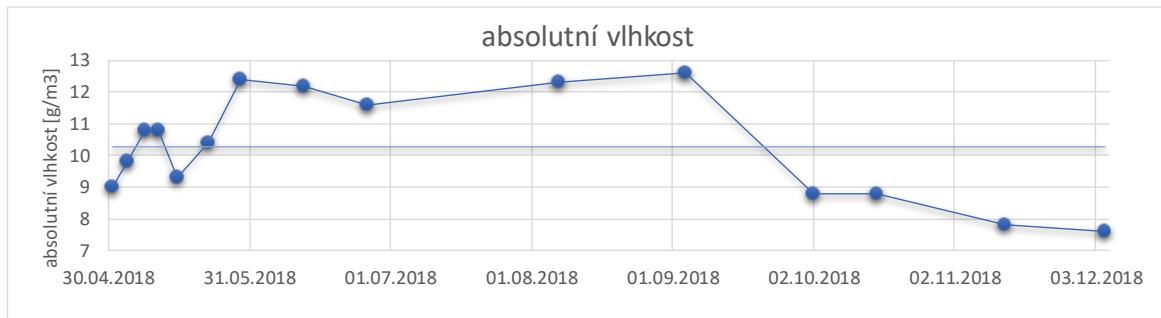
Po dobu celého měření byly vzorky umístěny na stejném místě v laboratoři Stavební fakulty ČVUT na katedře betonových a zděných konstrukcí. Vzorky byly vystaveny okolnímu prostředí v interiéru laboratoře, ve kterém kolísala teplota v rozmezí 22 °C až 28 °C. Relativní vlhkost vzduchu se pohybovala v rozmezí 33 % - 49 % a absolutní vlhkost cca 8-13 g/m<sup>3</sup>. Tyto hodnoty byly pravidelně sledovány a jejich průběh je graficky zobrazen níže.



Obr. 3.12 – Průběh teploty vzduchu v laboratoři



Obr. 3.13 – Průběh relativní vlhkosti v laboratoři



Obr. 3.14 - Průběh absolutní vlhkosti v laboratoři

### 3.4.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Před zahájením měření bylo potřeba označit vzorky pro jejich snadnou identifikaci a také zafixovat polohu rektifikovatelného stojánu pro digitální úchylkoměr. Poté již mohla být zaznamenána délka každého trámečku. Tato hodnota sloužila jako výchozí parametr, od kterého byla vždy dopočítána velikost zkrácení měřeného vzorku. Toto měření bylo pro celý experiment zcela zásadní, proto byl kladen veliký důraz na přesnost provádění. Velikost smršťování k danému dni vždy odpovídala rozdílu výchozí délky a nově naměřené hodnoty.

Samotné měření bylo velmi jednoduché. Šroub jednoho konce trámečku byl nastrčen do fixační jamky ve spodní části stojanu a druhá hrana šroubu byla nasunuta pod měřící



Obr. 3.15 - Stojan s úchylkoměrem



Obr. 3.16 - Měřené vzorky



pružinu úchylkoměru. Odtud pak byla odečtena potřebná hodnota s přesností na tisícinu milimetru. Do připravené tabulky byly vždy od každého vzorku zaznamenány tři hodnoty, které byly následně zprůměrovány. Každou příměs reprezentovaly celkem tři trámečky, konečná hodnota smršťování daného vzorku byla tedy složena celkem z devíti zprůměrovaných hodnot, čímž byl částečně omezen vliv nepřesnosti měření. Pro zajímavost byl také vyčíslen rozdíl mezi nejvíce a nejméně se smršťujícím vzorkem. Abychom získali použitelné hodnoty, bylo potřeba vzorek k úchylkoměru přikládat vždy ve stejné poloze. V případě otočení trámečku o 180° by docházelo k naměření odlišných hodnot v řádu desetin milimetru, což by rovněž znehodnotilo celý tento výzkum.

Celá etapa zaznamenávání smršťování byla rozdělena do několika částí s měnící se frekvencí opakování měření od každodenního měření, až po měření jedenkrát v měsíci – viz Tab. 3.3. Zpomalování frekvence měření byla v souladu se zpomalováním rychlosti smršťování.

Tab. 3.3 - Frekvence měření

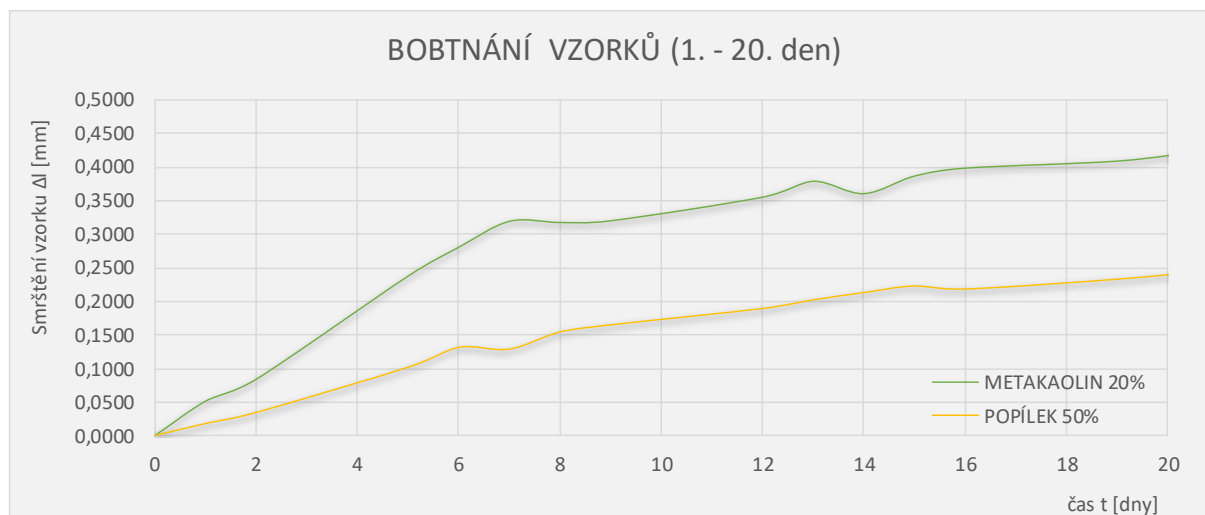
stáří vzorku	frekvence měření
1 - 16 dní	každý den
17 - 28 dní	3x týdně
29 - 58 dní	2x týdně
59 - 118 dní	2x měsíčně
119 - 280 dní	1x měsíčně

### 3.4.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST NAMĚŘENÝCH DAT

Během etapy měření se vyskytlo i pár problémů nebo záležitostí, které mohly ovlivnit přesnost naměřených dat a bylo je potřeba řešit. Tím nejmenším, avšak pro relevantnost výsledků důležitým faktorem, bylo eliminování přímého slunečního záření dopadajícího na vzorky, aby byly zajištěny co možná nejvíce stabilní podmínky. Byť za cenu přitemnění laboratoře, bylo v části místnosti potřeba stáhnout na pár měsíců žaluzie.

Dalším postřehem bylo nabobtnání vzorků první sady během noci před odbedněním čerstvě vybetonovaných trámečků ze druhé sady, resp. před odbedněním třetí sady (oprava mikrosiliky 50 %). Vzorky byly nejdříve uloženy pod fólií, která měla clonit právě dopad přímého slunečního záření. Ukázalo se však, že odpařující se voda z čerstvě vybetonovaných forem se držela pod fólií. Vytvořilo se zde prostředí s velmi vysokou koncentrací vodní páry a stalo se příčinou drobného zvětšení objemu všech vzorků. Dokonce vzorky umístěné hlouběji pod plachtou zvětšili svůj objem více než vzorky na okraji plachty. Tato chyba bohužel nepatrně ovlivnila experimentální práci zpomalením vysychání vzorků a oddálila smršťování v rané fázi jejich životnosti. Na Obr. 3.17 je bobtnání metakaolinu 20 % a popílku 50 %

zachyceno – nejdříve před odbedněním druhé sady vzorků, tj. 6. – 7. den a podruhé před odbedněním třetí sady (oprava mikrosiliky 50 %), tj. 13. – 14. den. Během letních měsíců, kdy byly hodnoty absolutní vlhkosti naměřeny vyšší, byl dle předpokladu registrován pomalejší úbytek objemu. Naopak se snižující se vlhkostí rychlost vysychání zrychlovalo.



Obr. 3.17 - Bobtnání vzorků

Jeden z dalších postřehů, který vyšel najevo až po několikátýdenních měření, se týká již diskutovaných šroubů zabetonovaných do trámečků. Po čase jsem si všiml, že některé vzorky mají větší odchylku mezi třemi naměřenými hodnotami než ostatní a že se tento problém nevyskytuje náhodně, nýbrž pravidelně a u stejných vzorků. Příčinou bylo ruční broušení dřívku šroubů na brusce, kde nebyl šroub přiložen přesně kolmo na brusku. Byť se jednalo o okem nepostřehnutelnou nerovnost, hodnoty naměřené úchylkoměrem se od sebe navzájem liší někdy až o 0,02 mm resp. 125  $\mu\text{m}/\text{m}$ . V případě určení přesné hodnoty poměrné deformace od smršťování během prvních dní, vnášel tento faktor do výsledků poměrně významnou chybu, pro konečnou hodnotu smršťování však byla tato nerovnost zanedbatelná. Na tento postřeh jsem reagoval vyčíslením směrodatné odchylky každého měření, sestavil jsem přehledné grafy vyobrazující míru nepřesnosti měření u každé příměsi. Podrobněji o řešení tohoto problému je pojednáno v kapitole 3.8. Poslední záležitost, která rozhodně ovlivňovala naměřená data byla vlhkost vzduchu. V rámci možností v laboratoři nemoha být teplota a relativní vlhkosti korigována. Jak již bylo zmíněno po ustálení vysychání vzorků, kdy se zvýšila míra ovlivnění výsledků právě vlhkostí, byl tento parametr vzduchu pečlivě sledován, aby mohl být případně zohledněn při vyhodnocování dat.



