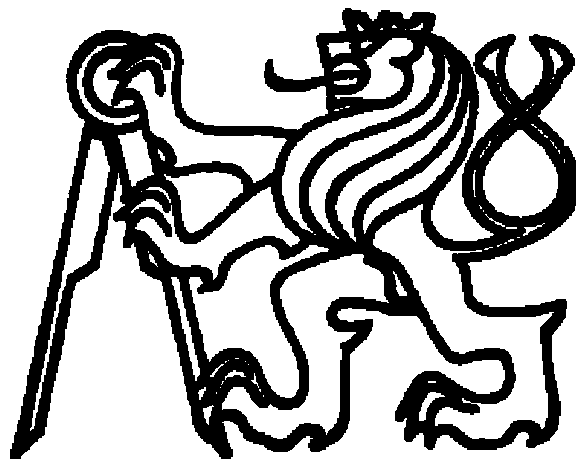


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra mechaniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

8. 1. 2017

Bc. Milan Jaukl



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jaukl	Jméno: Milan	Osobní číslo: 380130
Zadávací katedra: K 132 - Katedra mechaniky		
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství		
Studijní obor: (3608T008) Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv PVA na vlastnosti cementového kompozitu s recyklovaným betonem	
Název diplomové práce anglicky: Effect of PVA on properties of a cementitious composite with recycled concrete	
Pokyny pro vypracování: 1) Zpracování rešerše na dané téma. 2) Zhotovení vzorků z cementové malty. 3) Zkoumání základních a mechanických vlastností pomocí nedestruktivních a destruktivních metod. 4) Vyhodnocení výsledků a zdůvodnění závěrů.	
Seznam doporučené literatury: Články z databáze WoS a Scopus.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 10.10.2016	Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Milan Jaukl

Název diplomové práce: Vliv PVA na vlastnosti recyklovaného betonu

Základní část: podíl: 75 %

Formulace úkolů: 1) Zpracování rešerše na dané téma.

2) Zhotovení vzorků z cementové malty.

3) Zkoumání chemických, fyzikálních a mechanických vlastností nedestruktivní a destruktivní zkouškou.

4) Vyhodnocení výsledků.

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Pevnost cementové malty v ohybu, v tlaku. podíl: 25 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Josef Fládr, Ph.D., K 133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí

Formulace úkolů: Provedení destruktivních zkoušek

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Pavla Tesárka, Ph.D. a specialisty Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 8. 1. 2017

Bc. Milan Jaukl

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady. Také panu Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za provedení destruktivních zkoušek a Ing. Zuzaně Jandové za pomoc při měření dynamického modulu pružnosti. V neposlední řadě chci také poděkovat svojí rodině a přátelům. Práce byla podpořena projektem ČVUT v Praze pod číslem SGS16/201/OHK1/3T/11.

Téma

**Vliv PVA na vlastnosti cementového kompozitu
s recyklovaným betonem**

**Effect of PVA on Properties of a Cementitious
Composite with Recycled Concret**

Abstrakt

Obsahem diplomové práce je zjištění vlastností cementového kompozitu s recyklovaným betonem modifikovaným různým množstvím polyvinylalkoholem. Pozornost zaměřena především na optimalizaci zpracovatelnosti s ohledem na množství polyvinylalkoholu. Studium je zaměřeno především na charakteristiku polyvinylalkoholu spojenou s výslednými mechanickými vlastnostmi vzorků. Vlastnosti byly zkoumány po dobu 28 dní nedestruktivními metodami. Po uplynutí 28 dnů byly na vzorcích provedeny destruktivní zkoušky. Byla provedena zkouška ultrazvukovou impulsivní metodou, rezonanční metodou, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymery, polyvinylalkohol, portlandský cement, cementová malta, recyklovaný beton, destruktivní a nedestruktivní zkoušky, mechanické a fyzikální vlastnosti, struktura betonu

Anotation

The subject of the diploma thesis is to determine the properties of a cementitious composite with recycled concrete modified with various amounts of polyvinyl alcohol. Attention focused on optimizing processability with respect to the amount of polyvinyl alcohol. The study is focused primarily on the characteristics of polyvinyl alcohol coupled with the resulting mechanical properties of the samples. Properties were investigated for 28 days non-destructive methods. After the expiry of 28 days was carried out on samples destructive tests. Test was performed in an ultrasonic impulsive method, resonance method, flexural strength and bending strength.

KEY WORDS

Polymers, polyvinyl alcohol, Portland cement, cement mortar, recycled concrete, destructive and non-destructive testing, mechanical and physical properties, concrete structure

Obsah

ÚVOD.....	10
TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 Cement a beton.....	11
1.1 Cement.....	11
1.1.1 Druhy cementu.....	11
1.1.2 Portlandský cement.....	12
1.2 Beton.....	13
1.2.1 Klasický beton.....	13
1.2.2 Voda.....	14
1.2.3 Recyklovaný beton.....	15
2 Polymery.....	16
2.1 Úvod.....	16
2.2 Základní vlastnosti polymerů.....	16
2.2.1 Fázový stav.....	17
2.2.2 Molekulová hmotnost.....	17
2.3 Výroba polymerů.....	18
2.3.1 Polymerace.....	18
2.3.2 Polyadice.....	18
2.3.3 Polykondenzace.....	18
2.4 PVA.....	18
2.4.1 Úvod.....	18
2.4.2 Historie a výroba.....	19
2.4.3 Charakter a vlastnosti PVA.....	20
2.4.4 Využití PVA.....	21
2.5 Využití polymerů ve stavebnictví.....	21
2.5.1 PVA jako modifikátor cementového kompozitu.....	21
2.5.2 PVA jako agregát předúpravy povrchu materiálů.....	27
2.5.3 PVA jako výztuž.....	28
2.5.4 Účinky PVA na lomové povrchy materiálů na bázi cementu.....	28
2.5.5 Účinky PVA na strukturu mezifázové přechodové zóny.....	28
2.5.6 Výzkum pro budoucí rozvoj.....	29

PRAKTICKÁ ČÁST	30
3 Výroba vzorků.....	30
4 Testování vzorků	35
4.1 Smrštění	35
4.2 Dynamický modul pružnosti.....	36
4.2.1 Metoda rezonanční	36
4.2.2 Metoda impulsová	40
4.2.3 Vyhodnocení.....	42
4.3 Pevnost v tahu za ohybu	47
4.3.1 Vyhodnocení.....	50
4.4 Pevnost v tlaku.....	55
4.4.1 Měření.....	55
4.4.2 Vyhodnocení.....	57
4.5 Diskuze	60
4.5.1 Zpracovatelnost	60
4.5.2 Pórovitost.....	60
4.5.3 Vysychání a nasákavost.....	62
4.5.4 Pevnost v tahu za ohybu a tlaku	63
ZÁVĚR.....	64
PŘÍLOHY.....	65
Použitá literatura.....	84

ÚVOD

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaké vlastnosti bude mít cementový kompozit s betonovým recyklátem a PVA. Aby čtenář mohl naplno porozumět problematice, rozdělil jsem diplomovou práci na část teoretickou a část praktickou.

V teoretické části jsem okrajově popsal všechny použité materiály, jako jsou cement, recyklovaný beton, vodu a PVA, jakožto hlavní předmět mé práce jsem PVA popsal detailně. Začal jsem polymerama, až jsem se dostal k PVA, jeho historii, vzniku, fázových stavů, charakteristických vlastností až po celosvětové studie, které se provedli s tímto ve vodě rozpustným syntetickým polymerem.

V praktické části jsem podrobně rozebral vznik trámečků z cementového kompozitu až po jejich zničení destruktivními metodami. Mezi tím než budou vzorky zničeny, seznámím čtenáře s dalšími nedestruktivními metodami, díky nimž mohu spolehlivě posoudit, jaká vliv PVA na cementový kompozit má. Pro každou zvolenou metodu, ať už to byla metoda destruktivní či nedestruktivní, jsem popsal zvolené metody a přístroje, které jsem použil, jako například stanovení dynamického modulu pružnosti, dynamického modulu ve smyku, pevnosti v tlaku za ohybu, pevnosti v tlaku. Na konci praktické části jsem provedl diskuzi k dané zkoušce, respektive vyhodnocení, které jsem porovnal se studii, popsány v teoretické části a vysvětlil chování PVA, zda zlepšuje či zhoršuje vlastnosti cementového kompozitu a vysvětlil proč tomu tak je. Celá praktická část je doplněna fotografiemi, obrázky a grafy, které celý tento proces doplní do dokonalosti.

Na závěr jsem provedl krátké shrnutí celé diplomové práce a použitých materiálů. V bodech vypsal výsledky vyhodnocení, ke kterým jsem došel. A naznačil jsem použití cementového kompozitu v konstrukčních prvcích v praxi.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Cement a beton

1.1 Cement

Cement má původ už ve starém Římě. Cementem staří Římané nazývali zdivo podobné cementu. V dnešní době je slovo cement použité v užším významu. Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Po ztvrdnutí si zachovává pevnost a stabilitu i pod vodou. Používá se ve stavebnictví zejména jako pojivo do betonu [Adámek, 2008]. Zmíněná definice je nejběžnější vysvětlení, co vlastně cement znamená. V odbornějších literaturách se často vyskytuje název silikátový cement. Je to nejčastěji používaný cement, z tohoto důvodu se v názvu silikátový vynechává, proto uvedené slovo budu vynechávat i já v dalších kapitolách.

1.1.1 Druhy cementu

Cement je polydisperzní látka s hydraulickými vlastnostmi. Obsahuje jemně rozemletý křemičitanový slínek a přísady – sádrovec. Dále může obsahovat pucolánové látky, jako jsou granulovaná vysokopecní struska, popílek, vápencová moučka nebo láva. Základní charakteristika, rozdělení cementů do pevnostních tříd a jejich složení je specifikováno v ČSN *P ENV 197-1 Cementy. Složení, jakostní požadavky a kritéria pro stanovení shody*. Cementy pro obecné použití se podle evropské předběžné normy označují značkou CEM a dalšími číselnými a písemnými symboly.

Druhy cementů pro obecné použití podle ENV 197-1:

- I – Portlandský
- II – Portlandský cement směsný
- III – Vysokopevnostní cement
- IV – Pucolánový cement
- V – Směsný cement

Podle této normy se dělí cementy na tři pevnostní třídy cementu:

32,5;32,5 R; 42,5; 42,5 R; 52,5; 52,5 R (pevnost v tlaku v MPa)

1.1.2 Portlandský cement

Název portlandský cement pochází od anglického města Portlandu, v jehož okolí se těžil kámen, připomínající svým vzhledem výrobky z cementu. Portlandský cement byl poprvé vyroben ve Velké Británii na počátku 19. století. Je to nejpoužívanější druh cementu na výrobu betonu a malty.

Výroba cementu pro tuto práci není tak zásadní. Ale za zmínku stojí to, že při výrobě cementu jsou důležité dvě věci vysoké teploty a dostatečný přísun kyslíku. Při vysokých teplotách okolo 1 300 °C dochází k spékání původně práškovitého kompozitu a postupným nabalováním rozžhavených částic vzniká slínek v podobě několika centimetrových valounů. Ději se říká slinovací proces.

Slínek je tedy základní surovinou pro výrobu cementu. Je složený ze slínkových minerálů, z nichž jsou čtyři považovány za významné, protože jsou v cementu obsaženy z 90-ti %. Jsou to: trikalciumpilikát (křemičitan trojvápenatý, C₃S, alit), dikalciumpilikát (křemičitan dvojvápenatý, C₂S, belit), trikalciumaluminát (hlinitan trojvápenatý, C₃A), tetrakalciumaluminátferit (hlinitoželezitančtyřvápenatý, C₄AF, celit). Minerály se podílejí na vlastnostech cementu, každý ovlivňuje vlastnosti cementu svými charakteristickými vlastnostmi.