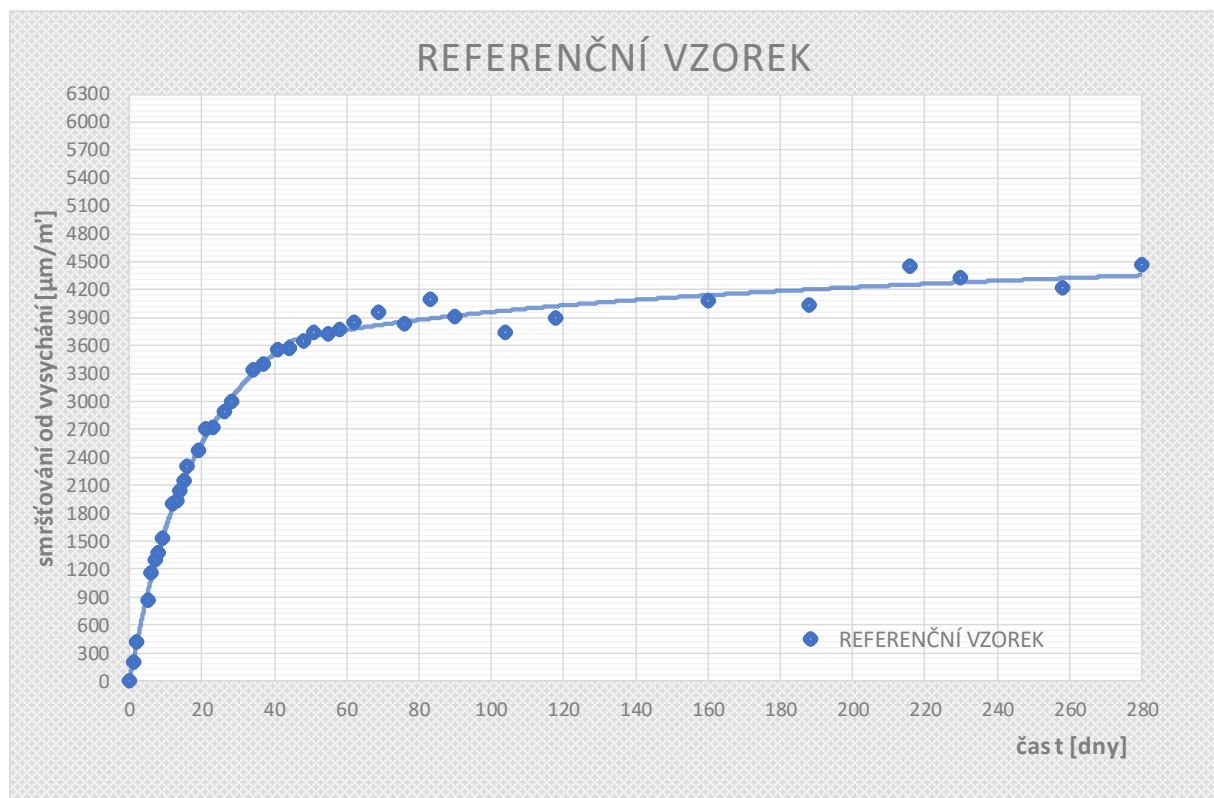
Obr. 3.18 - Vzorky různých příměsí



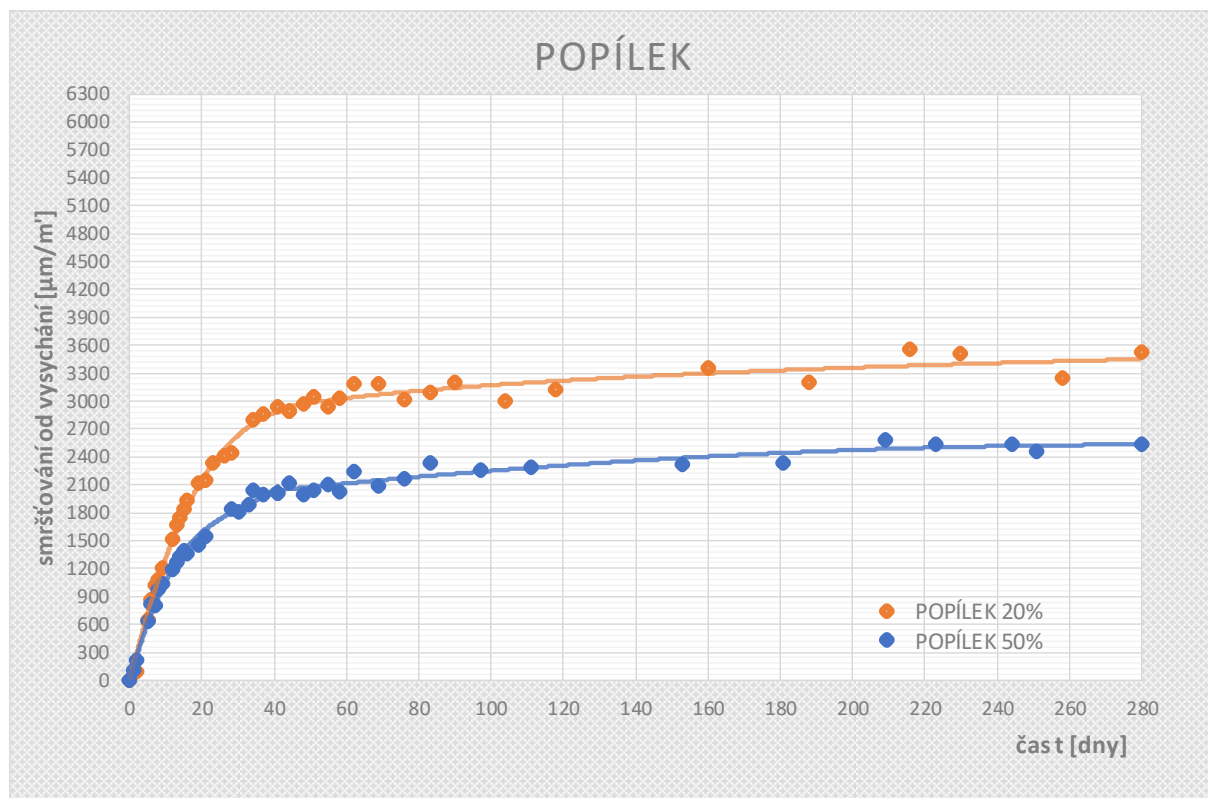
Obr. 3.19 - Vzorky v laboratoři

### 3.4.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ HLAVNÍ FÁZE SMRŠŤOVÁNÍ

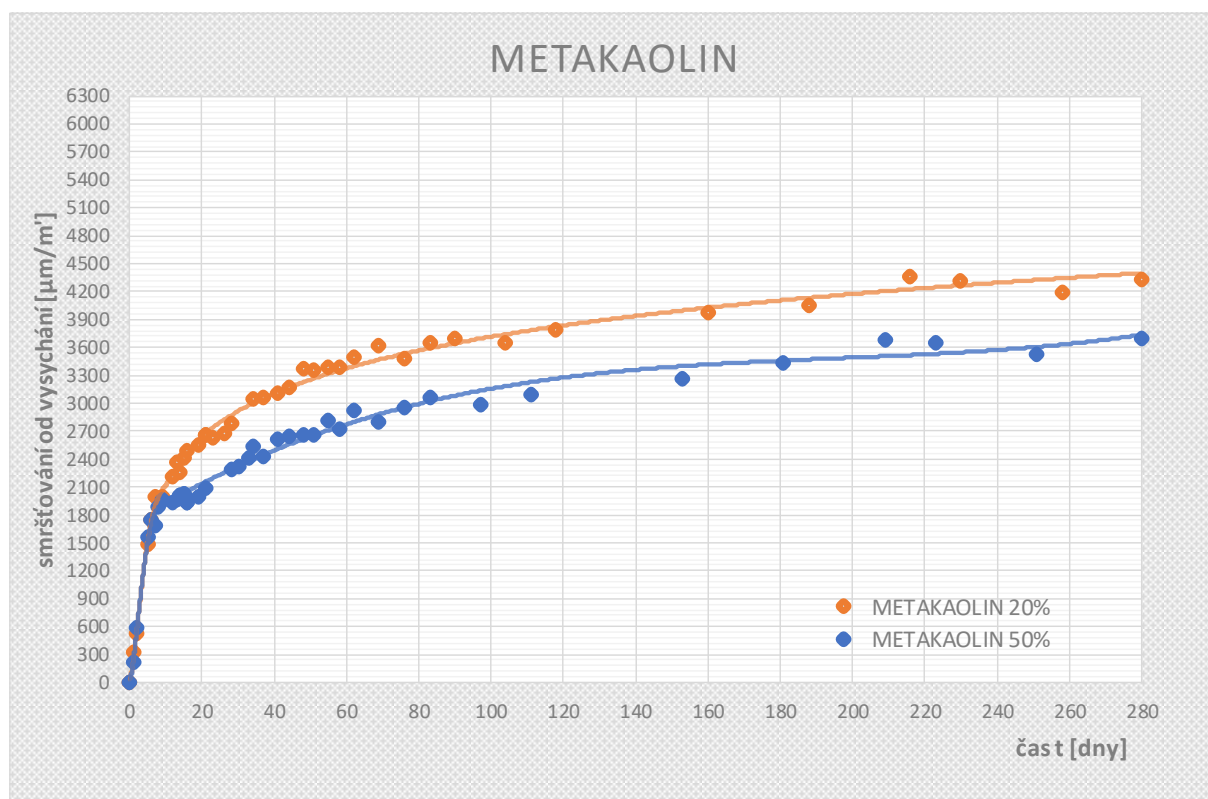
V této kapitole budou ukázány výsledky měření. V jednotlivých grafech jsou nejprve porovnány stejné příměsi s různou procentuální náhradou cementu a poté jsou mezi sebou porovnány různé příměsi se stejnou procentuální náhradou cementu. Nakonec je detailněji zobrazen počáteční nárůst smršťování v prvních 28 dnech. Grafy uvádí časovou závislost smršťování od vysychání v mikrometrech na jeden běžný metr. Jednotlivé body v grafu znázorňují průměrné hodnoty sestavené ze třech měření. Kompletní přehled naměřených výsledků je k nahlédnutí v příloze.



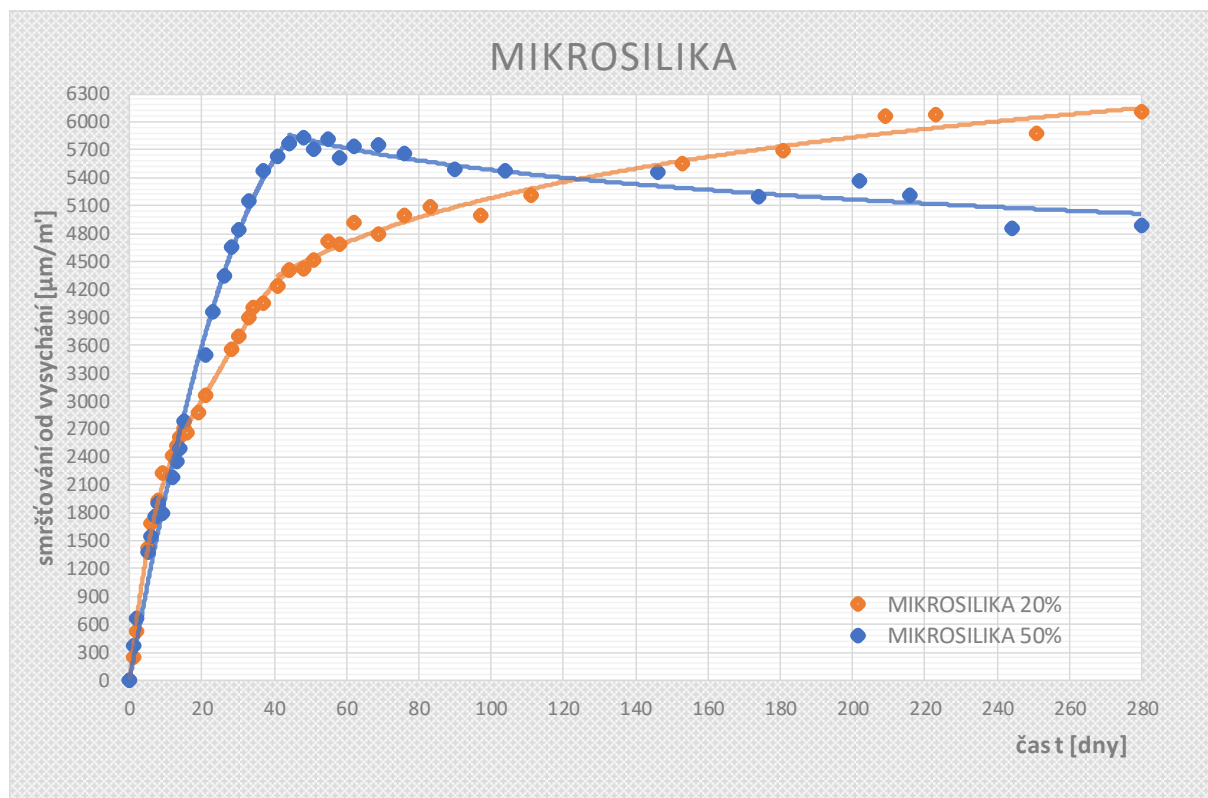
Obr. 3.20 - Smršťování od vysychání referenčního vzorku



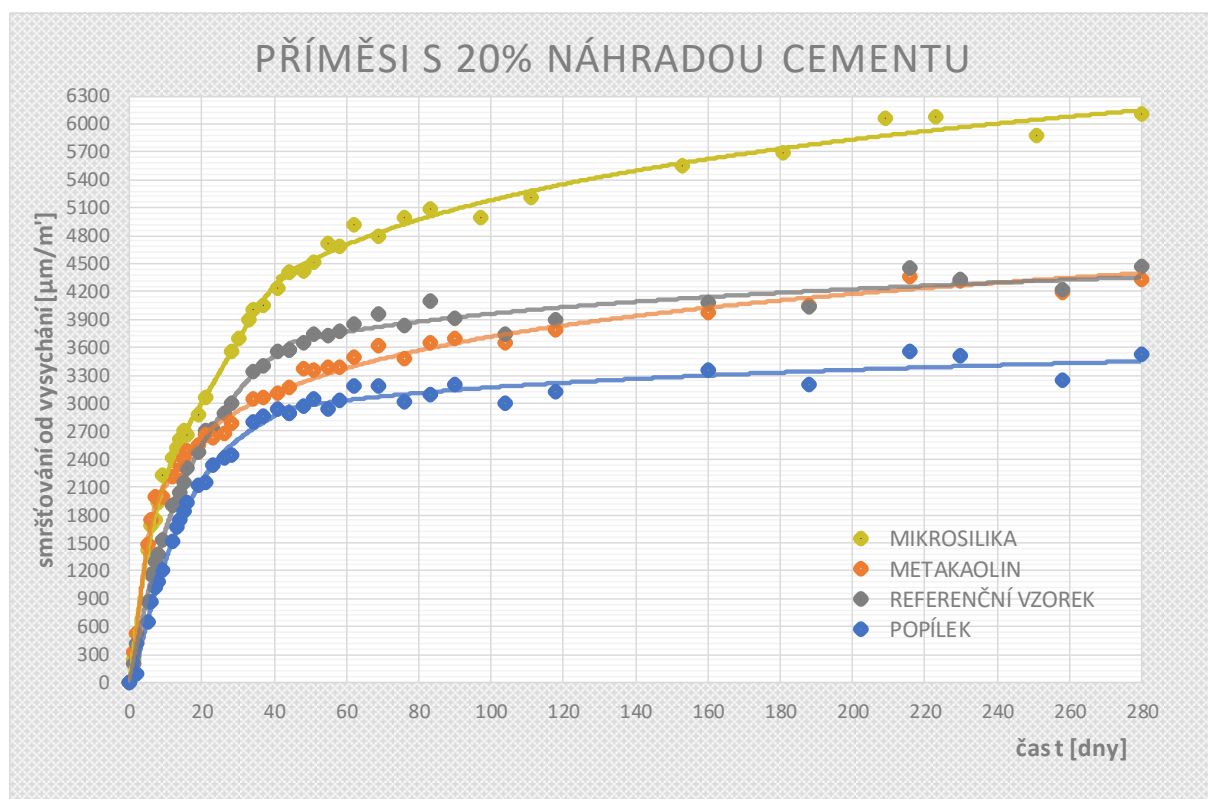
Obr. 3.21 - Smršťování od vysychání popílku



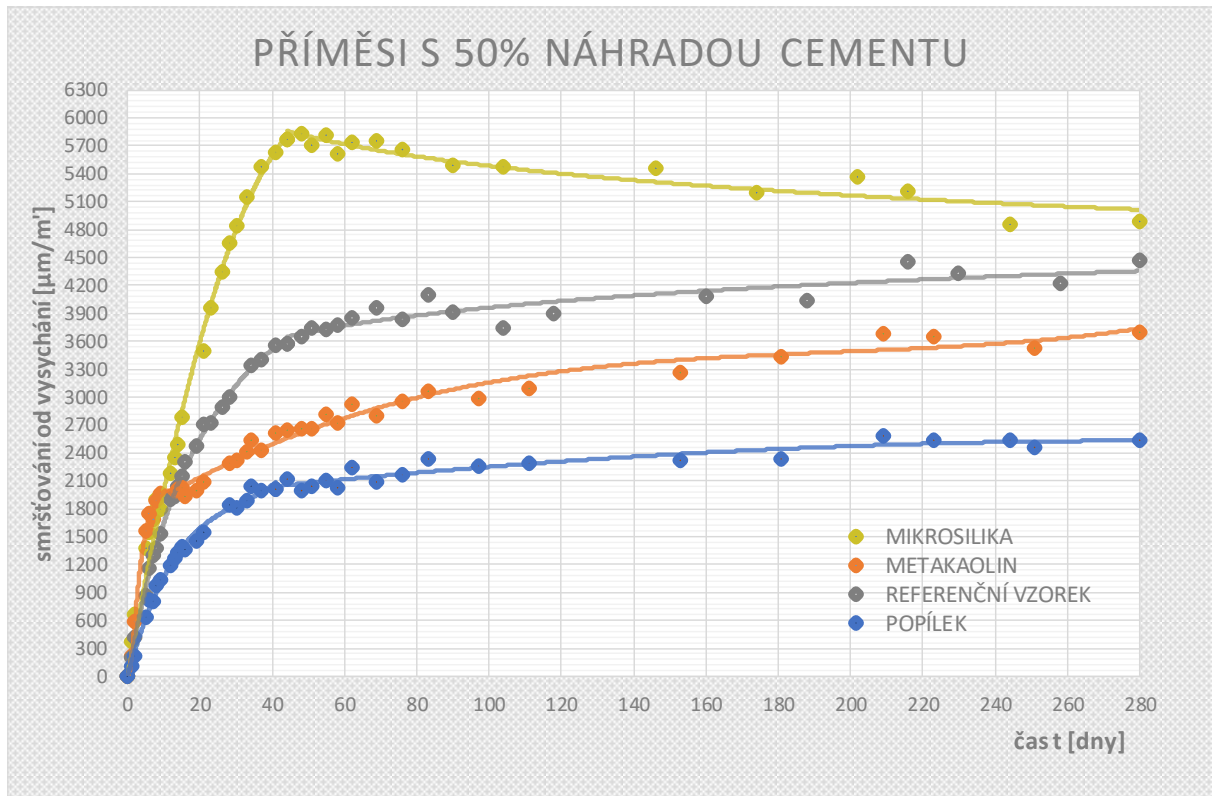
Obr. 3.22 - Smršťování od vysychání metakaolinu



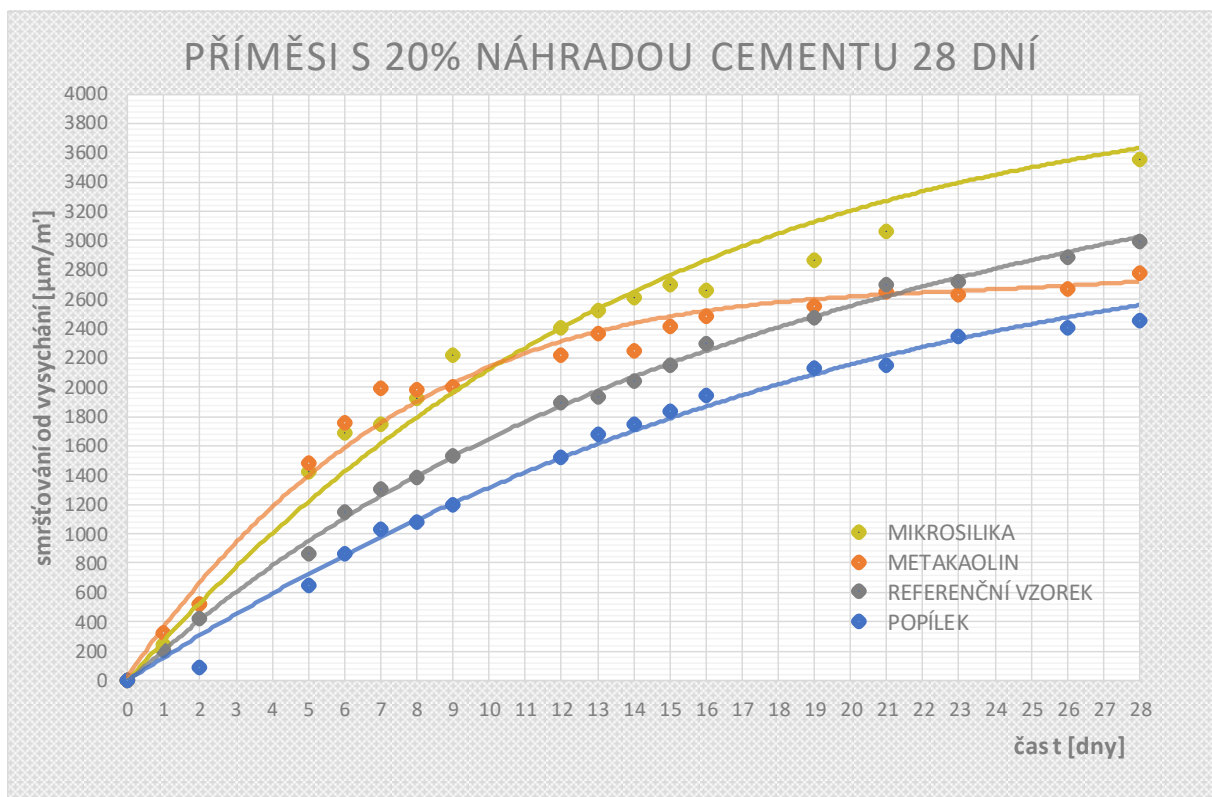
Obr. 3.23 - Smršťování od vysychání mikrosiliky