Alit nabývá pevnosti v počáteční době do 28 dní, tvoří asi polovinu objemu cementu. Způsobuje vysokou pevnost a vysoké hydratační teplo. Belit naopak vytvrzuje až po 28 dnech je charakteristický nízkým hydratačním teplem. Odpovídá za konečné pevnosti, díky pomalé reaktivitě a hydrataci. Hydrát zmiňovaných minerálů se nazývá „C-S-H“ gel. Trikalciumaluminát se v přírodě nevyskytuje, vyznačuje vysokým hydratačním teplem. Považuje se za nejreaktivnější slínkový minerál, podílí se na vysokých počátečních pevnostech.

Minerál	Systematický název	Zkratka	Obsah v portlandském slínku [%]	Teplota tvorby [°C]	Hydratační teplo [kJ/kg]	Rychlost hydratace
Alit	trikalciumpilikát	C ₃ S	37 - 75	od 1250	500	rychlá
Belit	dikalciumpilikát	C ₂ S	5 - 40	od 700	250	střední
Amorfní fáze	trikalciumaluminát	C ₃ A	9 - 14	od 900	910	velmi rychlá
Brownmillerit	tertakalciumpilikát ferit	C ₄ AF	3 - 15	od 700	420	rychlá

Tabulka 1: Hlavní minerály portlandského cementu

1.2 Beton

Beton je kompozitní látka vznikající ztvrdnutím směsi jeho základních složek, a to cementu jako nejčastějším typu pojiva, kameniva (písku, šterku, drtě) jako plniva a vody. Je to druh staviva, které lze definovat jako umělý kámen [Svoboda, 2007].

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Má vlastnosti, jež nemohou být dosaženy, kteroukoliv složkou samostatně, ani prostou sumací [Hela, 2005].

Vlastnosti betonu jsou ovlivňovány buď primárně, což je skladbou a poměrem jeho základních složek, nebo sekundárně účinkem okolního prostředí (např. teplota, vlhkost). Pro upravení nebo zlepšení vlastností se do betonu přidávají vhodné příměsi a přísady.

Beton je charakteristický velmi dobrou pevností v tlaku, ale i lomovou křehkostí. Oproti tomu je také charakteristický velmi malou pevností v tahu a v tahu za ohybu, která je 1/10-1/12 menší než pevnost v tlaku.

1.2.1 Klasický beton

Klasický beton se skládá z cementu (pojiva), kameniva (plniva) a vody, a také z i příměsí a přísad. Cement je vysvětlen v kapitole 1. Smícháním s vodou vznikne cementový tmel, který obalí kámen. Postupně tuhne a tvrdne a mění se v cementový kámen.

Kamenivo

Kamenivo je zde jako pevná kostra. Vlastnosti kameniva mají vliv na výslednou pevnost v tlaku betonu. Proto je vhodné kamenivo hutné a těžké. Kamenivo do betonu se vybírá podle takzvané křivky zrnitosti. Vzniká při stanovení zrnitosti kameniva. Stanovení zrnitosti je metoda, při níž se vzorek o určité hmotnosti prosévá sadou normových sít se čtvercovými otvory, poté se váží zbytky na sítích a určí se jejich hmotností podíl. Prosévání se provádí pomocí mechanického prosévacího přístroje nebo ručně. Křivka zrnitosti kameniva pro konstrukční beton se musí skládat nejméně ze dvou frakcí (z drobného a hrubého kameniva), ale to je pouze minimální požadavek. Mnohem lepší vlastnosti kameniva dosáhneme, pokud je kamenivo složeno ze tří frakcí. Jedna frakce je vždy drobné kamenivo (písek) se zrny do 4 mm, druhé dvě jsou tvořeny z úzké frakce hrubého kameniva (drt', šterku).

Kamenivo použité do betonů jsou nejčastěji usazené horniny: usazené horniny (sedimenty) vznikly usazením, případně následným zpevněním částic zvětralých hornin, zbytků odumřelých živočichů nebo chemickým vysrážením z vodních roztoků [Svoboda, 2007].

Velikost zrn [mm]	Název	Označení zrnitosti
Menší než 0,002	Jíl	Jílová (politická)
0,002 – 0,063	Prach	Prachovitá (aleurická)
0,063 – 0,25	Písek jemný	Jemně psamitická
0,25 – 1,0	Písek střední	Středně psamitická
1,0 – 2,0	Písek hrubý	Hrubě psamitická
2,0 – 8,9	Štěrka drobná	Drobně psefitická
8,9 – 32	Štěrka střední	Středně psefitická
32 – 128	Štěrka hrubá	Hrubě psefitická
128 – 256	Kameny	Kamenitá
Větší než 256	Balvany	Balvanitá

Tabulka 2: Druhy klasických sedimentů podle velikosti zrn (zdroj: Svoboda, 2007)

Písky (nezpevněné psamity)

Pro technologii betonu se název písek rozumí drobné kamenivo s velikostí zrn 0,05 – 4 mm. Mechanické vlastnosti písků jsou závislé na velikosti zrn, na jejich petrografickém výskytu a na příměsích (větší množství slídy, jílovitých příměsí není vhodné pro písky ve stavebnictví).

Štěrky (nezpevněné psefity)

Pro technologii betonu se název štěrka rozumí hrubé kamenivo s velikostí zrn 4 – 125 mm. Zrna štěrku jsou často oblá, může za to dlouhé unášení vodou. Kvalita štěrku závisí na složení a vlastnostech horniny. Štěrky složené z úlomků křemene, křemenců, krystalických břidlic, vápence, dolomitu a křemitých hornin.

Štěrkopísky

Štěrkopísek je směs složená z štěrku a písku. Štěrkopísky nesmí obsahovat jílovité, hlinité, organické a chemické příměsi, musí vyhovovat z hlediska zrnitosti, mezerovitosti, tvaru zrn, pevnosti, nasákavosti, atd. Zrnitost přírodních štěrkopísků je často nevyhovující, a proto se dále musí upravovat tříděním a drcením.

1.2.2 Voda

Voda v betonu má dvě funkce: hydratační a reologickou. Hydratační funkce slouží k tomu, aby cement mohl hydratovat. Znamená to, že se podílí na chemických a fyzikálních pochodech, při kterých beton tuhne a tvrdne. Reologickou funkcí vody se rozumí podíl na tvorbě čerstvého betonu a specifického stupně konzistence a následného smrštění a dotvarování betonu.

Vodní součinitel

Pro tuto práci je vodní součinitel důležitou veličinou, a proto je třeba se o něm zmínit, aby čtenář nemusel v praktické části diplomové práce tápat nad tím, co tento vodní součinitel znamená.

Vodní součinitel (w/c) vyjadřuje koncentraci cementového tmelu a je určitým ukazatelem pevnosti a pórovitosti ztvrdlého cementového tmelu. Je definován jako hmotností poměr obsahu vody ku cementu v čerstvém betonu. Za předpokladu úplného zhutnění cementového tmelu je obecně platné, že se zvyšující se hodnotou (w/c) klesá pevnost v tlaku z důvodu zvyšující se porozity. Obvyklá hodnota (w/c) se v praxi při výrobě betonu pohybuje v rozmezí 0,35 až 0,8. [Svoboda, 2007].

1.2.3 Recyklovaný beton

Recyklace (z anglického slova recycling = recirkulace, vrácení zpět do procesu) znamená znovu využití, znovu uvedení do cyklu. Přesný význam slova recyklace znamená znovu uvedení vzniklého odpadu do stejného systému, ve kterém vznikl. Recyklaci lze považovat za strategii, která využívá vzniklý odpad, jak v procesu ve kterém vznikl, tak v jiných průmyslových oblastech a technologiích. Využitím odpadů jsou šetřeny přírodní zdroje, je snižováno znečišťování životního prostředí nadměrným ukládáním odpadu [Nováková, 2012].

Recyklovaný beton se skládá také ze stejných složek jako klasický beton. Princip recyklovaného betonu je v opětovném použití jako plniva. Využívání betonu jako recyklátu je dnešní době stále častějším jevem. Z celosvětových prací na téma recyklovaný beton vyplývají následující poznatky:

- Zrna drceného betonu mají poměrně dobrý tvar, ale nižší objemovou hmotnost a větší nasákavost.
- Hrubá frakce drceného betonu neovlivní zpracovatelnost čerstvého betonu, ale drobná a jemná frakce zpracovatelnost zhorší ve srovnání s přírodním kamenivem.
- Nedoporučuje se používat drcený beton s obsahem více jak 1 % SO_3 .
- Doporučuje se omezit max. zrno drceného betonu na 16 – 22 mm.
- Pevnost v tlaku recyklovaného betonu ve srovnání s klasickým betonem je nižší o 4 – 20 % (ale byly také zjištěny i případy mírně zvýšené pevnosti v tlaku).
- Modul pružnosti recyklovaného betonu je o 10 – 30 % nižší.

2 Polymery

Poslední použitou složkou při výrobě cementové směsi, jsou polymery, respektive polyvinylalkohol. Proto jsou následujících kapitoly těmto polymerům věnovány. Nejen obecně polymerům, ale hlavně polyvinylalkoholu, jeho vzniku, charakteristickým vlastnostem, využití ve stavebnictví.

2.1 Úvod

Polymery jsou chemické látky, které se vyznačují velmi širokým spektrem vlastností. Obsahují většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku i dusíku a chloru a mnoha jiných. Polymery jsou při výrobě v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování se skupenství změní na v podstatě kapalné za zvýšené teploty a tlaku. Polymery dělíme na elastomery a plasty.

Elastomer

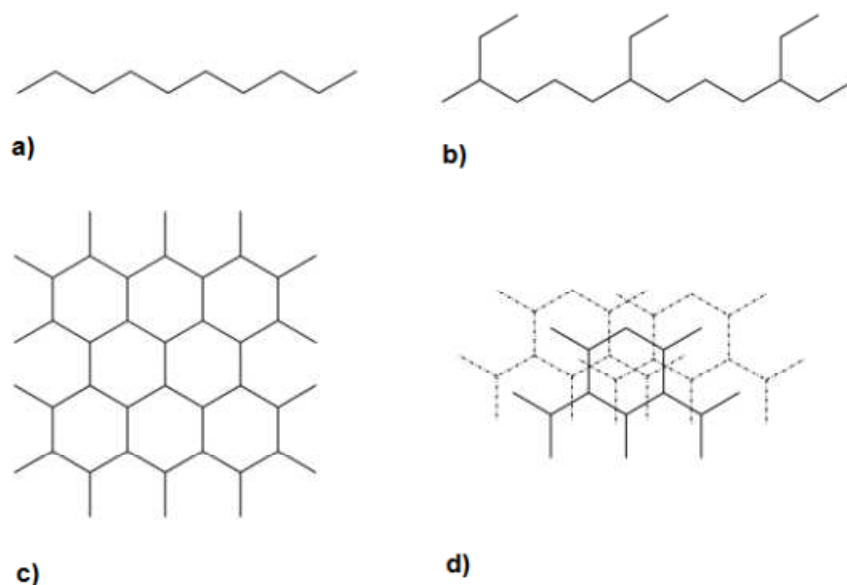
Elastomer je vysoce elastický polymer, který se můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Vyznačuje se také objemovou stabilitou. Většina elastomerů jsou dvousložkové – báze + aktivační složka. Nejpočetnější elastomery jsou kaučuky [Ducháček, 2006].

Plasty

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná, nazýváme je termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou, protože je výsledkem chemické reakce, mluvíme o reaktoplastech [Ducháček, 2006].

2.2 Základní vlastnosti polymerů

Polymery mají obrovské molekuly, relativní molekulová hmotnost se pohybuje od desítek tisíc do milionů, je tedy o mnoho řádů větší než u ostatních, tzv. nízkomolekulárních látek. Např. relativní molekulová hmotnost vody (H_2O), kterou získáme součtem relativních atomových hmotností, je $1 + 1 + 16 = 18$. Proto synonymem k pojmu polymer je i pojem makromolekulární látka. Makromolekulární řetězce mohou být lineární, rozvětvené nebo uspořádané do prostorové sítě, jak ukazuje obrázek č. 1. Vlastnosti polymerů závisejí na jejich fázovém stavu, molekulové hmotnosti a chemickém složení.



Obrázek 1: Schématické znázornění makromolekul a) lineárního, b) rozvětveného, c) plošně zesíťovaného, d) prostorově zesíťovaného polymeru (zdroj: Ducháček, 2006.)

2.2.1 Fázový stav

Polymery mohou být pouze ve fázovém stavu kapalném nebo tuhém, v plynném stavu neexistují. Je to z toho důvodu, že mají vysokou molekulovou hmotnost a tudíž mají velmi vysoký bod varu. Mimo to, že polymery mají pouze kapalně nebo tuhé, jsou také charakteristické svým přechodovým stavem mezi sklovitým a kapalným. Stav se nazývá kaučukovitý. V kaučukovitém stavu lze polymer deformovat poměrně malou silou. I malou silou vyvoláme neobvykle velké deformace. Proto jej nelze nazývat tuhou látkou a nelze zmíněný stav definovat ani jako kapalinu.

2.2.2 Molekulová hmotnost

Molekulová hmotnost je nejdůležitější vlastností, kterou se látky makromolekulární odlišují od látek nízkomolekulárních. Znalost molekulové hmotnosti je nezbytná pro charakterizaci polymerů. Hodnota molekulové hmotnosti rozhoduje o chování polymeru. Pokud má látka mechanickou pevnost musí mít polymerační stupeň mezi 40-80. Polymerační stupeň je počet merů v makromolekule. Po překročení této hranice se dá polymer v praxi využít pro jeho mechanickou pevnost v tahu. Molekulová hmotnost ovlivňuje teplotu měknutí, rozpustnost, viskozitu roztoků a tavenin, pružnost, pevnost, tepelnou stálost a odolnostní charakteristiky.

2.3 Výroba polymerů

Většina existujících polymerů ze současného světa patří mezi syntetické, jsou látky vznikající činností člověka, uměle tzv. syntetické polymery. Vznikají třemi základními chemickými reakcemi:

- Polymerací.
- Polyadící.
- Polykondenzací.

2.3.1 Polymerace

Polymerace je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Velkou výhodou této reakce je, že se nevytvářejí vedlejší produkty a makromolekulární řetězec narůstá do své konečné délky v krátké době.

2.3.2 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemného spojování také schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Mají-li tyto sloučeniny ve svých molekulách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer, takové reakci proto říkáme polyadice [Ryšková, 2013].

2.3.3 Polykondenzace

Polykondenzace je proces, kde se opakují stejné reakce funkčních skupin výchozích látek. Proto, aby vznikl polymer, je zapotřebí, aby výchozí sloučeniny měly potřebný počet funkčních skupin, a to nejméně dvě. Polykondenzace je reakce, při níž vzniká ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a jiná nízkomolekulová látka, nejčastěji voda [Ryšková, 2013].

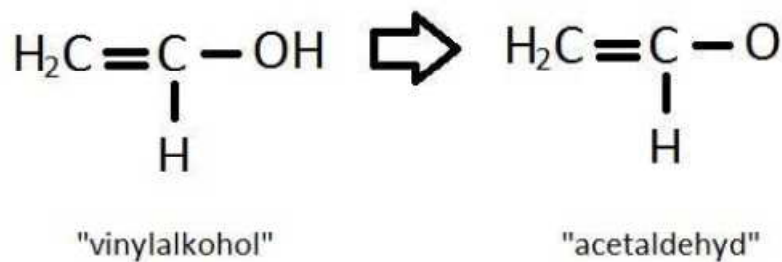
2.4 PVA

2.4.1 Úvod

Polyvinylalkohol (dále jen PVA, PVAL, další značení jsou PVOH, POVAL) patří mezi termoplasty, respektive mezi vinylové polymery. Vinylové polymery (polyvinylchlorid,

polyvinylacetát i polystyren) patří k nejdůležitějším plastům, které vznikají nejčastěji polymerací. Obecný vzorec je $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{OH}$.

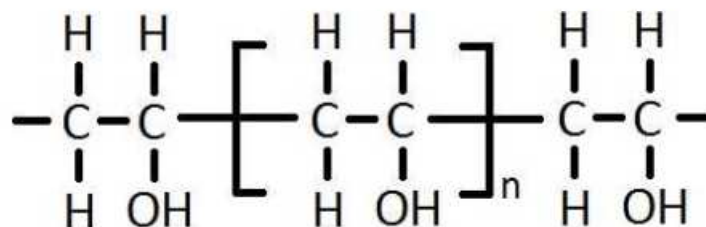
PVA nelze vyrobit z monomerů, protože vinylalkohol totiž v přírodě neexistuje. Produktem všech reakcí je acetaldehyd. Alkohol se při výrobě, mění na aldehyd. PVA se vyrábí hydrolýzou polyvinylacetátu, obsahující vždy nějaké množství polyvinylacetátových skupin, které jsou příčinou jeho vlastností. Popisované chemické reakce mají největší význam pro komerční účely.



Obrázek 2: Chemická reakce, při níž se alkohol změnil na aldehyd

2.4.2 Historie a výroba

PVA bylo vytvořeno poprvé asi před 90-ti lety v roce 1924 hydrolýzou polyvinylacetátu v etanolu Hermannem a Haehnelem. Od té doby byl používán pro různé aplikace. V dnešní době lze na trhu najít dva druhy, buď se stupněm hydrolýzy asi 98 mol. %, nebo se stupněm hydrolýzy 87 – 89 mol. %. Ideální struktura řetězce PVA je tvořena lineárním řetězcem uhlíkových atomů, které jsou na sebe vázány jednoduchými vazbami.



Obrázek 3: Struktura polyvinylalkoholu

PVA lze vyrábět zmýdlením ve vodním prostředí nebo v prostředí alkoholů alkáliemi nebo kyselinami [C. C. Thong, D. C. L. Teo, 2015]. Za nepřetržitého míchání vzniká nejprve zbobtnalý gel, který ke konci reesterifikace vypadává z roztoku jako prášková suspenze. Produkt se promývá metanolem a suší v bezkyslíkatém prostředí. Polyvinylalkohol je srážen z vodních roztoků pomocí anorganické soli [Ryšková, 2013].

2.4.3 Charakter a vlastnosti PVA

PVA je bílý prášek, krystalického charakteru. PVAL lze vyrábět pomocí vícefunkčních sloučenin, které reagují s hydroxylovými skupinami, nejvíce využívanými činidly jsou glutaraldehyd, glyoxal. PVA je rozpustný ve vodě. Rozpustnost se dána jeho molekulovou hmotností, čím je vyšší, tím méně se rozpouští. V nepolárních rozpouštědlech ani olejích rozpustný vůbec není ani při vysokých teplotách. Odolává organickým kyselinám, ale v anorganických kyselinách je rozpustný. Polymer patří sice do skupiny termoplastů, ale jeho použitelnost se pohybuje mezi teplotami od -50 °C do 130 °C, nad 200 °C se rozpadá. PVA není životu nebezpečný a jeho manipulace je šetrná k životnímu prostředí. Popisovaný polymer je bez chuti a zápachu.

Při výrobě částečně hydrolyzovaný PVA obsahuje zbytky acetátových skupin, které snižují pevnosti v tahu a zvyšují rozpustnost ve vodě. Částečně hydrolyzované polyvinylalkoholy jsou rozpustné už za pokojové teploty. Při obsahu 35 % zbytkových acetátových skupin, sice není PVA rozpustné ve vodě, ale už je rozpustný v organických rozpouštědlech [C. C. Thong, D. C. L. Teo, 2015]; [Ducháček, 2006].



Obrázek 4: PVA ve formě krystalů (zdroj: made-in-china.com)

2.4.4 Využití PVA

Nejčastěji se PVA používá se stavu připomínajícím želatinu. Proto se používá:

- V potravinářství pro přípravu ovocného želé.
- V chemickém průmyslu jako zhušťovadlo pro nátěrové hmoty, k výrobě lepidel, emulzí, impregnačních hmot.
- Pro výrobu: obalových fólií, chirurgických rukavic, textilních vláken, hadic, těsnění, tuší, razítkovacích barev, inkoustů a dalších výrobků.
- V neposlední řadě ve stavebnictví, přidává se do betonových (respektive cementových) směsí a zjišťuje se, jaký to má dopad. To je také cíl mé diplomové práce.

Jak je patrné, PVA má na celém světě veliké uplatnění, to je také jeden z důvodů, proč se začalo zjišťovat, zde by mohl mít uplatnění i ve stavebnictví. Využití ve stavebnictví rozepíši v samostatné kapitole, protože z celé kapitoly 3 (polymery) je to nejdůležitější pro mou diplomovou práci.

2.5 Využití polymerů ve stavebnictví

V současné době se pomocí experimentu zjišťují vlastnosti betonových, respektive cementových směsí za použití polymerů. Polymery jsou velmi rozšířené, neboť se zjistilo, že zlepšují vlastnosti cementových materiálu. Slouží jako modifikátor, jako výztuž i jako agregát předúpravy povrchu materiálu. I když se ukázalo, že vlastnosti nejenom zlepšuje ale i zhoršuje. A jsou i takové případy, kdy při totožných experimentech jsou výsledky rozdílné, a nebyla zjištěna příčina.

Zda jsou nejzásadnější studie a jejich závěry. Jsou rozdělené podle toho, v jakém skupenství se PVA v kompozitních materiálech na bázi cementu nacházelo, a také podle toho jakou úlohu v kompozitu zastával.

2.5.1 PVA jako modifikátor cementového kompozitu

PVA jako modifikátor je cílem mé diplomové práce. Proto se této podkapitole budu věnovat podrobněji než tomu tak bude v následujících podkapitolách. Nejvíce jsem se inspiroval experimentem Ing. Jaroslava Topiče. Proto si jeho studie zaslouží, abych se jí věnoval podrobněji.

Knapen E. a spol. provedli studii, ve které se snažili upravit cementovou kaši pomocí PVAA (polyvinylalkohol-acetát). Zjistili zpomalení hydratačního procesu a snížení $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dále zjistili lepší soudržnost, menší vznik trhlin a lepší pevnost v tahu za ohybu. Také film PVA kolem rostoucích produktů hydratace v průběhu tuhnutí a tvrdnutí. Ale zároveň objevili, že materiál je citlivý na vlhkost a přítomnost vody [Knapen, 2009].

Viswanath P. a spol. dokázali, že 2% PVA s fenol formaldehydem zlepšuje odolnost vůči kyselinám a pevnostní parametry zůstali srovnatelné z čistou cementovou kaší [Viswanath, 2008].

Pique T. M. a spol. zjišťovali vlastnosti cementu při použití 4 hm. % PVA a stejně jako [Knapen, 2009] ve studii dospěli ke zjištění, že polymer zajistil zpomalení hydratačního procesu. A nárůst pevnosti v tahu za ohybu [Pique, 2013].

Morlat R. a spol. ve studii použili směs cementu a PVA jako vysokomolekulární hmotu. Přišli na to, že pevnost v tahu za ohybu a lomová energie se zvýší a zároveň se zvětšila i pórovitost při použití max. 4 hm. % PVA. Zvětšení pevnosti vysvětlí tím, že PVA indukuje lepší kontrolu procesu lomu, zejména při šíření trhlin [Morlat, 2007].