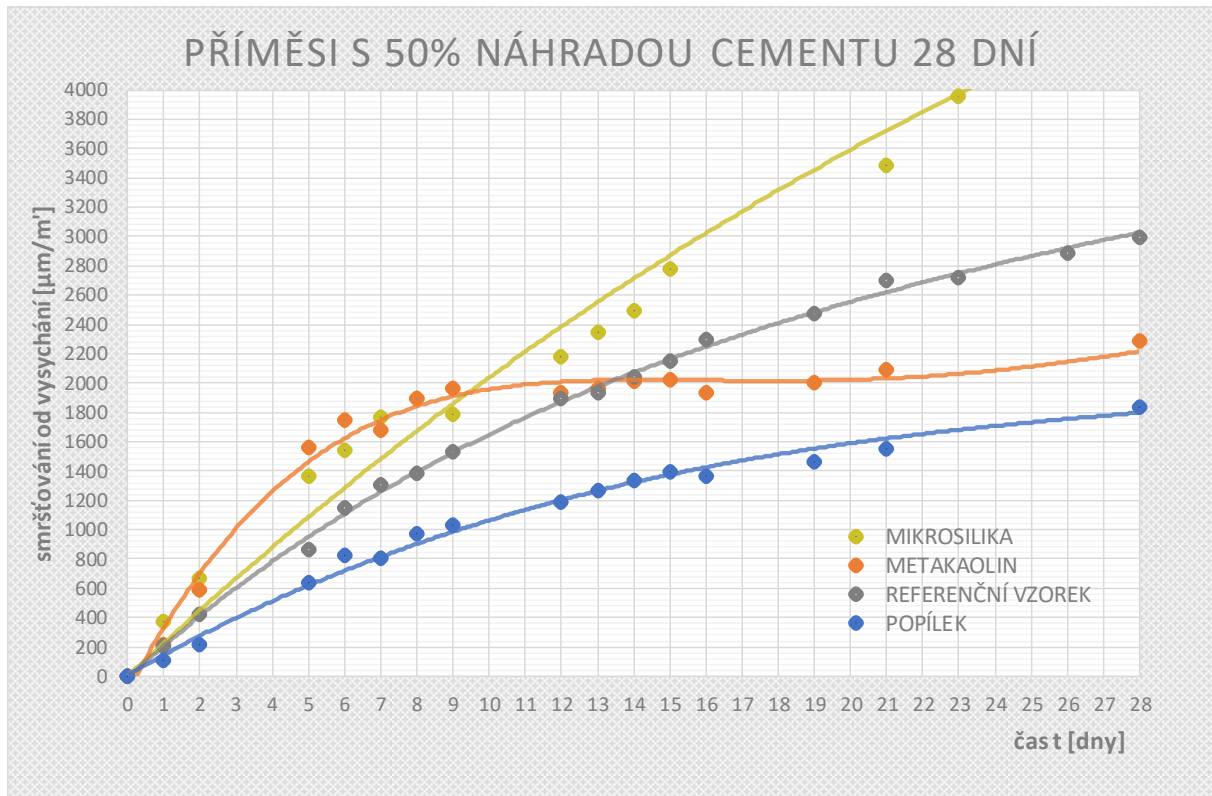
Obr. 3.24 - Smršťování od vysychání - porovnání příměsí s 20 % náhradou cementu



Obr. 3.25 - Smršťování od vysychání - porovnání příměsí s 50 % náhradou cementu



Obr. 3.26 - Smršťování od vysychání - porovnání příměsí s 20 % náhradou cementu prvních 28 dní



Obr. 3.27 - Smršťování od vysychání - porovnání příměsí s 50 % náhradou cementu prvních 28 dní

#### 3.4.4.1 KOMENTÁŘ K VÝSLEDKŮM

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 směsí 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. V Tab. 3.4 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 (viz Obr. 3.47 a Obr. 3.48).

Metakaolin vykazuje oproti ostatním příměsím nejrychlejší počáteční nárůst smršťování, ale i přesto se v případě ME-50 zastavuje v rámci tohoto experimentu na přijatelné míře

zkrácení vzorku. Z výsledků lze usoudit, že správným ošetřováním v prvních 7–8 dnech, bychom oddálili počáteční nárůst a tím efektivně docílili snížení celkového smrštění. Z porovnání Obr. 3.24 a Obr. 3.25 je vidět, že náhradou 20 % metakaolinu se na zvýšené požadavky na smršťování nevyplácí, pokud však zvolíme vyšší náhradu metakaolinu začne se trend od křivky referenčního vzorku oddalovat směrem k příznivějším hodnotám.

Tab. 3.4 - Číselné porovnání smršťování od vysychání

stáří vzorku	parametr	REF	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
7 dní	<b>smršťování od vysychání [<math>\mu\text{m}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>1302</b>	<b>1994</b>	<b>1683</b>	<b>1028</b>	<b>807</b>	<b>1749</b>	<b>1767</b>
	míra smrštění v %	29,2	46,1	45,5	29,1	31,8	28,6	36,2
28 dní	<b>smršťování od vysychání [<math>\mu\text{m}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>2993</b>	<b>2776</b>	<b>2289</b>	<b>2451</b>	<b>1833</b>	<b>3557</b>	<b>4660</b>
	míra smrštění v %	67,1	64,2	61,9	69,4	72,1	58,2	95,5
90 dní	<b>smršťování od vysychání [<math>\mu\text{m}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>3916</b>	<b>3696</b>	<b>2983</b>	<b>3199</b>	<b>2264</b>	<b>4995</b>	<b>5487</b>
	míra smrštění v %	87,7	85,4	80,6	90,6	89,1	81,8	112,5
280 dní	<b>smršťování od vysychání [<math>\mu\text{m}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>4463</b>	<b>4327</b>	<b>3700</b>	<b>3531</b>	<b>2541</b>	<b>6107</b>	<b>4879</b>
	míra smrštění v %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

V případě metakaolinu a popílku můžeme konstatovat, že navýšení podílu příměsi vede ke snížení konečného smrštění. Tento trend však narušuje mikrosilika. Vývoj MI-20 se zdá být v pořádku. Je obecně známé, že mikrosilika se v souvislosti s objemovými změnami projevuje negativně a tak se nejvyšší hodnoty smrštění očekávaly. 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 vahou. Další vzorek byl potrhán těsně před změřením pevnosti a pevnost v tahu 0,69 MPa, která byla zjištěna u zbývajících vzorků, vše jen potvrzuje.

Pro zajímavost bylo smršťování měřeno i na vzorku, který byl při první betonáži špatně zhutněn – viz kapitola 3.3.3. I přesto, že velkými výdutěmi byla zvětšena plocha k vysychání a konečné smrštění bylo tímto jistě navýšeno, vývoj křivky se po celou dobu pohyboval pod křivkou MI-20 a jeho konečná hodnota nabývala zkrácení 5573  $\mu\text{m}/\text{m}^3$ . S přihlédnutím k tomuto výsledku lze nad tímto experimentem udělat závěr, že platí pravidlo, čím více příměsi do receptury přidáme, tím menší smrštění můžeme očekávat. V případě betonových konstrukcí s obsahem mikrosiliky však musíme počítat s navýšením kg výztuže.



### 3.5 VÝSLEDKY SMRŠŤOVÁNÍ PODLE PREDIKČNÍCH MODELŮ

V rámci experimentální práce byly vytvořeny výpočetní programy v excelu, které na základě definovaných predikčních modelů, které byly rozebrány v teoretické části, umí vypočítat pro různé vstupní parametry poměrné přetvoření od smršťování v libovolném čase. Pokud to daný model umožňuje, je zachyceno i rozdělení na složky od autogenního smršťování a smršťování od vysychání, konkrétně u modelu B4 jsou dále výstupy oddělené podle toho, zdali chceme zahrnout vliv teploty vzduchu nebo zdali chceme zohlednit přítomnost některé z příměsí, které má model předdefinované na základě výzkumu viz Tab. 2.12. Formulář pro vstupní parametry má také ošetřeny omezující podmínky pro maximální a minimální hodnoty, které byly definovány autorem modelu.

V této části budou porovnány jednotlivé predikční modely. Jejich výsledky budou demonstrovány na typických konstrukčních prvcích jako je trám a stropní deska, které se od sebe liší velikostí průřezu. Výpočetní modely mezi sebou budou porovnány ve dvou variantách, v prvním případě bude porovnáno smršťování běžných betonu a ve druhém případě by měl být svými vstupními parametry simulován vysokohodnotný beton. Pro porovnání byly vybrány takové vstupní parametry, aby je, pokud možno, byly schopny zohlednit všechny z použitých modelů. Výstup z programu zobrazuje zadávací formulář, součinitele, se kterými model pracuje a výsledky smršťování pro jednotlivé fáze. Vysychání uváděných prvků je v případě trámů umožněno všemi směry, v případě desek je to vrchní a spodní povrch, to je dáno tím, že desky jsou pro výpočet zadávány pro jeden běžný metr šířky, ale ve skutečnosti je šířka desky mnohem delší a tím pádem není z bočních stran vysychání umožněno. Pro zkrácení je zobrazen výstup pouze pro trám běžné velikosti z běžného betonu. Nakonec byl přidán graf s průběhy celkového smršťování trámu a desky.

Tab. 3.5 - Vstupní parametry matematických modelů

vstupní parametry modelů pro porovnání výstupů		
parametry / typ betonu	běžný beton (BB)	vysokohodnotný beton (HPC)
vlhkost prostředí	50%	50%
vodní součinitel	0,55	0,35
doba ošetřování	1 den	1 den
průměrná válcová pevnost	38 MPa	58 MPa
obsah cementu	350 kg/m <sup>3</sup>	550 kg/m <sup>3</sup>
třída cementu	N	N
stáří betonu	1 000 dní	1 000 dní

## POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ OD SMRŠŤOVÁNÍ PODLE MODELU

# B4

trám 600x200mm (BB)

### vstupní parametry

relativní vlhkost vzduchu	50	[%]
poměr kameniva a cementu	5,00	[-]
typ kameniva	ostatní	[-]
obsah cementu	350	[kg/m <sup>3</sup> ] *(200 - 1500)
třída cementu	N - normální nárůst pevnosti	
vodní součinitel	0,55	[-]
okolní teplota	23	[°C]
průměrná válcová pevnost 28. den	38	[MPa] *(f <sub>cm</sub> )
přísady a příměsi	neobsahuje	
doba ošetřování	1	[den]
tvar průřezu	∞ čtyřhran	[-]
obsah průřezu	120000	[mm <sup>2</sup> ]
obvod v kontaktu s prostředím	1600	[mm]
sledovaný den	1000	[den]

### parametry pro výpočet

#### smršťování od vysychání:

$\tau_{cem}$	0,016
$p_{\tau a}$	-0,33
$p_{\tau w}$	-0,06
$p_{\tau c}$	-0,1
$\varepsilon_{cem}$	0,00036
$p_{\varepsilon a}$	-0,8
$p_{\varepsilon w}$	1,1
$p_{\varepsilon c}$	0,11

#### příměsi a přísady:

$\tau_{cem}$	-
$\varepsilon_{au,cem}$	-
$r_{\varepsilon w}$	-
$r_{\alpha}$	-

#### autogenní smršťování:

$\tau_{au,cem}$	1
$r_{\tau w}$	3
$r_t$	-4,5
$r_{\alpha}$	1
$\varepsilon_{au,cem}$	0,00021
$r_{\varepsilon a}$	-0,75
$r_{\varepsilon w}$	-3,5

#### kamenivo:

$k_{\tau a}$	1
$k_{\varepsilon a}$	1

#### geometrie a vlhkost:

$k_s$	1,25
$k_h$	0,875

<i>výpočet autogenního smršťování</i>				
stáří betonu [den]	smrštění bez vlivu teploty (výchozí hodnota 20°C)	smrštění s vlivem teploty (beton bez přísady)	smrštění s vlivem teploty (včetně přísad a přísady)	
7	-20,42	-24,72	-	[ μm/m ]
30	-56,23	-57,87	-	[ μm/m ]
60	-62,20	-62,87	-	[ μm/m ]
90	-63,85	-64,24	-	[ μm/m ]
365	-65,72	-65,77	-	[ μm/m ]
1000	-65,94	-65,95	-	[ μm/m ]
<b>zvolený den</b>				
1000	-65,94	-65,95	-	[ μm/m ]

<i>výpočet smršťování od vysychání</i>				
stáří betonu [den]	smrštění bez vlivu teploty (výchozí hodnota 20°C)	smrštění s vlivem teploty (beton bez přísady)	smrštění s vlivem teploty (včetně přísad a přísady)	
7	-55,00	-58,91	-	[ μm/m ]
30	-119,37	-127,62	-	[ μm/m ]
60	-167,48	-178,63	-	[ μm/m ]
90	-202,42	-215,41	-	[ μm/m ]
365	-358,55	-375,39	-	[ μm/m ]
1000	-470,84	-482,84	-	[ μm/m ]
<b>zvolený den</b>				
1000	-470,84	-482,84	-	[ μm/m ]

<i>celkové smrštění</i>				
stáří betonu [den]	smrštění bez vlivu teploty (výchozí hodnota 20°C)	smrštění s vlivem teploty (beton bez přísady)	smrštění s vlivem teploty (včetně přísad a přísady)	
7	-75,42	-83,64	-	[ μm/m ]
30	-175,61	-185,48	-	[ μm/m ]
60	-229,68	-241,50	-	[ μm/m ]
90	-266,27	-279,64	-	[ μm/m ]
365	-424,27	-441,16	-	[ μm/m ]
1000	-536,78	-548,79	-	[ μm/m ]
<b>zvolený den</b>				
1000	-536,78	-548,79	-	[ μm/m ]

**POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ OD SMRŠŤOVÁNÍ PODLE MODELU****B3**

trám 600x200mm (BB)

**vstupní parametry**

relativní vlhkost vzduchu	<input type="text" value="50"/>	[%]	
obsah cementu	<input type="text" value="350"/>	[kg/m <sup>3</sup> ]	*(160 - 720)
typ cementu	<input type="text" value="cement typu I"/>	[-]	
vodní součinitel	<input type="text" value="0,55"/>	[-]	
průměrná válcová pevnost 28. den	<input type="text" value="38"/>	[MPa]	*(f <sub>cm</sub> )
způsob ošetřování	<input type="text" value="ošetřování pod vodou nebo v prostředí se 100% vlhkostí"/>		
doba ošetřování	<input type="text" value="1"/>	[den]	
tvar průřezu	<input type="text" value="∞ čtyřhran"/>	[-]	
obsah průřezu	<input type="text" value="120000"/>	[mm <sup>2</sup> ]	
obvod v kontaktu s prostředím	<input type="text" value="1600"/>	[mm]	
sledovaný den	<input type="text" value="1000"/>	[den]	

**parametry pro výpočet**

<b>typ cementu / způsob ošetřování / tvar průřezu / vlhkost</b>			
$\alpha_1$		1,00	$k_s$   1,25
$\alpha_2$		1,00	$k_h$   0,875

**výpočet smršťování**

stáří betonu [den]	celkové poměrné přetvoření od smršťování	jednotka
7	-43,11	[ μm/m ]
30	-94,17	[ μm/m ]
60	-133,23	[ μm/m ]
90	-162,32	[ μm/m ]
365	-306,06	[ μm/m ]
1000	-441,32	[ μm/m ]
<b>zvolený den</b>		
1000	-441,32	[ μm/m ]

## POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ OD SMRŠŤOVÁNÍ PODLE MODELU **EN-1**

trám 600x200mm (BB)

### vstupní parametry

relativní vlhkost vzduchu	<input type="text" value="50"/>	[%]
třída cementu	<input type="text" value="N - normální nárůst pevnosti"/>	
vodní součinitel	<input type="text" value="0,55"/>	[-]
třída betonu / pevnost $f_{cm}$	<input type="radio"/> C 50/60	<input checked="" type="radio"/> 38 [MPa]
doba ošetřování	<input type="text" value="1"/>	[den]
obsah průřezu	<input type="text" value="120000"/>	[mm <sup>2</sup> ]
obvod v kontaktu s prostředím	<input type="text" value="1600"/>	[mm]
sledovaný den	<input type="text" value="1000"/>	[den]

### parametry pro výpočet

typ cementu / tvar průřezu / vlhkost			
$\alpha_{ds1}$	4,00	$h_0$	150,0
$\alpha_{ds2}$	0,12	$k_h$	0,925