Singh N. B. a spol. provedli stejnou studii jako [Morlat, 2007], ale jako materiál použili cement s popelem z rýžových lusků. Zjistili nárůst pevnosti v tlaku a snížení pórovitosti. Pevnost se zlepšila z důvodu chemických interakcí mezi PVA a cementovými částicemi, která zapříčinily vytvoření nových sloučenin. Sloučeniny vyplňují póry v cementové matici a zlepšují vazby mezi cementovými částicemi [Singh, 2001].

Yongjia E. H. a spol. také při studii zjistili, že v cementové směsi modifikované PVA vznikají speciální chemické interakce a dochází k vyplnění pórů a dutin, což má za následek snížení pórovitosti, z důvodu změny morfologie Si-O řetězců [Yongjia, 2011].

Kim J. H. a spol. zjistili, že po přidání max. 2 hmotnostních procent PVA se zlepšují vlastnosti cementu, malt a betonu. To může být v důsledku povrchové aktivity polymeru rozpuštěného ve vodě, který zvyšuje viskozitu vodní fáze. Též zjistili, že PVA modifikovaná malta pomaleji absorbuje vodu, ve srovnání s nemodifikovanou maltou [Kim, 1999].

Kim J. H. a Robertson R. S. zjistili, že obsah vzduchových pórů se zvětšuje s přibývajícím množstvím PVA. Příčina zvětšování pórovitosti by mohla být z důvodu zvýšení viskozity PVA ve srovnání s vodou. To způsobuje deflocculation z cementových částic při míchání a vibraci, to vede ke snížení bleeding v cementové pastě [Kim, 1998].

Allahverdi A. a spol. prokázali zlepšení zpracovatelnosti cementového kompozitu po přidání PVA. Studii provedli na šesti různých množstvích p/c (poměr polymeru a cementu), které byly

0,004, 0,008, 0,012, 0,016, 0,020. Tyto poměry p/c byly použity na tři různé směsi, jejichž w/c (poměr vody/cementu) byly 0,28, 0,30, 0,32. Zjistili zlepšení zpracovatelnosti, ale jen do určitého množství PVA. Optimální poměr p/c (0,012, 0,016) k w/c (0,28, 0,30, 0,32). Dále taky zjistili, že množství w/c a p/c ve směsi má vliv na ohybovou pevnost. Zvýšením poměru p/c (neboli zvýšením PVA) se snižuje ohybová pevnost. Ale byla také zjištěna dvakrát větší pevnost v ohybu u modifikovaného cementu s p/c 0,016 a w/c 0,3. Zjistili snížení objemů pórů se snižováním množství PVA [Allahverdi, 2010].

Ohama Y. a spol. dokázali, že ve vodě rozpustný polymer v důsledku povrchové aktivity zvyšuje viskozitu vodní fáze a zabraňuje vysychání modifikované cementové malty a betonu [Ohama, 1995].

Robertson R. E. a spol. zjistili, že PVA zapříčiňuje větší pórovitost. Větší pórovitost vysvětlují nepravidelným balením částic nebo mechanickým mícháním. Malé vzduchové dutiny vytvořené v průběhu mechanického míchání lze sloučit za vzniku větších vzduchových pórů. Malé vzduchové dutiny, vytvořené v nemodifikovaném cementovém kompozitu, se mohou rychle spojit a snadno odstranit. Po modifikaci PVA, vzhledem k mírné povrchové aktivní vlastnosti a viskoelasticitě PVA, malé vzduchové dutiny se zformují a stabilizují. Následně způsobí, že se stanou obtížně odstranitelnými [Robertson, 1997].

Shaker F. A. a spol. ve studii použili cementový kompozit s PVA a prokázali snížení pórovitosti. Redukci pórů přičetli mazacímu účinku PVA, což usnadňuje i rozptýlení a balení částic cementu, popisovaný jev vede k hustší mikrostruktúře s vyšší objemovou měrnou hmotností. Stejně výsledky dokázali i ve studii [Allahverdi, 2010] [Shaker, 1997].

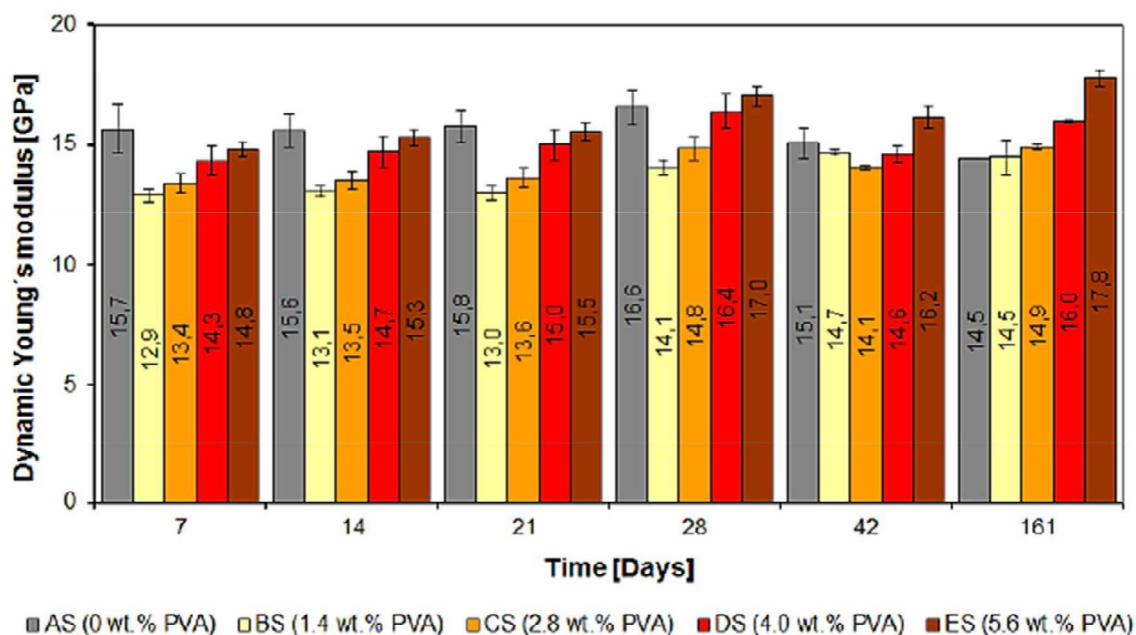
Ryšková M a spol. provedli studii na téma: Polymer-cementové kompozity se zvýšenou žáruvzdorností. Zkoumali žáruvzdornost u MDF kompozitů na bázi hlinitanového cementu s PVA a optimalizaci dávkování. U všech vzorků došlo k poklesu pevností s teplotou výpalu. U kompozitů vypálených při teplotě 1400 °C vznikala keramická vazba a tím i nárůst pevnosti, Déle došli k závěrům, že při snižování množství PVA se zvýšila pórovitost a snížila pevnost v tahu za ohybu [Ryšková, 2013].

Topič J. a spol. se ve své studii zaměřili na vliv PVA na vlastnostech cementového kompozitu. Jejich závěr se shoduje s většinou provedených studií. Zpomalení hydratačního procesu a zvýšení pórovitosti přibývajícím s množstvím PVA, zvýšení odolnosti vůči mrazu a chemickým látkám, snížení pevnosti v tlaku a zároveň zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. Více jak 4 hm. % PVA má negativní vliv na zpracovatelnost, tudíž i na množství pórů. Experiment spočíval ve vyrobení vzorků 40×40×160 (pro nedestruktivní testování) a 20×20×100 (pro

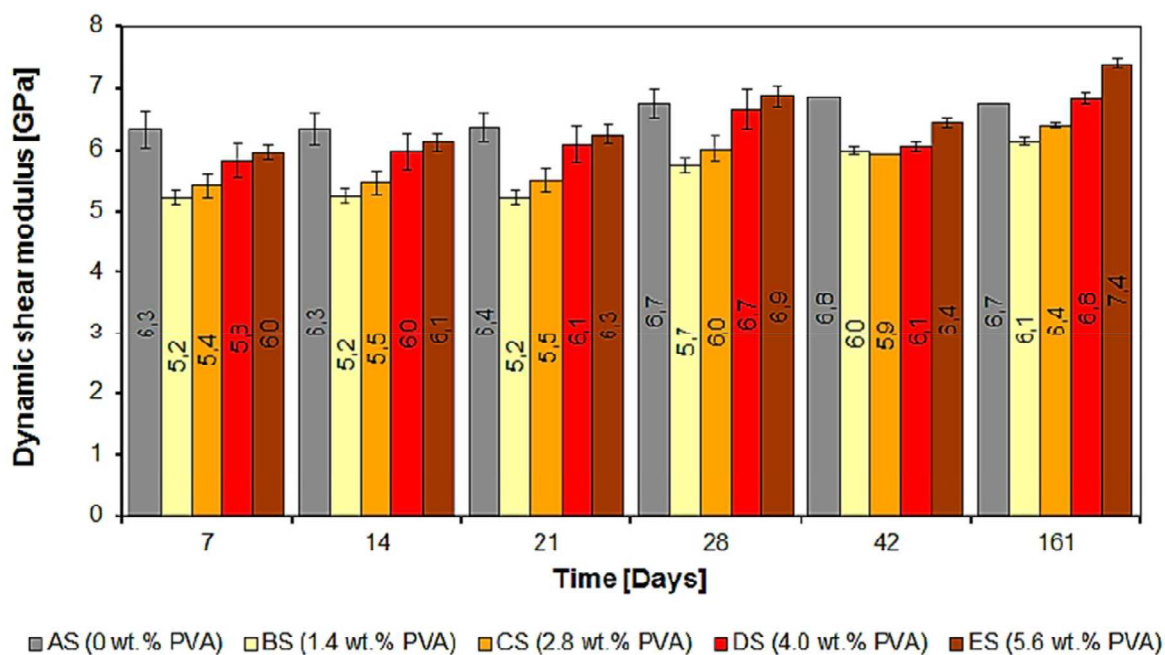
destruktivní testování) z portlandského cementu CEM I 42,5 R a PVA 16-ti % roztoku značky SLOVIOL® R. Vyrobili 5 sad, v každé sadě bylo jiné množství PVA (0 hm. %, 1,4 hm. %, 2,8 hm. %, 4,0 hm%, 5,6 hm%). Všechny měly poměr w/c 0,35. Zkoumala se nasákavost, dynamický modul pružnosti každých sedm dní po dobu 42 dnů, pevnost v tahu za ohybu se měřila třibodovým ohybem s rychlostí 0,1 mm/s, pevnost v tlaku se měřila jednoosou tlakovou zkouškou s rychlostí 0,3 mm/s. Dále byl sledován hydratační proces a tepelný tok byl sledován v průběhu prvních sedmi dnů. Tepelný tok klesal s rostoucím množstvím PVA. Celkové hydratační teplo kleslo o 28 % u sady s největším množstvím PVA [Topič, 2015].

Set	Bulk density [kg/m ³]	Total porosity [%]
AS (0 wt% PVA)	1841 ± 15	23 ± 1
BS (1.4 wt% PVA)	1543 ± 16	35 ± 1
CS (2.8 wt% PVA)	1511 ± 2	36 ± 1
DS (4.0 wt% PVA)	1443 ± 19	39 ± 1
ES (5.6 wt% PVA)	1366 ± 7	41 ± 1

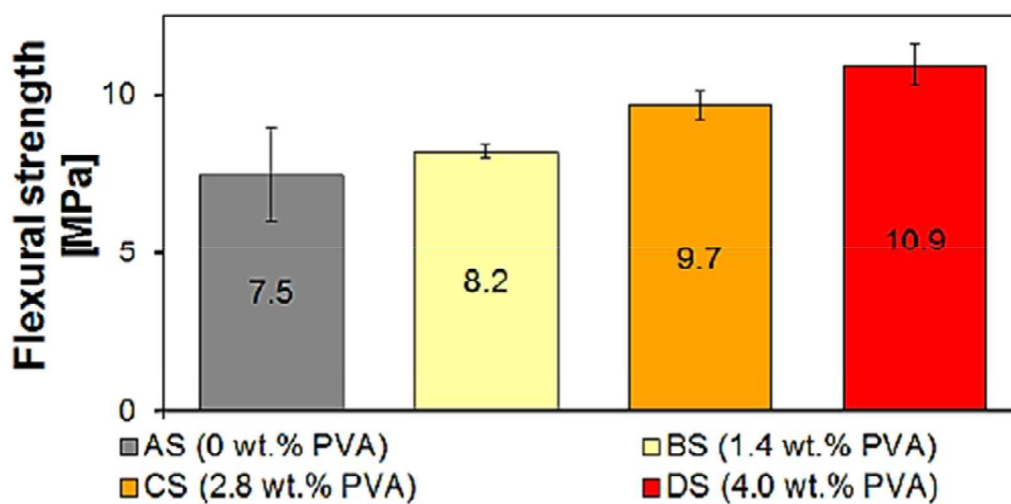
Obrázek 5: Objemová hmotnost (zdroj: Topič, 2015)



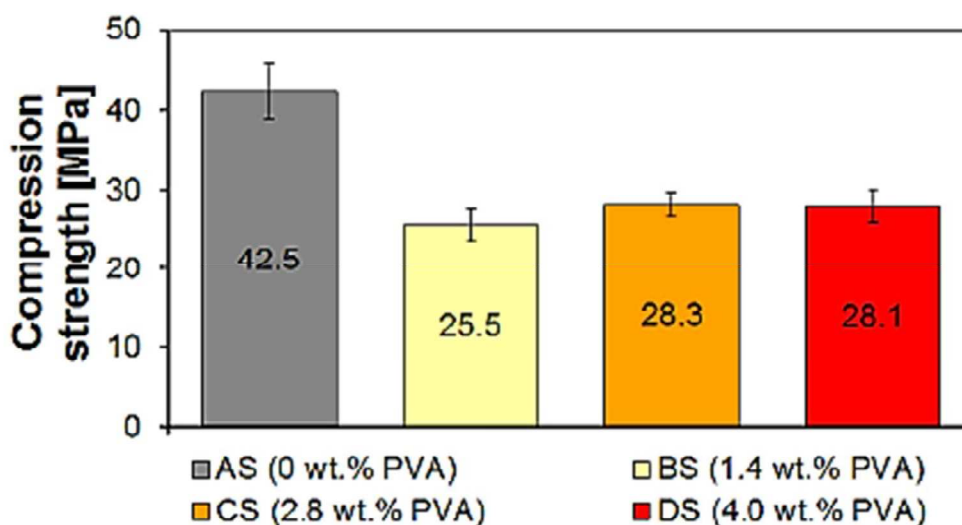
Obrázek 6: Dynamický modul pružnosti (zdroj: Topič, 2015)



Obrázek 7: Dynamický modul ve smyku (zdroj: Topič, 2015)



Obrázek 8: Pevnost v ohybu (zdroj: Topič, 2015)



Obrázek 9: Pevnost v tlaku (zdroj: Topič, 2015)

Autor studie	Název studie/obsah	Závěr studie	
		Zlepšení	Zhoršení
Knapen a spol. 2009	Úprava cementové kaše pomocí PVAA	Zlepší soudržnost, menší vznik trhlin, Větší pevnost v tahu za ohybu	Zpomalení hydratačního procesu, zhoršení mechanických vlastností za přítomnosti vody
Viswannath a spol. 2008	Úprava cementové kaše pomocí PVAA	Odolnost vůči kyselinám	Neuvedeno
Pique a spol. 2013	Úprava cementového kompozitu 4 hm. % PVA	Nárůst pevnosti v ohybu	Zpomalení hydratace
Morlat a spol. 2007	Úprava cementového kompozitu vysokomolekulárním PVA	Zvýšení pevnosti v ohybu	Zvětšení pórovitosti, snížení pevnosti v tlaku
Singh a spol. 2001	Úprava cementu PVA	Zvýšení pevnosti v tlaku, snížení pórovitosti	Neuvedeno
Yongjia a spol. 2011	Úprava cementu PVA	Snížení pórovitosti	Neuvedeno

Tabulka 3: Zpracované studie

Autor studie	Název studie/obsah	Závěr studie	
		Zlepšení	Zhoršení
Kim a spol., Santos a spol. 1999	Úprava portlandského cementu PVA	Zlepšení celkových vlastností	Neuvedeno
Kim a spol. 1998	Úprava cementového kompozitu max. 2 hm. % PVA	Zlepšení vlastností cementu, malt a betonu	Zvětšení pórovitosti
Allahverdi a spol. 2010	Vliv PVA na zpracovatelnost cementového kompozitu	Zlepšení zpracovatelnosti, zvýšení pevnosti v ohybu	Zvětšení pórovitosti
Ohama a spol. 1998	Vodou rozpustný polymer v cementovém kompozitu	Zabraňuje vysychání	Neuvedeno
Robertson a spol. 1998	Vliv PVA na materiál	Neuvedeno	Zvětšení pórovitosti
Shaker a spol. 1997	Úprava cementového kompozitu PVA	Snížení pórovitosti	Neuvedeno
Ryšková a spol. 2013	Polymer-cementové kompozity	Zvýšení pevnosti při teplotě výpalu 1400 °C	Zvětšení pórovitosti, snížení pevnosti v tlaku
Topič a spol. 2015	Vliv PVA na vlastnosti cementového kompozitu	Zvýšená odolnost vůči mrazu a chemickým látkám, zvýšení pevnosti v ohybu	Zpomalení hydratačního procesu, zvýšení pórovitosti, snížení pevnosti v tlaku

Tabulka 4: Zpracované studie

2.5.2 PVA jako agregát předúpravy povrchu materiálů

Kou S. C. a spol. provedli studii, při níž recyklované kamenivo ošetřili PVA. Ošetření provedli namočením v roztoku PVA po dobu 24 hodin. Zjistili pokles absorpce vody o 10 %. Rovněž přišli na to, že se zvýší odolnost proti drcení [Kou, 2010].

Mannan M. A. a spol. přišli na zvýšení mechanických vlastností u betonu vyrobeného z materiálů ošetřených PVA. Vědci zjistili snížení nasákavosti agregátu o přibližně 69 % při použití 20-ti % roztoku PVA [Mannan, 2006].

Wan S. X. a spol. podobně jako [Mannan, 2006] zjistili zlepšení o 5,5 % pevnosti betonu v tahu. Beton byl vyroben z recyklovaného kameniva, který byl ošetřen PVA. Předpokládali, že PVA na povrchu recyklovaného agregátu může být rozpuštěno v průběhu míchání betonu, a tím snižuje poměr w/c a zlepšuje přilnavost [Wan, 2006].

2.5.3 PVA jako výztuž

Shaikh X. a spol. provedli studii, které měla za úkol zjistit, jaké bude mít cementový kompozit vlastnosti po přidání vláken z PVA, délky max. 12 mm. Prvek takto vyztužený vykazoval lepší mechanické vlastnosti [Shaikh, 2008].

Shilang F. U. A. a spol. také provedli studii, při níž vyztužili cementový kompozit PVA vlákny. Zjistili 70 krát větší pevnosti v tahu, než má prostý beton a klesající pevnost v tahu se zvyšující se teplotou [Shilang, 2011].

Horikoshi T. a spol. měli za úkol zjistit, jaké bude mít vlastnosti cement vyztužení vláknem z PVA. Jejich závěr byl, cement měl vysokou pevnost a elastický modul ve srovnání s jinými typy vláken (např. polypropylenovými, nylonovými vlákny) [Horikoshi, 2006].

Hu W. a spol. se zaměřili na zkoumání betonu vyztuženého PVA vlákny. Experiment prokázal, se zvýšeným množstvím PVA vláken se snížila tlaková pevnost a modul pružnosti naopak se zvýšila pevnost v tahu betonu [Hu, 2013].

2.5.4 Účinky PVA na lomové povrchy materiálů na bázi cementu

Bezerra E. M. a spol. zkoumali distribuci PVA a PP vlákna v cementové základní hmotě podle elektronové mikroskopie. Zjistili, že PVA vlákna měla homogenní disperze v cementové hmotě a velké množství vláken bylo připojeno k matici. Také přišli na lepší kotvicí chování se srovnání s PP [Bezerra, 2004].

2.5.5 Účinky PVA na strukturu mezifázové přechodové zóny

Kim J. H. a spol., zjistili, že přítomnost PVA může zvýšit množství křemičitan vápenného hydrátu (C-S-H) a snížit tvorbu Ca (OH)₂ krystalů, což přispívá k nárůstu adheze mezi pastou a kamenivem s PVA [Kim, 1999].

Singh N. B. a Rai S. zkoumali modifikaci cementové pasty pomocí PVA, přišli na tvorbu nových sloučenin, které mohli pozorovat v UV-viditelném spektru. Sloučeniny byly považovány za amorfni a nemohly být detekovány rentgenovou difrakční technikou [Singh, 2001].

Singh N. B. a spol. také zkoumali tvorbu nových sloučenin pomocí IČ spektra a X-ray difrakce. Dokázali, že přítomnost PVA snižuje hodnotu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a tudíž zpomaluje hydrataci (PVA brání molekulám vody dostat se do kontaktu s cementovými částicemi) [Singh, 2003].

2.5.6 Výzkum pro budoucí rozvoj

Výzkum v současné době byl zaměřen hlavně na použití PVA jako modifikátoru nebo jako vlákna pro vyztužení. Vzhledem k tomu, že plnivo zaujímá velký objem v betonu a se stále se snižujícími přírodními zdroji kameniva se v budoucnu budou vědci snažit využít PVA pro zpracování recyklovaného kameniva a zjistit krátkodobé i dlouhodobé účinky na vlastnosti betonu a jeho mikrostrukturu. Sice už tu pár studií bylo, viz předešlé kapitoly, ale jednalo se o zacházení s agregáty s PVA pro konkrétní proces.

Mojumdar S. a Raki L. v studii naznačují, využití nanokompozitního cementu s PVA pro budoucí aplikaci v oblasti stavebnictví jako nátěry s ochranou proti korozi a ohni [Mojumdar, 2005].

PRAKTICKÁ ČÁST

3 Výroba vzorků

Než bylo možné vzorky vyrobit, bylo důležité navrhnout směs a najít optimální řešení, kolik sad a vzorků je nutné vyrobit, aby diplomová práce měla vypovídající hodnotu. Po dlouhé debatě a pročetí patřičných norem a studií jsme se s vedoucím diplomové práce Ing. Pavlem Tesárkem, Ph.D. dohodli na 10-ti sadách a v každé sadě 6 vzorků. Z toho bylo 5 sad po vyjmutí z formy ponořeno do vody a 5 sad bylo necháno v suchém prostředí s relativní vlhkostí 38 % při teplotě 20 °C. Každá sada se lišila množstvím obsahu PVA, viz tabulka č. 5. Pro návrh směsi jsem se inspiroval u Ing. Jaroslava Topiče, který zkoušel jaký vliv má PVA na cementový kompozit. Výroba cementové směsi začala v pondělí 17. 10. 2016 v 8:00. Před samotnou výrobou jsem všechny potřebné materiály připravil a pečlivě zvážil. Čerstvou směs jsem zhotovoval z jemně namletého portlandského cementu CEM I 42,5 R, vyrobený v cementárně Radotín. Recyklovaného betonu vyrobeného o velikosti zrn < 0,25 mm rozemletého z betonových příkopových tvárnic viz příloha č. 1 ve firmě Lavaris, s. r. o., vody a PVA, které je vyrobené alkalickou hydrolýzou polyvinylacetátu v methanolu (obchodní značka SLOVIOL® R, vyrobený firmou Fortischen), ve formě 16 % roztoku viz obrázek č. 10. Množství cementu a recyklovaného betonu, bylo vždy stejné, to znamená 65% cementu a 35% recyklovaného betonu. Změna byla v množství vody a PVA. Při výrobě směsi bylo zřetelně vidět, jak se mění zpracovatelnost jednotlivých směsí. Směs vzorků označených A (vzorky s největším obsahem PVA, 5,6 hm. %) bylo téměř nemožné vyrobit natož správně ztuhnit. S ubývajícím obsahem PVA byla zpracovatelnost výrazně lepší. Zbývající vzorky jsem označil jako B, C, D, E. Ve vzorcích označených jako E nebylo žádné množství PVA, jednalo se o referenční vzorek vyrobený z cementu, recyklovaného betonu (což obsahovat každý vzorek) a vody. Konzistence čerstvé směsi jsem zjišťoval vizuálně přímo při výrobě a následně pomocí zkoušky rozlití.