### výpočet smršťování

stáří betonu [den]	poměrné přetvoření od autogenního smršťování	poměrné přetvoření od smršťování vysycháním	celkové poměrné přetvoření od smršťování	
7	-20,54	-33,67	-54,22	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
30	-33,28	-126,22	-159,51	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
60	-39,38	-198,65	-238,03	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
90	-42,50	-244,33	-286,84	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
365	-48,90	-371,15	-420,05	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
1000	-49,91	-415,51	-465,42	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
<b>zvolený den</b>				
1000	-49,91	-415,51	-465,42	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

## POMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ OD SMRŠŤOVÁNÍ PODLE MODELU EN-2

trám 600x200mm (BB)

### vstupní parametry

relativní vlhkost vzduchu	50	[%]
třída cementu	N - normální nárůst pevnosti	
třída betonu / pevnost $f_{cm}$	<input type="radio"/> C 50/60	<input checked="" type="radio"/> 38 [MPa]
doba ošetřování	1	[den]
ve směsi je obsažena mikrosilika	<input type="checkbox"/> ANO	
obsah průřezu	120000	[mm <sup>2</sup> ]
obvod v kontaktu s prostředím	1600	[mm]
sledovaný den	1000	[den]

### parametry pro výpočet

typ cementu / tvar průřezu / vlhkost / složení / pevnost

$\beta_{cd}$	0,021	$h_0$	150,0
$K_{f_{ck}}$	18,0	$k_h$	0,925
$s$	0,25	$f_{cm}/f_{ck}$	1,267

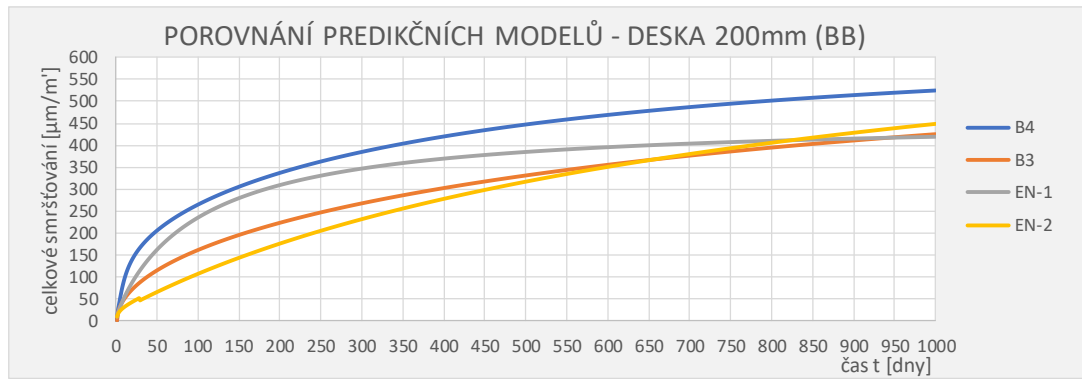
### výpočet smršťování

stáří betonu [den]	poměrné přetvoření od autogenního smršťování	poměrné přetvoření od vysycháním	celkové poměrné přetvoření od smršťování	
7	-19,70	-9,73	-29,43	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
28	-25,87	-41,95	-67,82	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
60	-22,11	-86,15	-108,26	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
90	-23,69	-123,01	-146,70	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
365	-27,75	-337,69	-365,45	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
1000	-28,00	-526,86	-554,86	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
<b>zvolený den</b>				
1000	-28,00	-526,86	-554,86	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

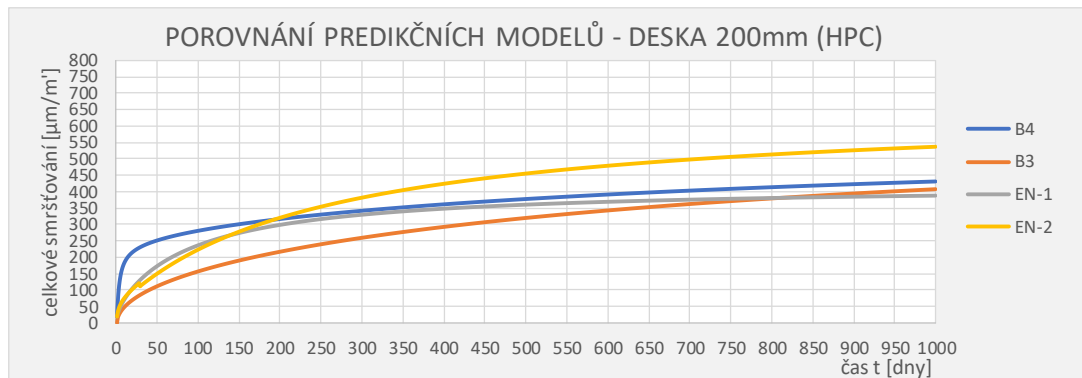
Tab. 3.6 - Porovnání výstupů matematických modelů

druh konstrukce / velikost průřezu	typ smrštění		predikční model			
			B4		B3	
			BB	HPC	BB	HPC
masivní trám/sloup 1200x800mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	65,9	197,2	-	-
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	210,2	92,8	-	-
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>276,1</b>	<b>290,00</b>	<b>169,3</b>	<b>165,7</b>
běžný trám/sloup 600x200mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	65,9	197,2	-	-
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	470,8	245,0	-	-
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>536,7</b>	<b>442,2</b>	<b>441,3</b>	<b>424,2</b>
masivní stropní deska h=300mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	65,9	197,2	-	-
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	366,2	173,3	-	-
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>432,1</b>	<b>370,4</b>	<b>314,5</b>	<b>305,6</b>
běžná stropní deska h=200mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	65,9	197,2	-	-
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	458,1	235,0	-	-
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>524,4</b>	<b>432,2</b>	<b>423,8</b>	<b>408,1</b>

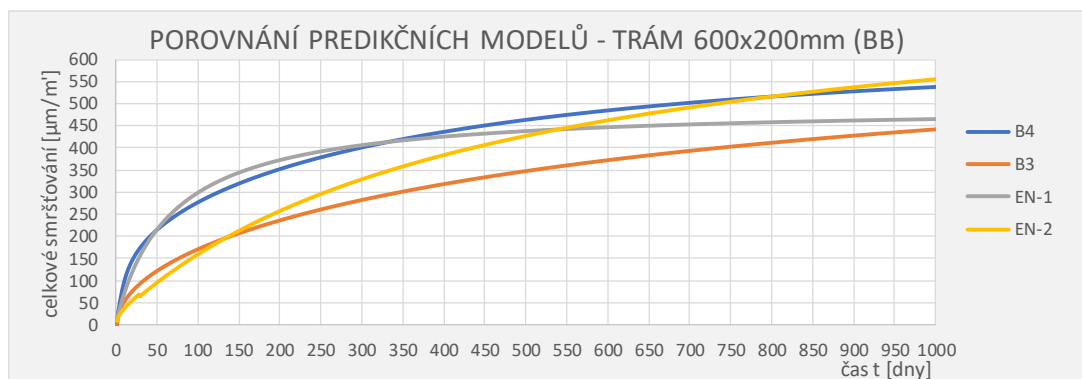
druh konstrukce / velikost průřezu	typ smrštění		predikční model			
			EN-1		EN-2	
			BB	HPC	BB	HPC
masivní trám/sloup 1200x800mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	49,9	99,8	28,0	84,0
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	240,9	189,5	132,8	221,8
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>290,8</b>	<b>289,4</b>	<b>160,8</b>	<b>305,8</b>
běžný trám/sloup 600x200mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	49,9	99,8	28,0	84,0
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	415,5	326,5	526,9	501,0
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>465,4</b>	<b>426,7</b>	<b>554,9</b>	<b>585,0</b>
masivní stropní deska h=300mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	49,9	99,8	28,0	84,0
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	299,4	235,5	268,4	355,7
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>349,3</b>	<b>335,3</b>	<b>296,4</b>	<b>439,7</b>
běžná stropní deska h=200mm	autogenní	$\mu\text{m}/\text{m}'$	49,9	99,8	28,0	84,0
	od vysychání	$\mu\text{m}/\text{m}'$	368,2	289,6	421,6	453,0
	<b>celkem</b>	<b><math>\mu\text{m}/\text{m}'</math></b>	<b>418,1</b>	<b>389,4</b>	<b>449,6</b>	<b>537,0</b>



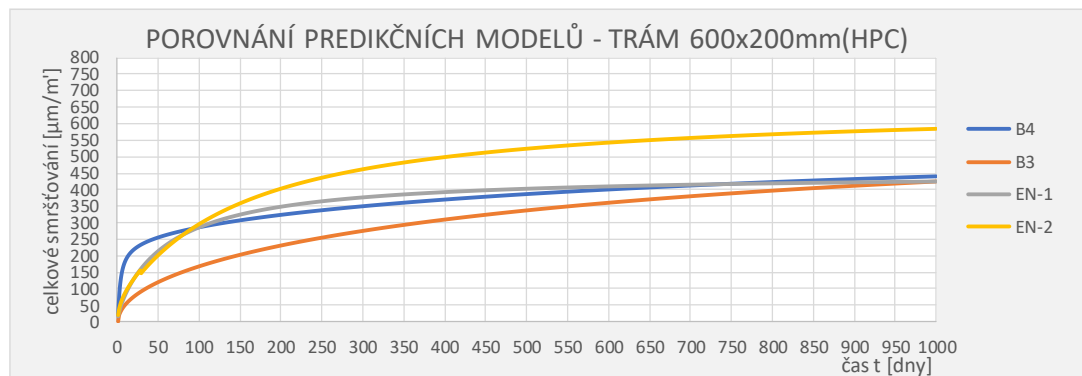
Obr. 3.28



Obr. 3.29



Obr. 3.30



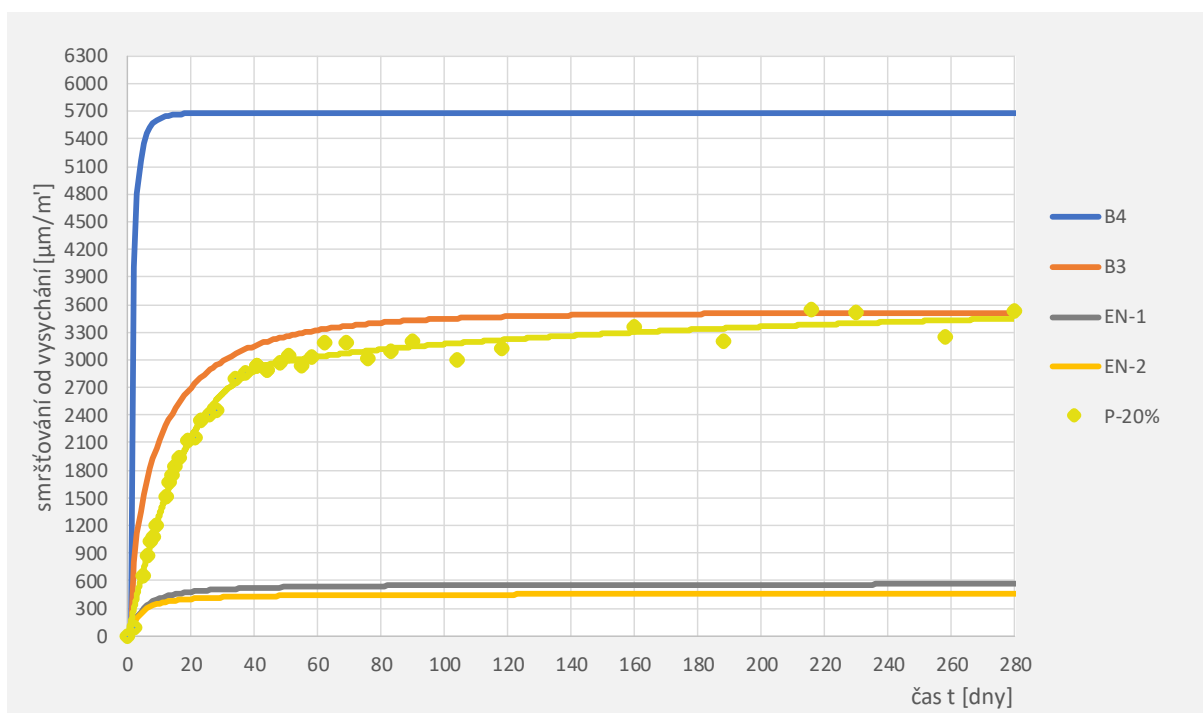
Obr. 3.31



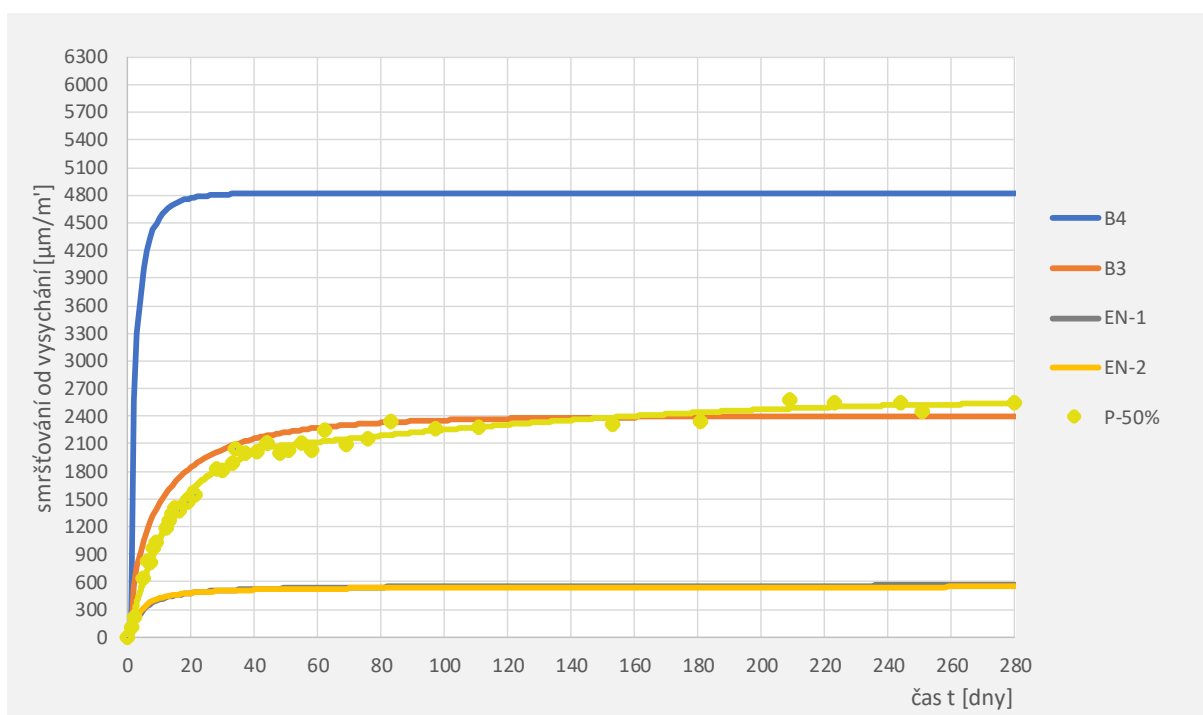
**Komentář k porovnání jednotlivých predikčních modelů v bodech:**

- Na první pohled je zřejmé, že oproti BB vykazují modely s HPC vyšší autogenní smrštění. Výjimkou je model B3, který nerozlišuje mezi autogenním smrštěním a vysycháním;
- Modely respektují fakt, že masivnější prvky vysychají pomaleji;
- Na základě grafů lze konstatovat, že všechny modely pro HPC vykazují celkové smrštění nižší než u BB. Tato pravidla však nemusí platit v každém případě. Pokud snížíme vodní součinitel (HPC) na hodnotu hlouběji pod 0,3, výrazně zvýšíme autogenní smrštění, které pak může přesahovat deformace od vysychání běžných betonů (BB);
- Vývoj smršťování podle ČSN EN 1992-1-1 (EN-1) je zpočátku velmi rychlý, ale zároveň končí zpravidla na nejnižších hodnotách. Lze usoudit, že je smršťování v tomto případě podceňováno;
- Model B4 oproti ostatním modelům překvapivě předpovídá vysoké napětí od vysychání;
- Zajímavé je srovnání HPC modelů B4 a EN-2, kde byla v obou případech zvolena příměs mikrosiliky. Zatímco B4 včetně příměsi vykazuje oproti BB nižší hodnoty, u ČSN modelu EN-2 je to přesně naopak. Dle výsledků provedeného experimentu, kde mikrosilika vykazovala vyšší deformaci než referenční vzorek, se jeví správněji EN-2. Bohužel není možné objektivně porovnat výsledky mikrosiliky z experimentu s křivkou modelu EN-2, protože tento predikční model je nastaven na betonové směsi s obsahem kameniva;
- Velmi optimistický postoj ke smršťování má také model B3, ve všech zvolených variantách vykazuje velmi nízké smrštění. Vývoj toho modelu je velmi pozvolný a často se zastavuje na hodnotách jenom málo přesahující model EN-1;
- Model ČSN EN 1992-2 svými výsledky smršťování často převyšuje vývoj ostatních modelů;
- Model B4 ani v jednom případě nevybočuje od ostatních modelů, vždy se jeho křivka drží mezi křivkami ostatních modelů, díky tomu lze tento model považovat za nejvěrohodnější. Vzhledem ke schopnosti nastavit velmi nízký podíl a/c bude tento model nejvíce objektivní k porovnání naměřených výsledků v experimentu.