Sada	Voda [g]	PVA roztoku [g]	PVA [hm. %]	Sada	Voda [g]	PVA [g]	PVA [%]
AS	0,0	525,0	5,6	AV	0,0	525,0	5,6
BS	150,0	375,0	4,0	BV	150,0	375,0	4,0
CS	262,5	262,5	2,8	CV	262,5	262,5	2,8
DS	393,75	131,25	1,4	DV	393,75	131,25	1,4
ES	525,0	0,0	0,0	EV	525,0	0,0	0,0

Tabulka 5: Množství PVA ve vzorcích



Obrázek 10: PVA



Obrázek 11: Složení forem

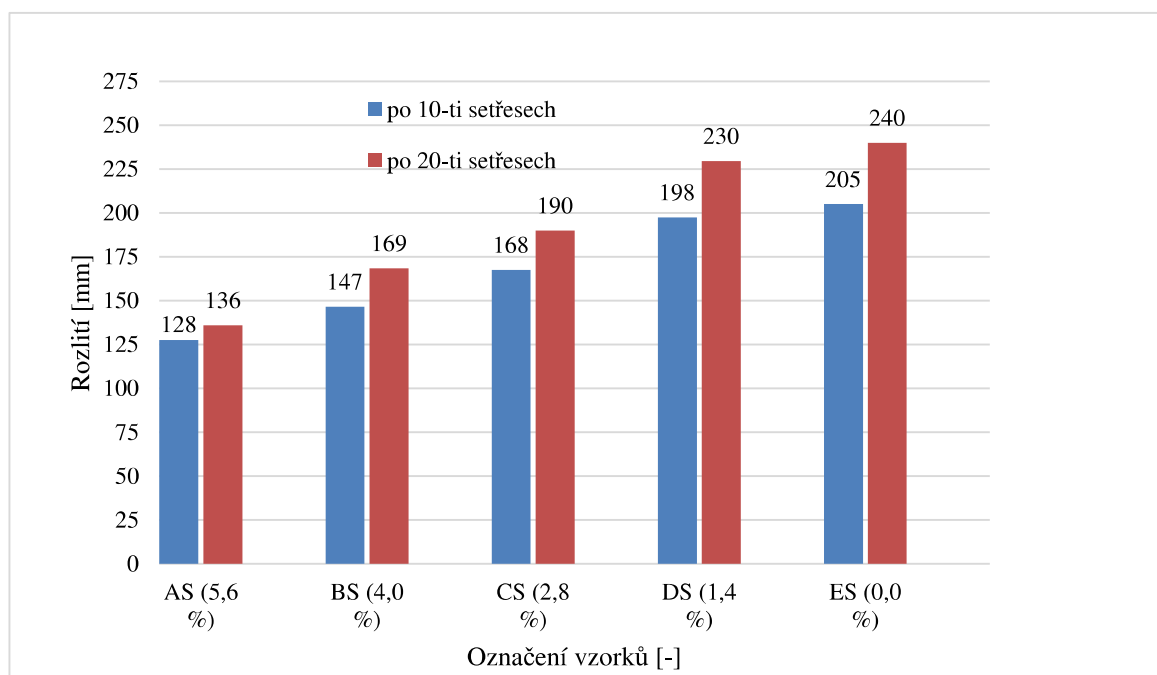
Zkoušku rozlitím jsem prováděl na setřásacím přístroji, viz obrázek č. 12. Před zkouškou se vodorovná skleněná deska očistí, aby ne jejím povrchu nebyly žádné nečistoty, na desku se postaví kovová forma ve tvaru seříznutého kužele. Rozměry formy jsou na výšku $60 \pm 0,5$ mm, vnitřní průměr ve spodní části $100 \pm 0,5$ mm a vnitřní průměr horní části $70 \pm 0,5$ mm. Forma se umístí na střed skleněné desky a naplní se směsí ve dvou vrstvách. Formu jsem naplnil čerstvou směsí až do půlky. Vrstvu jsem zhutnil 10 lehkými údery dusadlem. Dusadlo bylo dřevěné s pokovovanou částí, kterou se dusalo. Během plnění a hutnění bylo důležité držet formu na skleněné podložce, aby nedošlo k vytečení čerstvé směsi z dolní části kužele. Po naplnění druhou vrstvou a opětovném zhutnění a doplnění, jsem přebytečnou směs odstranil a seříznul ostrým předmětem, aby se čerstvá směs zarovнала s okrajem kužele. Poté jsem seříznutý kužel kolmo vzhůru odebral. Pro zjištění rozlití bylo důležité, aby následující setřásání bylo pro všechny vzorky stejné, kvůli správnému vyhodnocení. Setřásání jsme provedli ve dvou fázích po 10 a po 20 setřesech. Každý setřes trval jednu sekundu. Po provedených setřesech se vytvoří koláč směsi. Koláč směsi se změří ve dvou na sebe kolmých směrech. Hodnota rozlití se vypočte jako aritmetický průměr z naměřených hodnot na sebe kolmých směrů. Výsledné hodnoty jsme označili jako d_{10} (rozliv po 10 rázech) a d_{20} (rozliv po 20 rázech). Provádí se vždy 2 měření pro každou směs.



Obrázek 12: Setřásací přístroj s komolým kuželem a dusadlem

Jak je patrné z grafu č. 1, čím menší množství PVA, tím větší byl rozliv. Vzorek A, který obsahoval největší množství PVA, jehož procentuální hmotností množství (dále jen hm. %) bylo 5,6. Už při zpracování čerstvé směsi vykazoval problémy při míchání, proto je také zkouška rozlíváním nejmenší a rozdíl mezi 10-ti a 20-ti setřesy je skoro zanedbatelný. Dále je třeba si povšimnout nepatrného rozdílu rozlívání vzorku D se 1,4 hm. % a E s 0,0 hm. % PVA. Z toho vyplývá, že 1,4 hm. % PVA ve vzorku nezpůsobí velký rozdíl zpracovatelnosti čerstvé směsi.

Snížená zpracovatelnost při použití PVA je způsobena vysokou viskozitou roztoku. Naše zjištění jsou odlišná od těch v studii [Kim, 1999], kteří tvrdí, že zpracovatelnost se zlepšuje s vyšším obsahem množství PVA. Je to asi tím, že v práci zabývali vyšším poměrem w/c, který se rovnal 0,5. Na druhou existují podobná zjištění ve studiích [Allahverdi, 2010], [Topič, 2015]. Obě studie říkají, že existuje pouze určité množství PVA, při kterém se zachovává uspokojivá zpracovatelnost. Ve studii [Allahverdi, 2010] zkoumali zpracovatelnost při menších poměrech w/c a s jiným hmotnostním množstvím. Navzdory od studie [Topič, 2015], od které jsem se při výrobě vzorků inspiroval, jsem došel k podobným výsledkům, i když jsem v mé diplomové práci nepoužil při výrobě pouze cement. Použil jsem cement s recyklovaným betonem.



Graf 1: Zkouška rozlitém

Po každé zkoušce rozlitém jsme vzniklou směsí plnili formy. Formy jsou z oceli v rozměrech cca 40×40×160 mm, každá forma měla jinou velikost, viz příloha č. 3. Před samotným plněním jsem musel zkontrolovat, zda jsou jednotlivé části formy očištěné. Poté jsem formy sestavil. A důkladně vymazali olejem. V jedné formě se vytvoří 3 vzorky. Každou formu jsem naplnil do poloviny čerstvou směsí. Formy jsem zhuňoval třemi totožnými setřesy po stejných časových intervalech z každé strany. Po prvním zhuňování jsem doplnil formy cementovou směsí lehce přes okraj. Totožně zhuňoval a seřízl, abych vytvořil rovinu. Popsaným postupem jsem vyrobil 60 vzorků, které jsem nechal zrát do dalšího dne.



Obrázek 13: Vzorek A



Obrázek 14: Vzorek B



Obrázek 15: Vzorek C



Obrázek 16: Vzorek D



Obrázek 17: Vzorek E



Obrázek 18: Zrání vzorků ve formách

Po 24 hodinách od výroby, jsem začal vzorky odformovávat a měřit pro následující zkoušky. Už při pohledu na vzorky bylo jasné, jak množství PVA změnilo, jejich strukturu a povrch, který byl vidět pouhým okem. Kvůli špatné zpracovatelnosti vzorky označené jako A, se daly špatně zhutnit, a proto byly popraskané, viz obrázek č. 13, že na pohled jsou pro stavební účely nepoužitelné. Ostatní vzorky označené jako B, C, D vytvořili na horním povrchu lesklou vrstvičku z PVA, viz obrázky č. 14, 15, 16. Nejvíce je to vidět na obrázcích č. 15, 16, respektive na vzorku C a D. Už při odformování jsme zjistili, že se množství pórů zmenšuje se snižováním množství PVA v trámečcích. Uvedený předpoklad jsem učinil na základě pozorování, viz obrázek č. 20. V následujících kapitolách se přesvědčíme, zda tomu tak je.



Obrázek 19: Odformování



Obrázek 20: Struktura vzorků

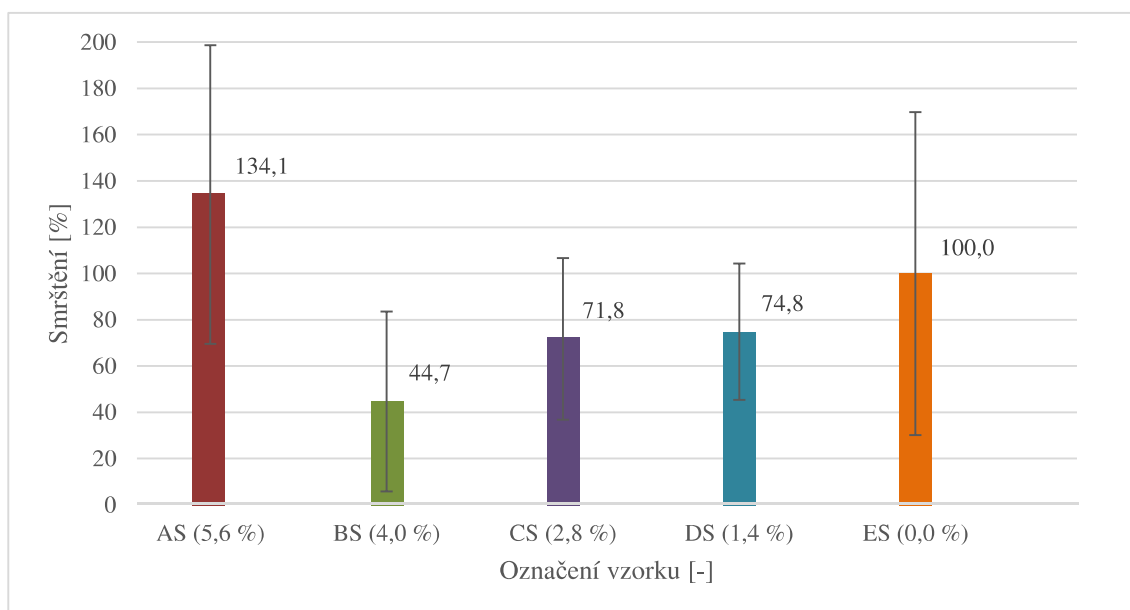
4 Testování vzorků

Po odformování všech vzorků se 30 ponořilo do kádě s vodou a 30 se vyskládalo do prázdné kádě. Po následujících 28 dnů se na trámečcích prováděli zkoušky a měření, které jsou detailně popsány v následujících podkapitolách. Jsou to smrštění, dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti ve smyku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku.