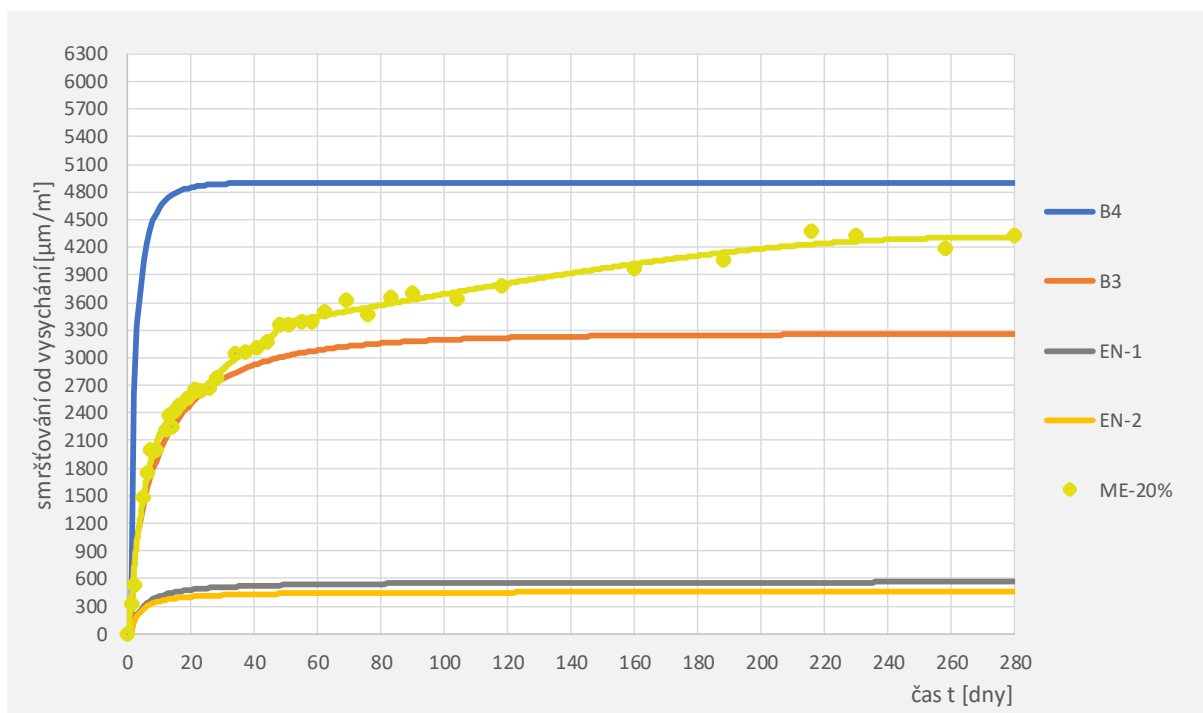
### 3.6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT S VÝPOČETNÍMI MODELY



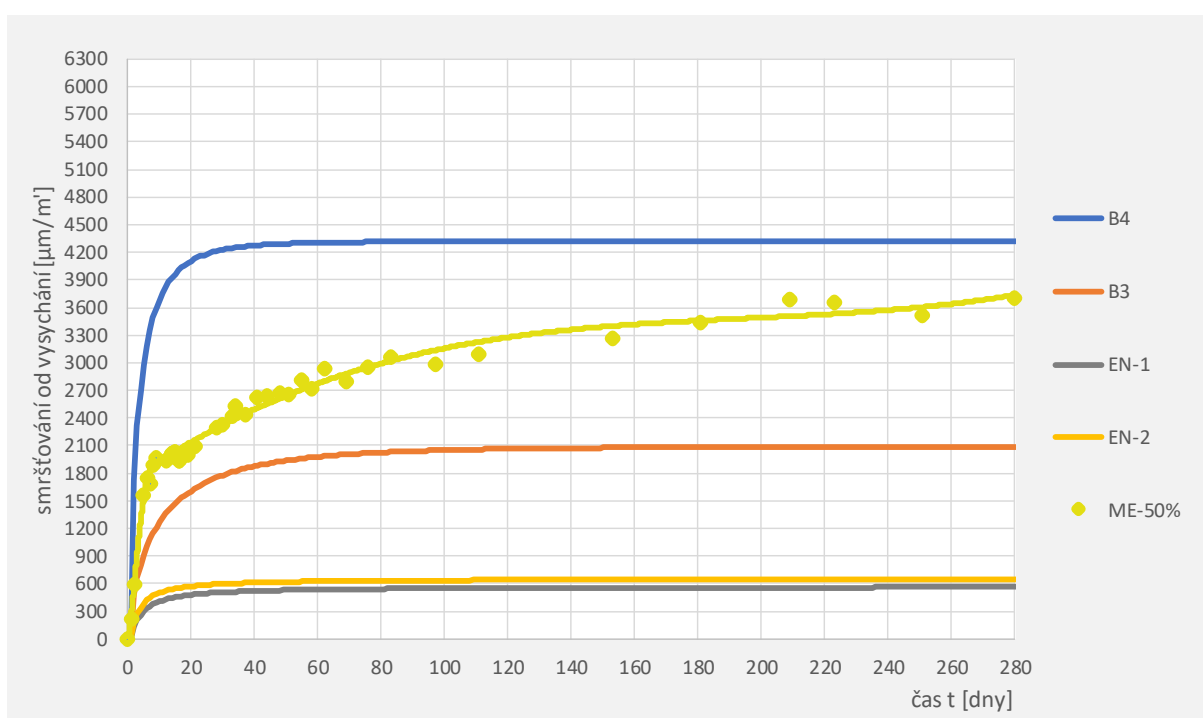
Obr. 3.32 - popílek 20 % v porovnání s predikčními modely



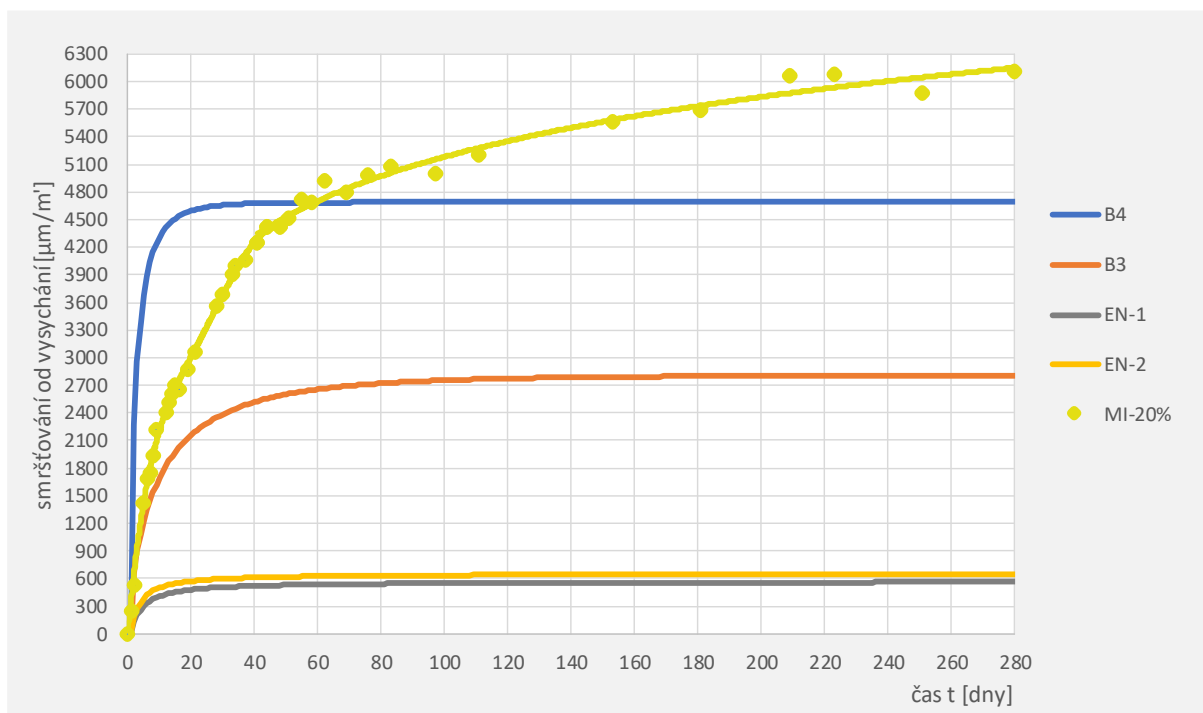
Obr. 3.33 - popílek 50 % v porovnání s predikčními modely



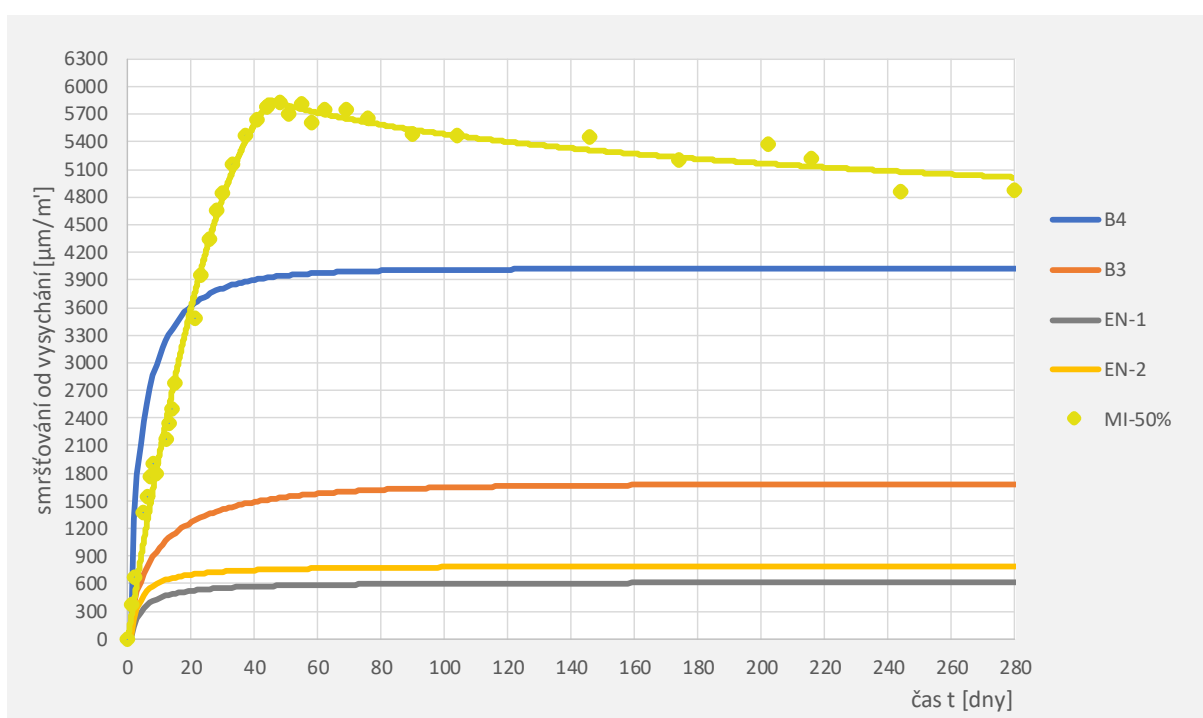
Obr. 3.34 - metakaolin 20 % v porovnání s predikčními modely



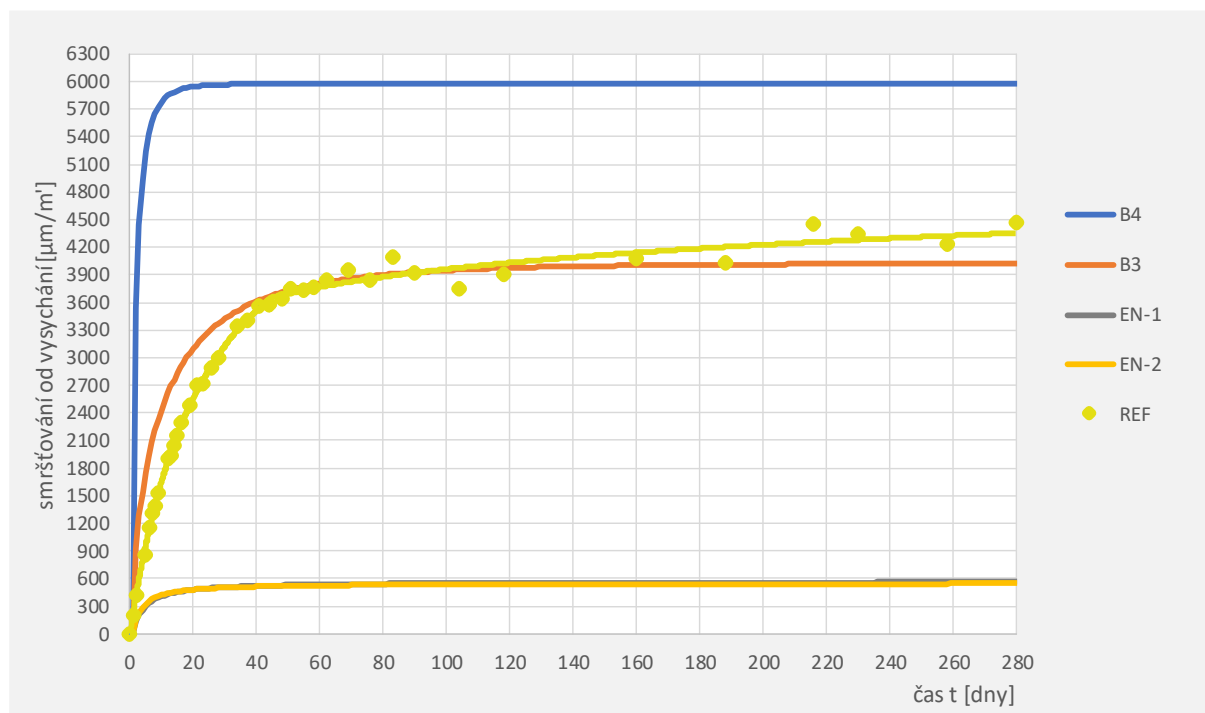
Obr. 3.35- metakaolin 50 % v porovnání s predikčními modely



Obr. 3.36 - mikrosilika 20 % v porovnání s predikčními modely



Obr. 3.37 - mikrosilika 50 % v porovnání s predikčními modely



Obr. 3.38 - referenční vzorek v porovnání s predikčními modely

Již předem bylo zřejmé, že modely eurokódu 2 jsou tvořeny pro betonové prvky a nedokáží zohlednit nízký podíl kameniva. Dále se budeme zabývat pouze modelem B3 a B4.

Téměř bezchybným způsobem jsou popsány vzorky s příměsí popílků 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 vystihnuty. 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 vykazovala v rámci tohoto experimentu extrémně vysoké hodnoty smršťování od vysychání, není překvapující, že výsledné hodnoty daleko přesahují hodnoty získané modelem B4. Za relevantní výsledek pro vyhodnocení můžeme považovat vzorek MI-20, jehož konečná deformace od smršťování přesahuje model B4 o 23%.

## 3.7 ZKOUŠENÍ PEVNOSTI

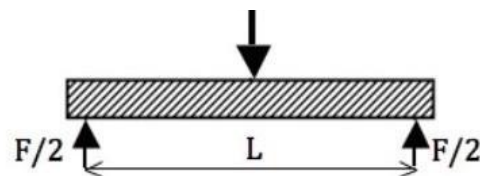
### 3.7.1 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

#### 3.7.1.1 PRŮBĚH ZKOUŠKY, METODA VÝPOČTU

Zkoušené vzorky byly nejprve zváženy a byla změřena jejich geometrie. Ideálně je vhodné zvolit čtyřbodové uspořádání, ale v našem případě bylo vzhledem k absenci kameniva a vláken prováděno pouze třibodové zkoušení, podle požadavků normy. Toto zkoušení sestává z jednoho zatěžovacího válce a dvou válcových kovových podpor o průměru 20 až 40 mm. Rozpon mezi podporami je dle normy 100 mm. Schéma zkoušky tahové pevnosti je na Obr. 1.17. K porušení vzorku u tohoto druhu zkoušení dochází kombinací ohybu a smyku a pevnost je určena ze vztahu (3.5). Vzorky bylo potřeba osadit symetricky do zatěžovacího lisu, kde byly zatěžovány až do vzniku první tahové trhliny. Protože vzorky neobsahovaly výztuž ani vlákna, která by přenášela tahové namáhání, síla působící v okamžiku vzniku první trhliny byla současně rovna maximální síle, resp. napětí, kterému byl průřez schopen odolat. Kompletní zpráva z laboratorního zkoušení se nachází v příloze.



Obr. 3.39 - třibodové zkoušení pevnosti



Obr. 3.40 - schéma třibodového zkoušení [34]

Pevnost vzorku v tahu za ohybu bylo vypočteno ze vztahu:

$$f_t = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} \quad (3.5)$$

Kde,

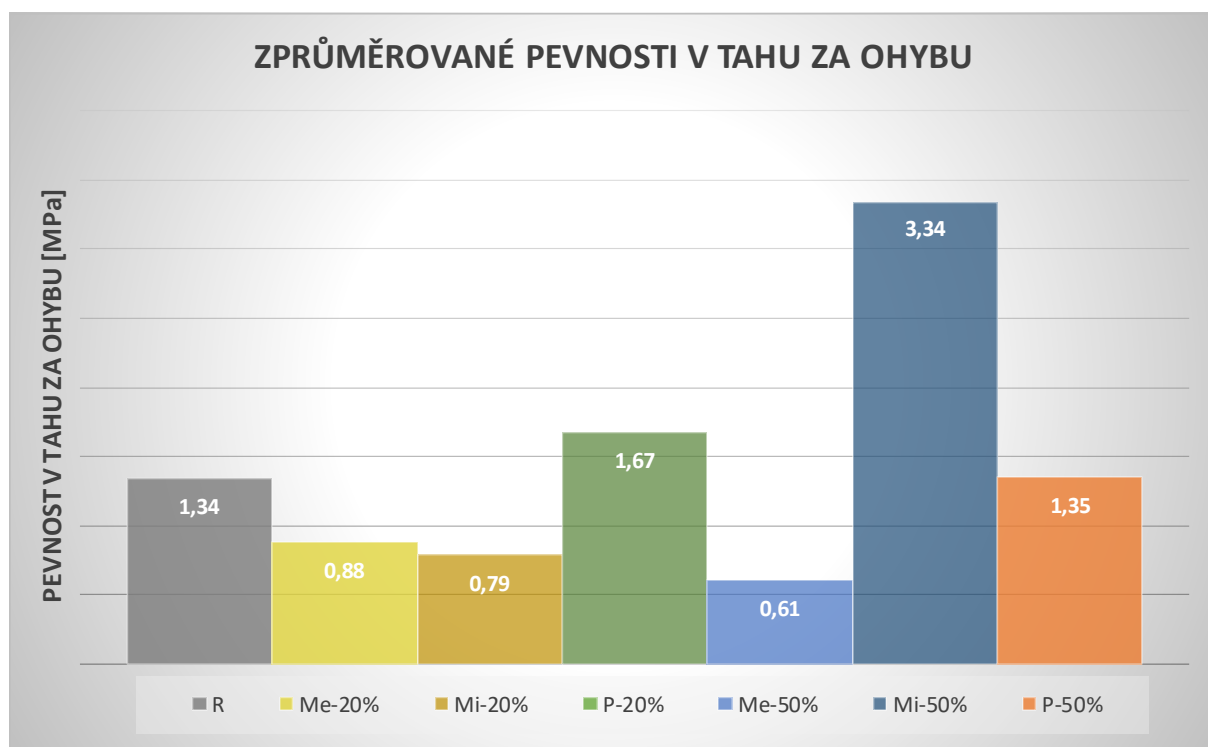
$F$  ... je maximální síla v momentě porušení vzorku [N]

$L$  ... je délka mezi podporami zkušební lisu [mm]

$b$  ... je šířka zkušební vzorku [mm]

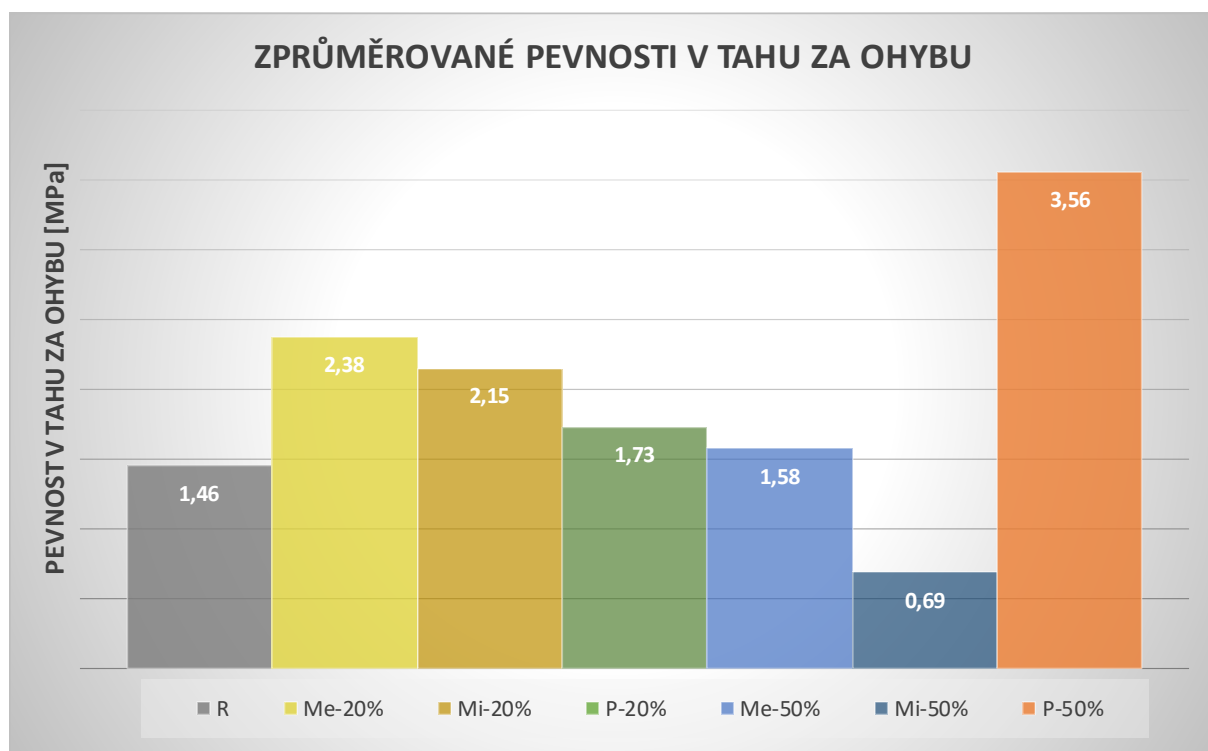
$h$  ... je výška zkušební vzorku [mm]

## 3.7.1.2 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK, PEVNOST V TAHU ZA OHYBU PO 28 DNECH



Obr. 3.41 - výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

## 3.7.1.3 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK, PEVNOST V TAHU ZA OHYBU PO 280 DNECH

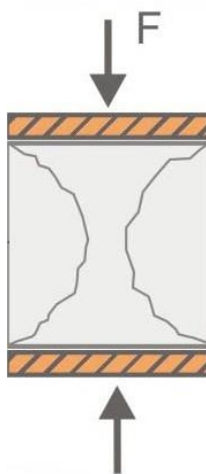


Obr. 3.42 - výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu po 280 dnech

### 3.7.2 PEVNOST V TLAKU

#### 3.7.2.1 PRŮBĚH ZKOUŠKY, METODA VÝPOČTU

Pro tuto zkoušku byl k dispozici dvojnásobný počet vzorků díky předchozí zkoušce tahu za ohybu, kde byly rozděleny trámečku na dvě přibližně stejně velké části. Je potřeba zajistit, aby zkoušený vzorek ležel na středu spodní tlačené desky a byl zatěžován centricky. Při této zkoušce byly vzorky zatěžovány až do porušení ve zkušebním lisu. Tlačné plochy zkušebního lisu jsou broušené desky s tvrdostí povrchu > 55 HCR a horní deska má kloubové uložení. Zatěžuje se plynule rychlostí 0,4 - 0,6 MPa.s<sup>-1</sup>. Z maximálního zatížení při porušení tělesa byla dle vzorce (3.6) vypočtena pevnost vzorku v tlaku.



Obr. 3.44 - schéma zkoušení krychelné pevnosti v tlaku včetně ideálního tvaru porušení [35]



Obr. 3.43 - lis pro zkoušení krychelné pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.6)$$

Kde,

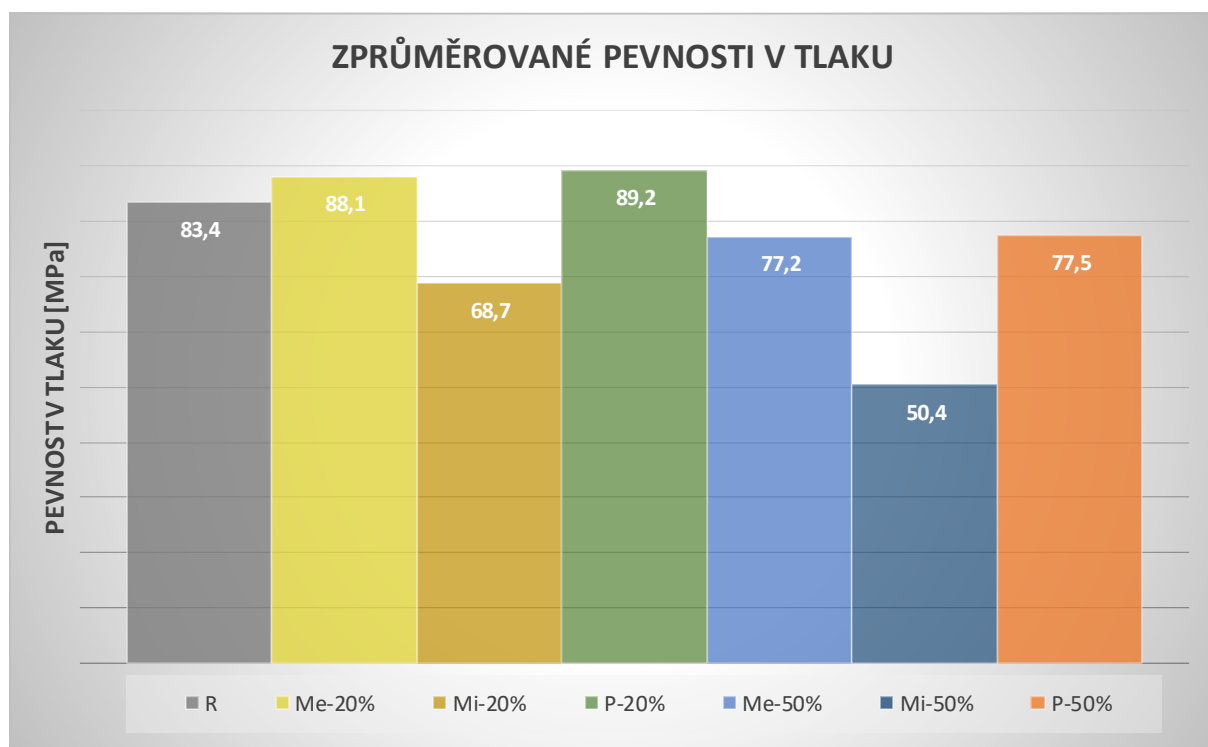
$f_c$  ... je pevnost vzorku v tlaku [MPa]

$F$  ... je maximální síla v momentě porušení vzorku [N]

$A_c$  ... je průřezová plocha zkušebního vzorku [mm<sup>2</sup>]