4.1 Smrštění

Změření smrštění vzorků jsem provedl po 24 hodinách od výroby čerstvé směsi. Jak už jsem psal v předchozí kapitole, všechny formy před plněním jsem změřil a rozměry napsali do tabulky, viz příloha č. 3. Při odformování vzorků jsem provedl opětovné měření, viz příloha č. 4. Z rozdílů délek prázdné formy a délek trámečků jsem stanovil smrštění vzorků. Pro přehlednost jsem smrštění vyjádřil v procentech, kde referenční vzorek ES má 100 %, viz graf č. 2.

Z grafu je patrné, že množství PVA má na smršťování veliký vliv. Z grafu jasně vyplývá, že vzorky s PVA (vzorky označené jako B, C, D) se smršťují méně, než referenční vzorek (označený jako E). Vzorek A má největší smrštění, z důvodu velkého obsahu PVA. A tudíž špatné zpracovatelnosti a následného hutnění. Ale vzorek B s 4,8 hm. % vykazuje nejmenší smrštění. Je to proto, že voda pro obalení částic cementového kompozitu je smíchána s PVA a při vysychání se voda nedokáže snadno vypařovat.



Graf 2: Poměrové vyhodnocení smrštění s referenčním vzorkem ES

4.2 Dynamický modul pružnosti

V případě zkoušky jsem měřil dynamický modul pružnosti a dynamický modul ve smyku na trámečcích 40×40×160 mm pomocí nedestruktivních metod. Stanovení dynamického moduly vychází z rychlosti šíření ultrazvukových vln v homogenním prostředí je konstantní a závisí na modulu pružnosti a hustotě prostředí. Abych mohl měřit rychlost šíření vln, používal jsem přístroje, které vysílají ultrazvukové impulzy. Ke zjištění dynamického modulu slouží dvě metody:

- Metoda impulsní.
- Metoda rezonanční.

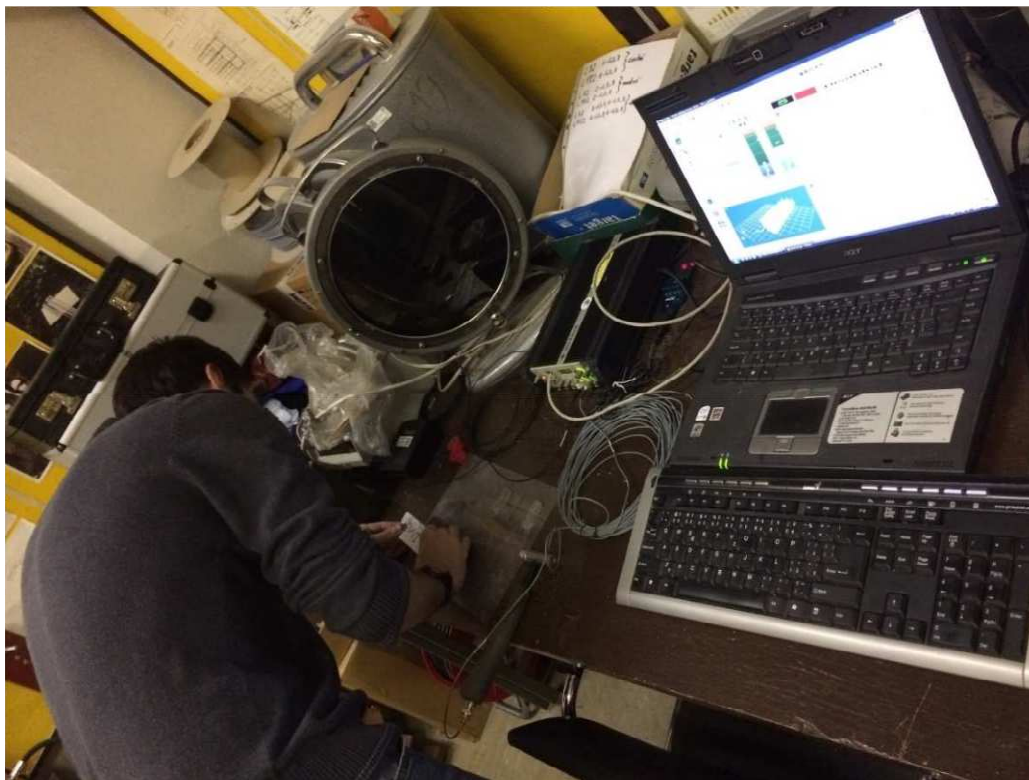
Pro zjištění dynamického modulu pružnosti jsme použili obě metody, které zde postupně rozeberu a následně vyhodnotím výsledná měření, jestli se shodují.

4.2.1 Metoda rezonanční

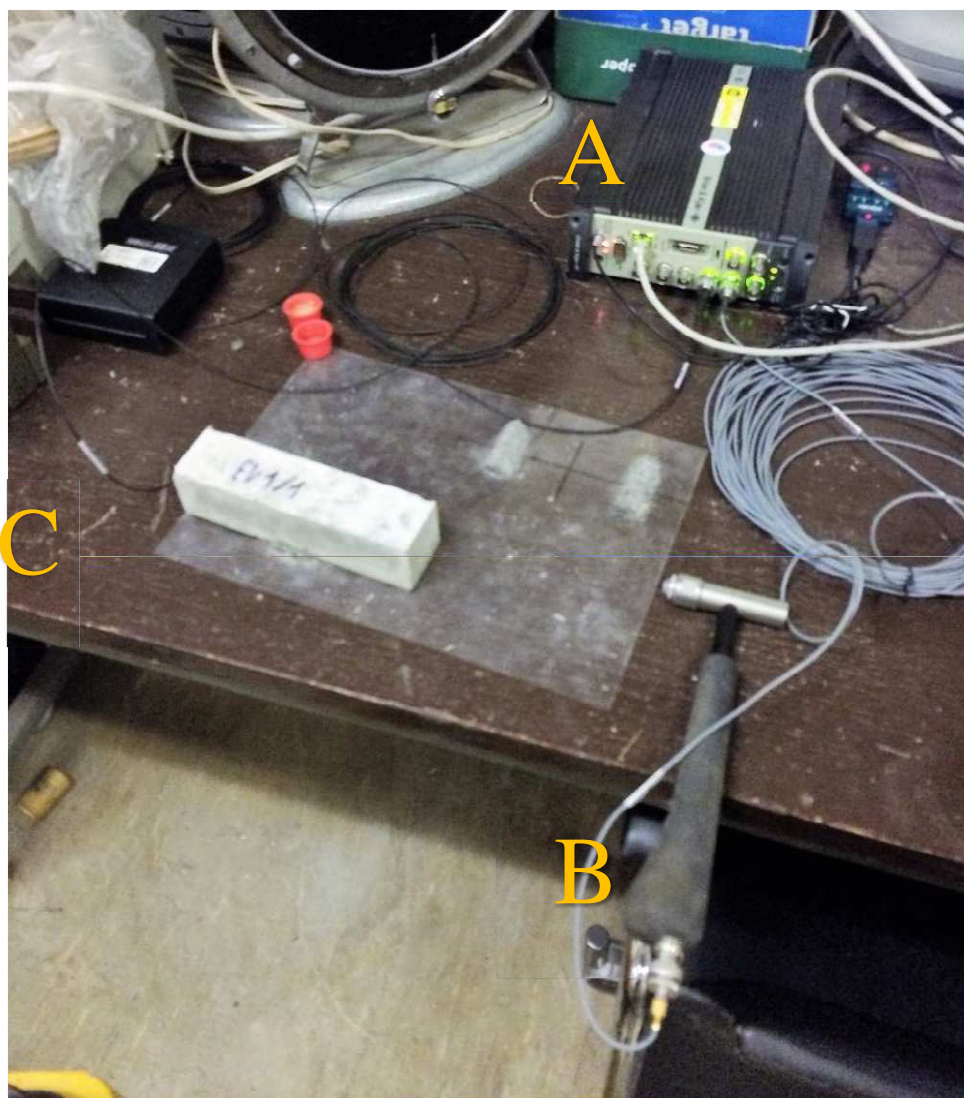
Princip rezonanční metody: měří se základní vlastní frekvence, rozměry a objemová hmotnost každého vzorku. Měření jsem provedl pomocí měřicího přístroje Brüel & Kjær. Celý přístroj se skládá z měřicí stanice Brüel & Kjær typ 3560-B-120, piezoelektrického snímače zrychlení Brüel & Kjær typ 4519-003, rázové kladívka Brüel & Kjær typ 8206 a řídicího PC (v našem případě notebookem značky ACER).

Měření jsme prováděli po 24 hodinách, 7 dnech, 14 dnech, 21 dnech 28 dnech. Měření po 24 hodinách se provedlo na všech vyrobených trámečcích. Po změření a zjištění, že jsou hodnoty velmi podobné ve všech sadách, jsem ostatní hodnoty měřil na trámečcích označených jako AS, BS, CS, DS, ES, AV, BV, CV, DV, EV. Vždy na třech vzorcích v sadě.

Před samotným měřením jsem musel přístroj správně nastavit a kalibrovat. Při zkoušení je nutné mít podpory umístěné, tak aby nebyl omezen pohyb vzorků při kmitání v odpovídajícím vlastním tvaru a aby tuhost podepření byla dostatečně nízká oproti tuhosti vzorku. Z tohoto důvodu jsou podpory vytvořené z dostatečně měkkého materiálu (v našem případě mirelonu). Vzorky jsme podepřeli vždy v místech uzlových linií základních vlastních tvarů odpovídajícím typům kmitání – podélné, příčné, kroutivé. Po uložení vzorků na podpory se na vzorky připevnil pomocí vosku piezoelektrický snímač zrychlení v místech maximální amplitudy kmitání daného vlastního tvaru. Dále se pomocí rázové kladívka vnášela budící síla. Přístroj zaznamenával v časové oblasti budící signál a signál odezvy. Použitím rychlé Fourierovy transformace (dále jen FFT – „Fast Fourier Transform“) byly signály převedeny z časové do frekvenční oblasti. Software PULS LabShop vyhodnotil přenosovou funkci (dále jen FRF – „Frequency Response Function“) jako podíl odezvy a budící síly ve frekvenční oblasti. Maximální amplituda ukazovala, že došlo k rezonanci, ze které se určila vlastní frekvence kmitání vzorku [Hlubocký, 2016].