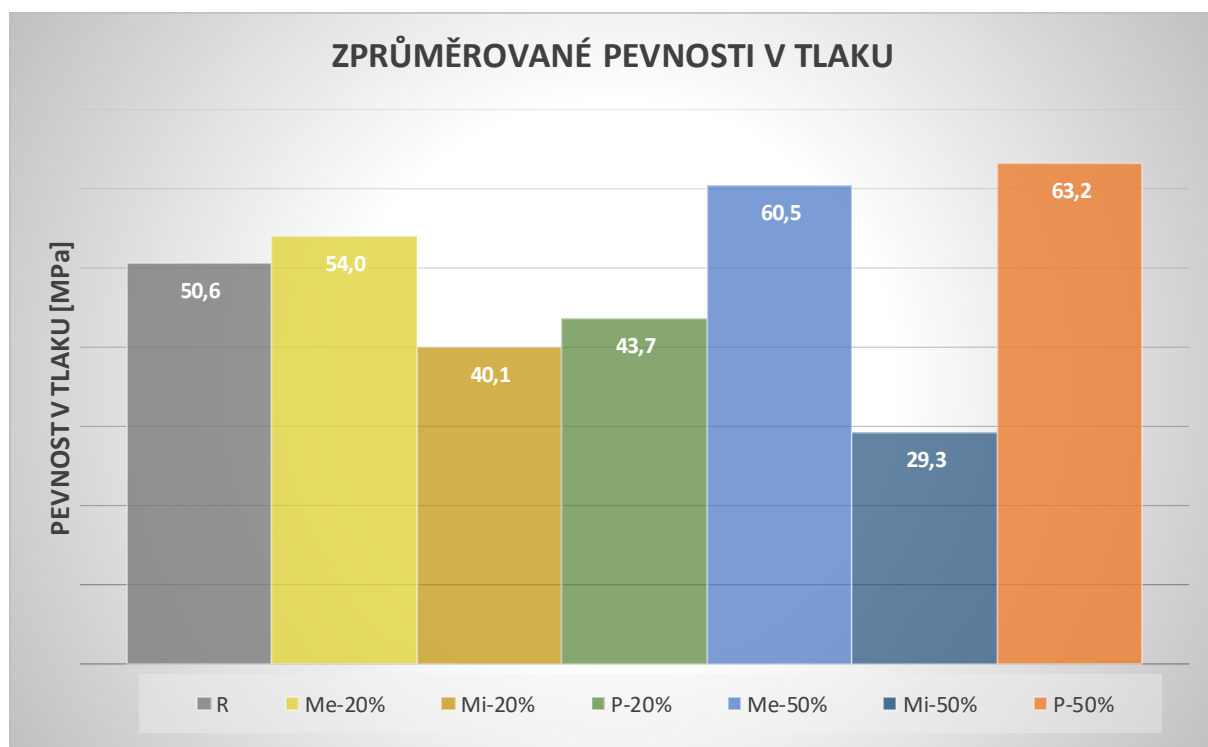


## 3.7.2.2 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK, PEVNOST V TLAKU PO 28 DNECH



Obr. 3.45 - výsledky zkoušek pevnosti v tlaku po 28 dnech

## 3.7.2.3 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK, PEVNOST V TLAKU PO 280 DNECH

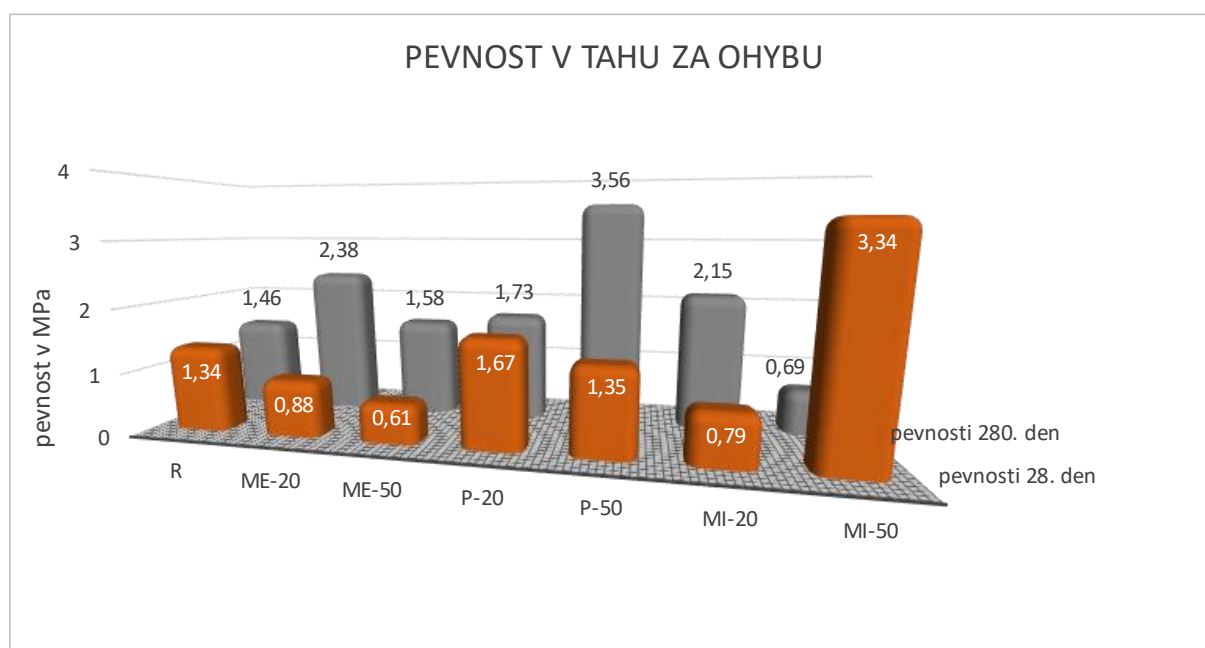


Obr. 3.46 - výsledky zkoušek pevnosti v tlaku po 280 dnech

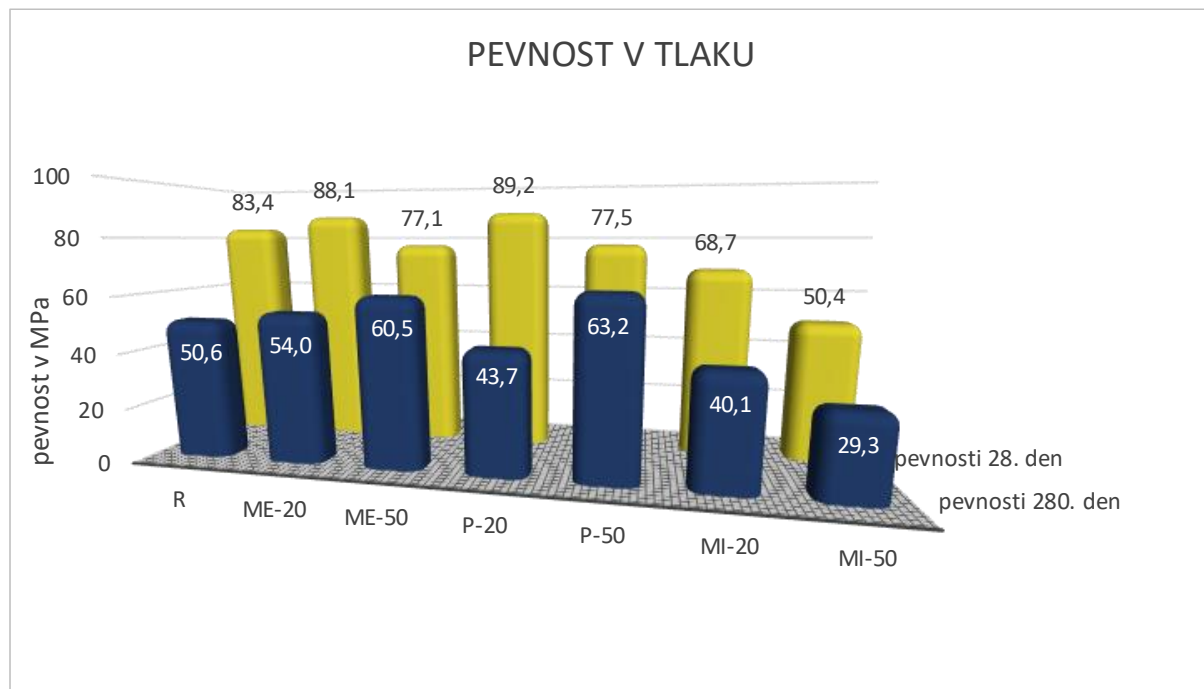
### 3.7.3 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK PEVNOSTI

Tab. 3.7 - shrnutí zkoušek pevnosti

pevnosti v tahu za ohybu [MPa]							
	R	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
28.den	1,34	0,88	0,61	1,67	1,35	0,79	3,34
280.den	1,46	2,38	1,58	1,73	3,56	2,15	0,69
rozdíl v MPa	0,12	1,5	0,97	0,06	2,21	1,36	2,65
<b>rozdíl v %</b>	<b>8,96%</b>	<b>170,45%</b>	<b>159,02%</b>	<b>3,59%</b>	<b>163,70%</b>	<b>172,15%</b>	<b>79,34%</b>
pevnosti v tlaku [MPa]							
	R	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
28.den	83,4	88,1	77,1	89,2	77,5	68,7	50,4
280.den	50,6	54,0	60,5	43,7	63,2	40,1	29,3
rozdíl v MPa	32,8	34,1	16,6	45,5	14,3	28,6	21,1
<b>rozdíl v %</b>	<b>39,33%</b>	<b>38,71%</b>	<b>21,53%</b>	<b>51,01%</b>	<b>18,45%</b>	<b>41,63%</b>	<b>41,87%</b>
objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]							
	R	ME-20	ME-50	P-20	P-50	MI-20	MI-50
28.den	1943	1899	1891	1910	1850	1788	1644
280.den	1705	1686	1687	1705	1734	1582	1367
rozdíl v kg/m <sup>3</sup>	238	213	204	205	116	206	277
<b>rozdíl v %</b>	<b>12,25%</b>	<b>11,22%</b>	<b>10,79%</b>	<b>10,73%</b>	<b>6,27%</b>	<b>11,52%</b>	<b>16,85%</b>



Obr. 3.47 - porovnání zkoušek pevnosti v tahu za ohybu



Obr. 3.48 - porovnání zkoušek pevnosti v tlaku

### 3.7.3.1 KOMENTÁŘE NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ PEVNOSTI

#### **Pevnost v tahu za ohybu**

Zkoušení pevnosti bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 1015-11+A1 [5]. V dnešní době je k dispozici již mnoho experimentů, které se zabývaly zkoušením pevností při různé náhradě příměsí 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.

Po vyloučení 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 příměsmi, 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. Metakaolin má sice druhou nejvyšší pevnost, avšak pokud se podíváme na nezprůměrovaný výsledek (viz příloha), uvidíme, že dva ze tří vzorků vykazovaly pevnosti v tahu za ohybu téměř o polovinu nižší ku zbývajícím a tím se zařadí mezi průměr. Není vyloučeno, že se přihodila stejná chyba jako u mikrosiliky. S výjimkou MI-50 jsou po 280 dnech všechny hodnoty vyšší než u referenčního vzorku, což pokládám za očekávaný a správný výsledek.

### **Pevnost v tlaku**

Zkoušení pevnosti bylo provedeno rovněž podle normy ČSN EN 1015-11+A1 [5]. 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.

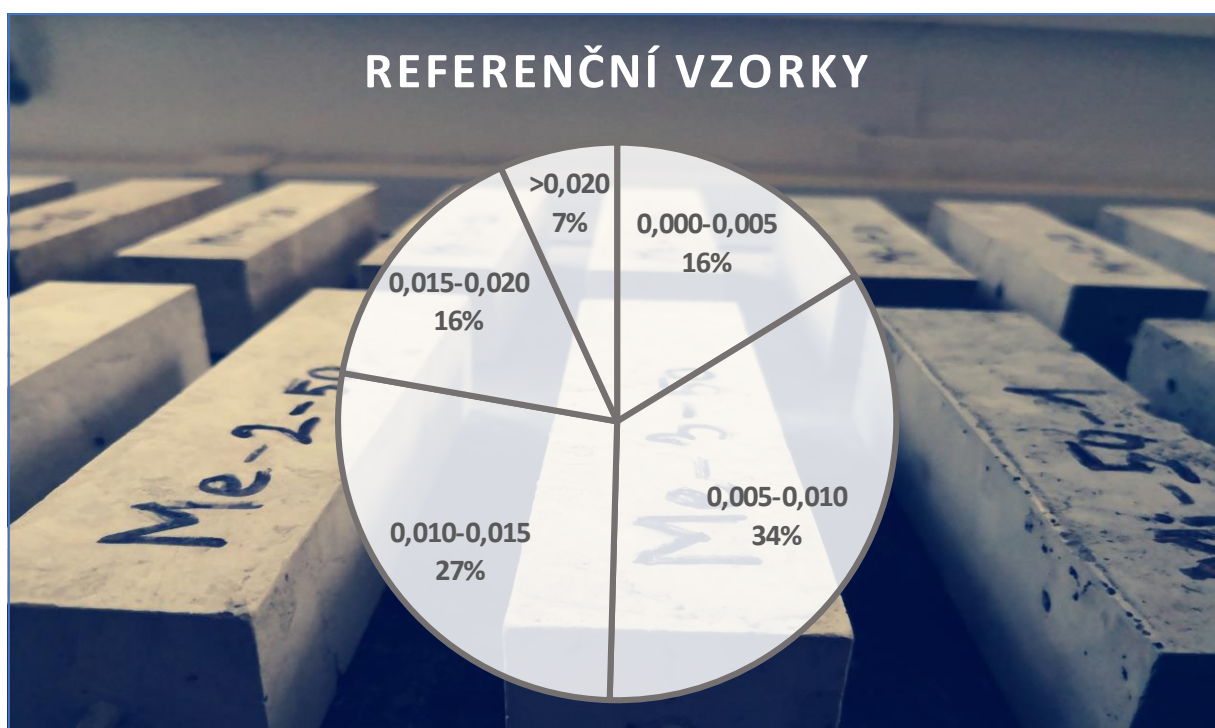
V tomto experimentu se velmi dobře projevila 50% náhrada metakaolinu a popílku – zatímco v obou případech byla pevnost po 28 dnech oproti referenčnímu vzorku nižší, po 280 dnech už to bylo právě naopak, a to až o 25 %. ME-20 vykazuje téměř shodnou pevnost jako referenční vzorek, vyšší vynaložené náklady 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, avšak v případě P-20 musí být snížení pevnosti ovlivněno jiným faktorem, protože objemové změny byly naměřeny nižší než u referenčního vzorku. 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.

### 3.8 CHYBY MĚŘENÍ

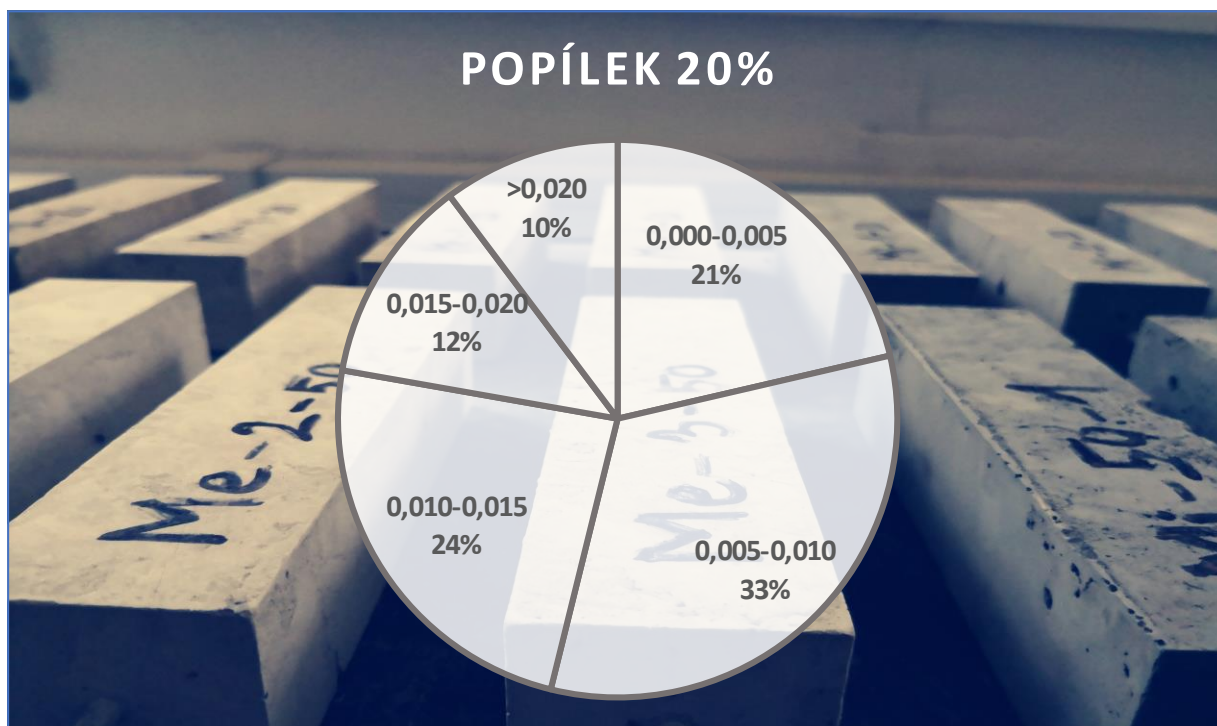
Jedna z možností, jak vyčíslit chybu ručního měření vzorků je pomocí směrodatné odchylky. Pokud by bylo potřeba ještě více zpřesnit výsledky naměřených dat v jednotlivé dny, je možné tak učinit na základě směrodatné odchylky a vyloučit taková měření, která jsou zatížena chybou více, než je přípustné.

Jak již bylo zmíněno, směrodatná odchylka blíže odhalí vzorky, u kterých je větší pravděpodobnost zavedení chyby do vyhodnocených dat. V případě tohoto experimentu byla vnášena chyba měření nedokonale rovnou plochou dřívku šroubu. Níže je v grafech uvedená míra chyby měření u jednotlivých příměsí.

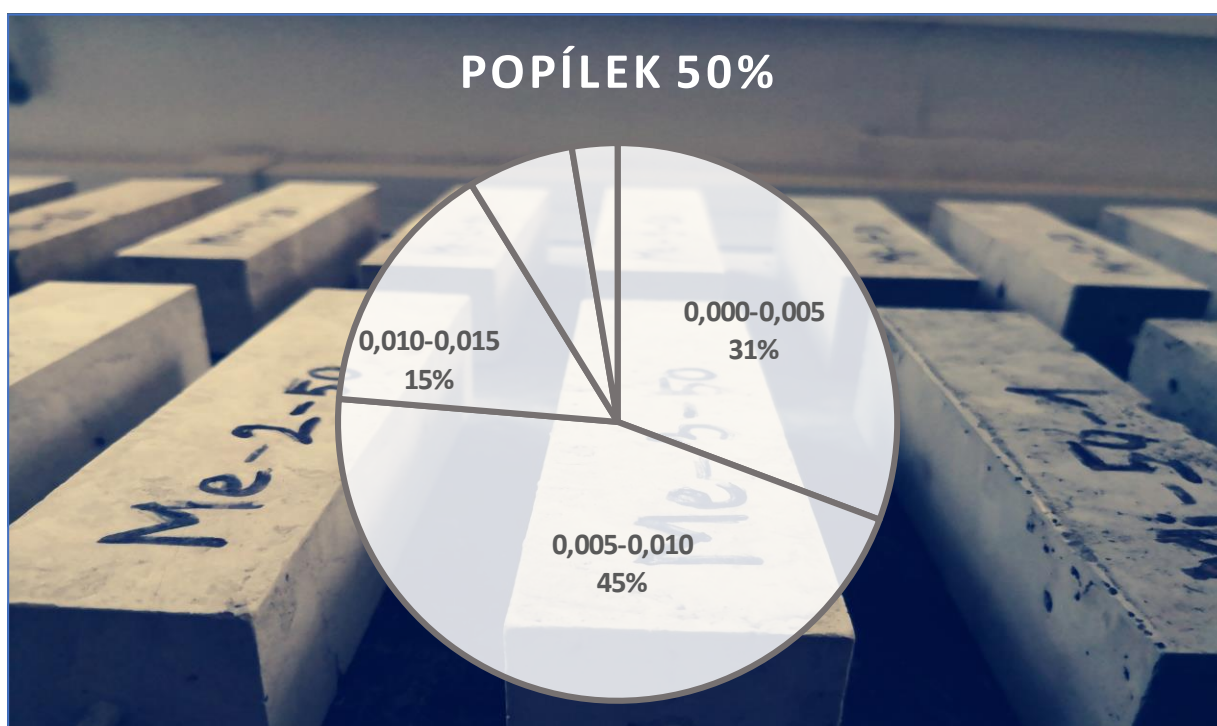
Například v prvním grafu referenčního vzorku je vidět, že nejvíce měření, tj. 35 %, se pohybovalo s odchylkou mezi třemi naměřenými hodnotami od 0,005 do 0,010, což považují za optimální rozmezí. Naproti tomu 7 % měření proběhlo se směrodatnou odchylkou vyšší jak 0,02, což vypovídá o tom, že tyto měření mohou být zavádějící a negativně ovlivňují naměřená data. Taková měření mohou být ze souboru dat vyloučena, aby byl tento faktor eliminován.



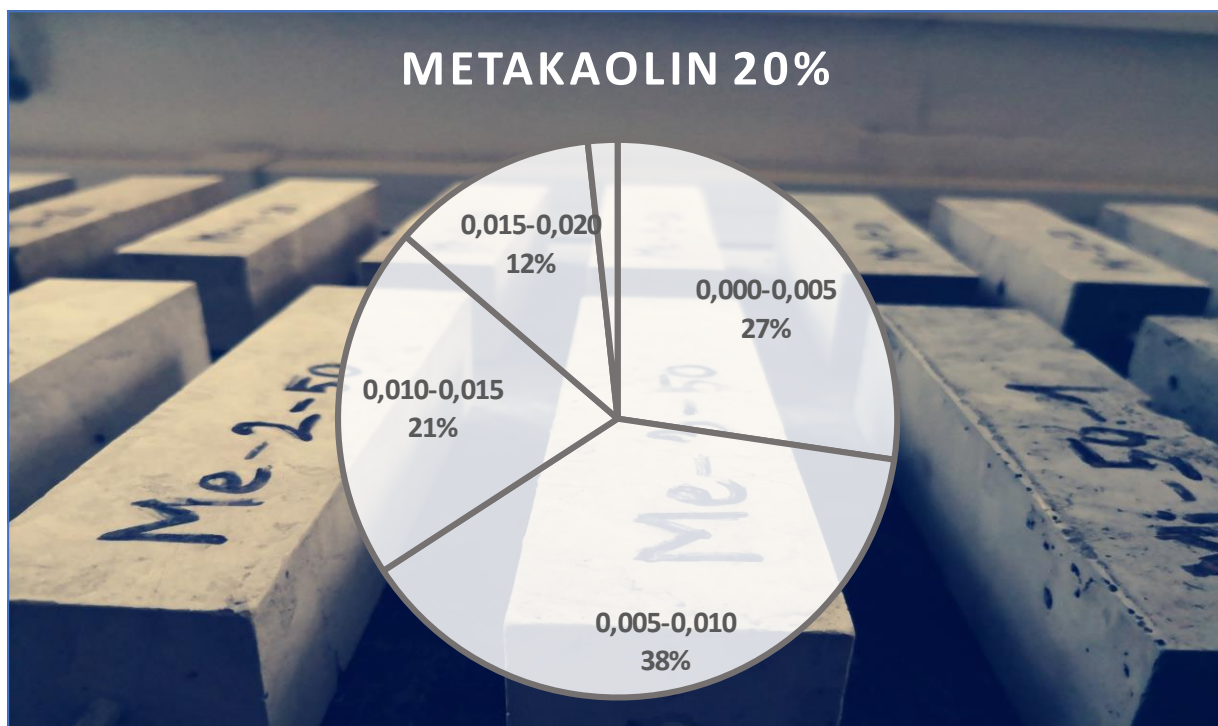
Obr. 3.49 - chyba měření referenčního vzorku



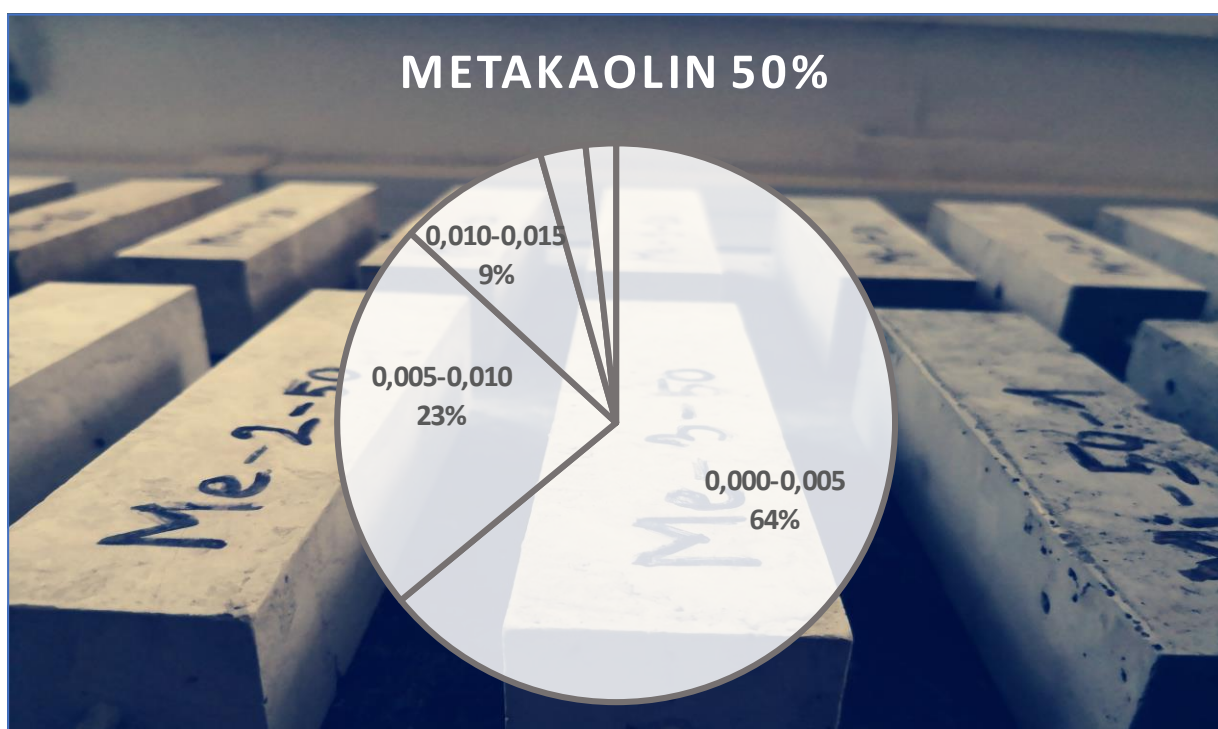
Obr. 3.50 - Chyba měření popílku 20%



Obr. 3.51 - Chyba měření popílku 50%



Obr. 3.52 - Chyba měření metakaolinu 20%



Obr. 3.53 - Chyba měření metakaolinu 50%



Obr. 3.54 - Chyba měření mikrosiliky 20%



Obr. 3.55 - Chyba měření mikrosiliky 50%



**Komentář k výše uvedeným grafům v bodech:**

- V celkovém součtu byla nejvíce měření zaznamenávána s minimální směrodatnou odchylkou do 0,005
- Mezi vzorky, které nejsou nezatížené chybou ručního měření můžeme zařadit metakaolin 50 %, oba vzorky s mikrosilikou a popílek 50 %
- Metakaolin 20 % je zatížený průměrnou chybou měření, kde se směrodatná odchylka pohybuje v rozmezí 0,005-0,015
- Nejvíce nestabilní data byla získána z referenčního vzorku a popílku 20 %, kde občas odchylka přesahuje hodnotu 0,02.

## 4 ZÁVĚR

První část diplomové práce si kladla za cíl seznámit čtenáře se základním principem hydratace cementu. Byly vysvětleny faktory přímo související se smršťováním jako je tuhnutí a tvrdnutí cementu, vodní součinitel a porézní mikrostruktura. Po přečtení této části je zcela jasné, že voda ovlivňuje téměř veškeré vlastnosti a chování čerstvého a ztvrdlého betonu. Dále byly představeny druhy smršťování a bylo vysvětleno v jaké fázi stárí betonu a proč vzniká. V neposlední řadě zde byly podrobně rozebrány matematické modely pro výpočet smršťování. Jedná se v současné době o jedny z nejvíce používaných modelů v praxi, první dva modely (B3 a B4) patří autorovi prof. Bažantovi a ostatní dva náleží eurokódu 2. V závěru této kapitoly byly uvedeny vybrané studie o působení jednotlivých příměsí na smršťování.

Experimentální část odpovídá názvu této práce a zabývá se vlivem příměsí betonu na smršťování cementové matrice. 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. V této části byl také popsán průběh měření, a nakonec je proveden rozbor naměřených dat a jejich porovnání. V rámci experimentu byl vytvořen program pro výpočet smršťování dle matematických modelů, které byly podrobně popsány v teoretické části. 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.

Ze studií, které jsou rozvedené v teoretické části je patrné, že mikrosilika dosahuje ze všech příměsí nejvyšší objemové změny, a to i v případě, kdy receptura obsahuje kamenivo. Tento předpoklad byl v rámci provedeného experimentu potvrzen. Mezi rozebranými studii najdeme také recepturu bez kameniva, která dosahuje hodnot objemových změn v řádu tisíců  $\mu\text{m}/\text{m}$ , není tedy překvapením, že některé vzorky dosahovaly hodnot i přes 5000  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vzhledem k tomu, že se nepodařilo najít srovnatelnou studii, která by se věnovala porovnání více příměsí za stejných podmínek, bylo velmi obtížné, vytvořit si představu o tom, v jakém rozmezí by se měla naměřená data pohybovat.

Analýzou výsledků bylo dospěno k závěru, že neoptimálnější predikční model pro práci se směsmi z 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 nebo jen za nízkého procentuálního zastoupení. Naopak lze jen doporučit příměs z popílků, jehož cena je někdy i nižší, než bývá cena cementu a tím pádem je možné zvolit také vyšší náhrady cementu i díky svým 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.

## PŘÍLOHY

### PŘÍLOHA A

- A1. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – referenční vzorek
- A2. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – popílek 20 %
- A3. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – popílek 50 %
- A4. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – metakaolin 20 %
- A5. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – metakaolin 50%
- A6. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – mikrosilika 20 %
- A7. Kompletní seznam zaznamenaných hodnot smršťování – mikrosilika 50 %
- A8. Zprůměrované hodnoty smršťování pro účely vyhodnocení – všechny příměsi

### PŘÍLOHA B

- B1. Kompletní zpráva z laboratorního zkoušení po 28 dnech
- B2. Grafické zobrazení výsledků zkoušení všech vzorků po 28 dnech
- B3. Kompletní zpráva z laboratorního zkoušení po 280 dnech
- B4. Grafické zobrazení výsledků zkoušení všech vzorků po 280 dnech

### PŘÍLOHA C

- C1. Ukázka programu v excelu – vstupní parametry, použité koeficienty, výstupy v podobě autogenního smršťování a smršťování od vysychání (pro ukázkou byl použit vzorek P-50)

## ZDROJE

### NORMY:

- [1] ČSN EN 206+A1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2017
- [2] ČSN EN 197-1, *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. ed. 2*. Praha ÚNMZ, 2012.
- [3] ČSN EN 1992-1-1 – Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*.
- [4] ČSN EN 1992-2 – Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*.

- [5] ČSN EN 1015-11+A1. *Zkušební metody malt pro zdivo – část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku.*

## LITERATURA A INTERNETOVÉ ZDROJE:

- [6] PYTLÍK Petr. *Technologie betonu.* V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2000. ISBN 80-214-1647-5
- [7] SCHUTTER De Geert, BARTOS J.M. Peter, DOMONE Peter, GIBBS John a HELA Rudolf. *Samozhutnitelný beton.* V Praze: Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [8] MÁCA Petr. *Concrete containing metakaolin admixture.* V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2010. ISBN 978-3-659-55581-7.
- [9] *Thermal cracking in concrete at early ages.* V Mnichově: Institute of building materials, Technical university of Munich, Germany, 1995. ISBN 0-419-18710-3
- [10] AITCIN Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton.* V Praze: ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9
- [11] TAYLOR Harry F. W. *Cement chemistry.* V Londýně: Thomas Telford services Ltd, London, E144JD. ISBN 0-7277-2592-0
- [12] VESELÝ Vladimír. Téma 4 – tuhnutí betonu, konzistence. BETON TKS s.r.o., Praha, 2017, vydání 4/17.
- [13] VINKLER Marek, *Voda v betonu,* BETON TKS s.r.o., Praha, 2018, vydání 2/18.
- [14] VINKLER Marek, VÍTEK Jan L., *Vysychání a smršťování betonu,* BETON TKS s.r.o., Praha 2016, vydání 2/16.
- [15] ZONGJIN Li. *Advanced concrete technology.* John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2011. ISBN 978-0-470-43743-8.
- [16] BAŽANT, Z. P., BAWEJA, S.: *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3,* ACI Special publication creep and shrinkage of concrete, A. Al-Manaseer, Editor, 2000
- [17] BAŽANT, Z. P. et al.: *RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability,* Materials and structures 48 (2015).
- [18] *Technologie betonu, 8. konference.* V Praze: Česká betonářská společnost ČSSI, 2009. ISBN 978-80-871158-13-5.

- [19] *Technologie betonu, 9. konference*. V Praze: Česká betonářská společnost ČSSI, 2010. ISBN 978-80-871158-13-5.
- [20] COLLEPARDI Mario. *Moderní beton*. V Praze: ČKAIT, 2006. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [21] CHYTLÍK Roman, FLÁDR Josef, BÍLÝ Petr, TRTÍK Tomáš a VRÁBLÍK Lukáš. *Experimental and numerical analysis of shrinkage behaviour of different types of concrete mixtures*. České vysoké učení technické v Praze, katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [22] BROOKS J.J., MEGAT Johari M.A., *Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete*, Cement and concrete composites, 2012, 34/6.
- [23] HASSAN Assem, LACHEMI Mohamed, HOSSAIN Khandaker. *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cement and concrete composites, 2001, 23/6.
- [24] KRISTIAWANA Stefanus, ADITYAB Taib. *Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete*. Procedia Engineering, 2015, 125
- [25] YANG Tao, ZHU Huajun, ZHANG Zuhua. *Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars*. Construction and Building Materials. 2017, Volume 153.
- [26] ZHANG M.H., TAM C.T., LEOW M.P. *Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete*. Cement and concrete research. 2003, Volume 33.
- [27] KASAL Pavel, HELA Rudolf, FINKOUS Petr a LORENC Václav. *Technická pravidla ČBS 03 (2018) Pohledový beton*. V Praze: Česká betonářská společnost ČSSI, 2018. ISBN 978-80-906759-3-3.
- [28] ALTOUBAT Salah, LANGE A. David. *Creep shrinkage and cracking of restrained concrete*. University of Illinois at Urbana-Champaign, department of civil and environmental engineering. [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/237544826\\_Creep\\_Shrinkage\\_and\\_Cracking\\_of\\_Restrained\\_Concrete\\_at\\_Early\\_Age](https://www.researchgate.net/publication/237544826_Creep_Shrinkage_and_Cracking_of_Restrained_Concrete_at_Early_Age)
- [29] MCT [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/barveni-betonovych-vyroby/>
- [30] *Vliv objemových změn na výskyt trhlin v betonových podlahách*. [online], [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.obcanskavystavba.cz/2007/07/vliv-objemovych-zmen-na-vyskyt-trhlin-v-betonovych-podlahach/>

- [31] TIPKA Martin. *Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu*. České vysoké učení technické v Praze, katedra betonových a zděných konstrukcí, 2011.
- [32] HARISH K. V., RANGARAJU P. R. *Effect of blended fly ash in mitigating alkali-silica reaction*. [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://home.iitk.ac.in/~kvharish/publications/blending%20of%20fly%20ashes.pdf>

## ZDROJE OBRÁZKŮ

- [33] [online]. Royal society of chemistry [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: [https://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/RA/c4ra06306f/c4ra06306f-f1\\_hi-res.gif](https://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/RA/c4ra06306f/c4ra06306f-f1_hi-res.gif)
- [34] [online]. Mechanické vlastnosti polymerů [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/images/pics/68.jpg>
- [35] [online]. ebeton [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/sites/default/files/pictures/Usporadani%20%20pro%20zk%20bet%20v%20tlaku.jpg>
- [36] Microstructure of metakaolin[online]. Researchgate [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/261375213/figure/fig4/AS:214202867294211@1428081351171/Microstructure-of-metakaolin-through-field-emission-scanning-electron-microscope-FESEM.png>