Obrázek 21: Napojení piezoelektrického snímače zrychlení na vzorek (zdroj: Ing Zuzana Jandová)

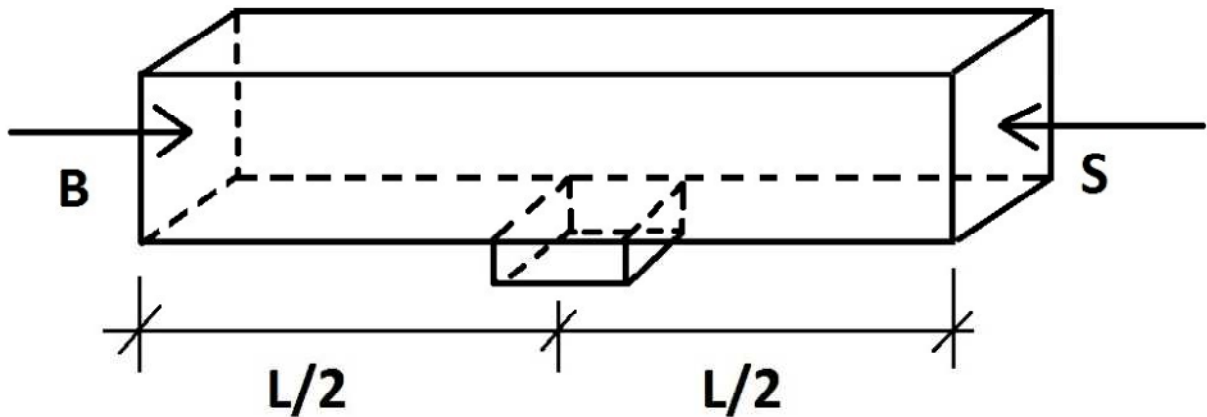


Obrázek 22: Měřící sestava Brüel a Kjør (A – měřicí stanice, B – rázové kladivo, C – piezoelektrický snímač zrychlení) (zdroj: Ing. Zuzana Jandová)

Na základě změřených základních vlastních frekvencí příslušného tvaru kmitání, hmotnosti a rozměrům všech měřených vzorků jsem vyhodnotil dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti ve smyku. Pro jednotlivá měření základních vlastních frekvencí je zapotřebí jiné schéma a jiné místo vnesení budící síly pomocí rázového kladívka. Schémata a vnesení budící síly je popsáno v dalších kapitolách.

Měření základní vlastní frekvence podélného kmitání

Při měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obrázek č. 23 znázorňuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem.



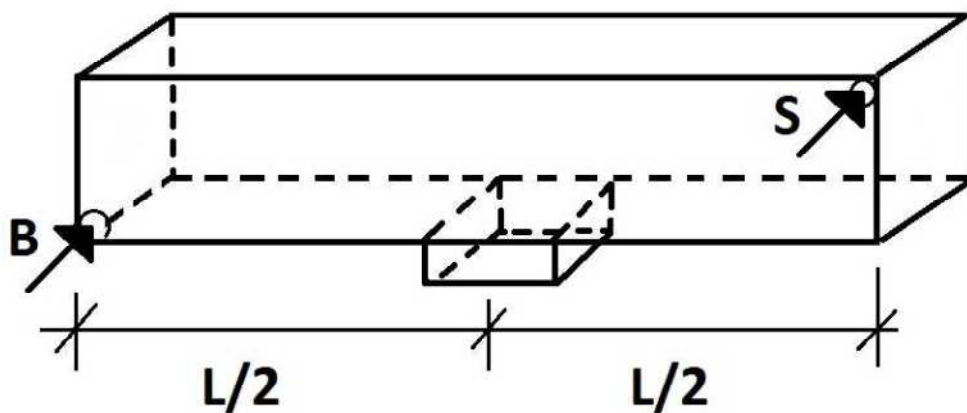
Obrázek 23: Schéma měření podélného kmitání

Měření základní vlastní frekvence krouživého a příčného kmitání vzorku

Při měření základní vlastní frekvence krouživého (torzního) kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obrázek č. 24 znázorňuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem.

Při měření základní vlastní frekvence příčného (ohybového) kmitání vzorku ve tvaru hranolu jsou podpory umístěny v místě uzlových linií, které leží ve vzdálenosti $0,024 L$ od čel vzorku, kde L je délka vzorku.

V praxi se základní frekvence krouživého (torzního) a příčného (ohybového) kmitání získává pouze z jednoho měření základní vlastní frekvence, a to z měření základní vlastní frekvence krouživého (torzního) kmitání.



Obrázek 24: Schéma měření příčného a krouživého kmitání

Dynamický modul pružnosti jsem vypočetl z naměřené základní vlastní frekvence podélného vzorku:

$$1) \quad E_{d,l} = \frac{4lmf_l^2}{bt},$$

kde $E_{d,l}$ je dynamický modul pružnosti pro podélné kmitání [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_l je základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku [Hz], b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m].

Výpočet dynamického modulu pružnosti jsem kontroloval z naměřené základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku:

$$2) \quad E_{d,p} = \frac{0,9465l^3mf_p^2T_l}{bt},$$

kde $E_{d,p}$ je dynamický modul pružnosti pro příčné kmitání [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_p je základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku [Hz], T_l je korekční součinitel zahrnující délku vzorku a Poissonova čísla, b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m].

Dynamického modulu pružnosti ve smyku jsem vypočetl z naměřené základní vlastní frekvence krouživého kmitání vzorku:

$$3) \quad G_d = \frac{4lmf_t^2}{bt} \frac{B}{1+A},$$

$$4) \quad B = \frac{\frac{b+t}{t+b}}{4\frac{t}{b} - 2,52(bt)^2 + 0,21\left(\frac{t}{b}\right)^6},$$

kde G_d je dynamický modul pružnosti ve smyku [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_t je základní vlastní frekvence krouživého kmitání vzorku [Hz], b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m], A je empirický součinitel poměru šířky a výšky vzorku.

4.2.2 Metoda impulsová

Princip průchodové metody: Na vzorek se umístí proti sobě dvě stejné sondy. Jedna slouží jako vysílač (budič) a druhá jako přijímač (snímač). Budič ultrazvuku s daným kmitočtem se vybírá podle druhu materiálu a podle měřicí základny, což je nejkratší přímá

spojnice středu dotykových ploch sond zkušebního přístroje. Při průchodové metodě nejsme schopni určit polohu vad ve směru tloušťky.



Obrázek 25: Schéma měření impulsovou ultrazvukovou metodou

Před měřením jsme provedli kalibraci. Kalibraci jsme provedli měřením na jednom zkušebním místě 2 krát. Dynamický modul pružnosti jsem vypočetl z naměřených hodnot ultrazvukovou impulsovou metodou:

$$4) \quad E_{d,l} = \frac{\rho v^2}{k^2},$$

kde $E_{d,l}$ je dynamický modul pružnosti pro podélné kmitání [MPa], v^2 je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s], k je součinitel rozměrnosti trojrozměrného prostředí [-]. Pro výpočet dynamického modulu pružnosti jsem potřeboval součinitel rozměrnosti trojrozměrného prostředí k [-], který jsem vypočítal:

$$5) \quad k = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}},$$

kde ν je Poissonův koeficient (uvedený v literatuře pro jednotlivé materiály) v mém případě, jsem Poissonův koeficient spočítal z rezonanční metody v předešlé kapitole.



Obrázek 26: Měření impulsovou ultrazvukovou metodou

Měření probíhá na předem vyznačených bodech na vzorku. Centrovane přitlačujeme sondy na tyto značky. Sondy je důležité přitlačovat všechny stejně velkou silou, pomocí vazebního prostředku. Jako vazební prostředek jsme použili vazební gel. Důvodem použití vazebního gelu je lepší odraz ultrazvukových vln, který zamezí, aby mezi sondou a vzorkem nevznikla vzduchová mezera, bez toho gelu by vzorkem prošlo velmi málo impulzů.

4.2.3 Vyhodnocení

Srovnání výsledků dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu ve smyku v suchém i v mokřém prostředí jsou uvedeny v následujících grafech č. 3 – 10. Výsledky prezentované v grafech ukazují, že modifikovaná cementová směs má menší dynamický modul pružnosti a dynamický modul ve smyku. V rozsahu 1. až 7. dne se hodnoty zvětšily dvojnásobně. Potom je nárůst víceméně lineární, pouze o několik desetin GPa za týden. Referenční vzorky (ES, EV) v suchém i v mokřém prostředí dosahují největších hodnot.

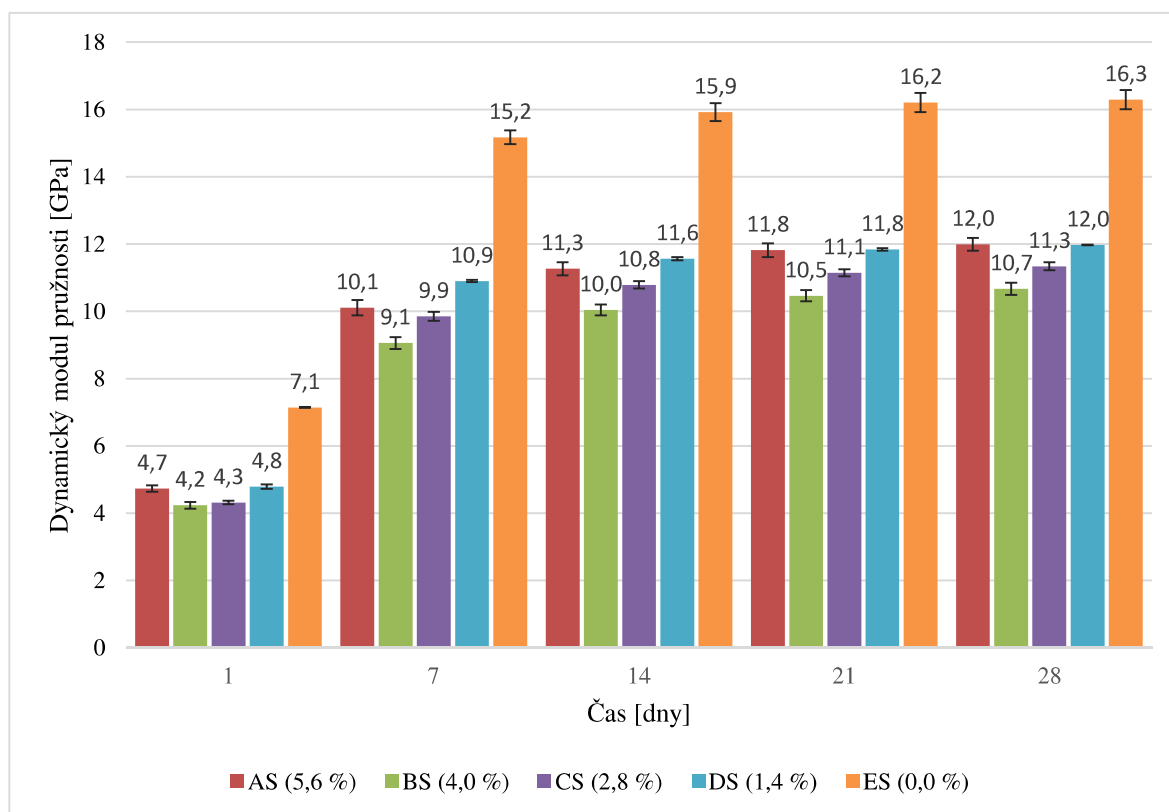
Porovnáním hodnot vzorků, které byly ponechány v suchém prostředí, viz graf č. 3, jsem došel k závěrům, že konkrétní obsah PVA nemá vliv na dynamický modul. Protože hodnoty vzorků AS, BS, CS, DS jsou přibližně stejné. Dynamické moduly pružnosti jsou o cca 4,3 GPa

nižší, což je o cca 26 % a dynamické moduly ve smyku jsou o cca 2 GPa nižší, což je o cca 30 %, než u referenčního vzorku. Ale můžeme zaznamenat rozdíl v mokřém prostředí, viz graf č. 4, se snižujícím se množstvím PVA roste hodnota dynamického modulu. Hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou u AV, BV nižší o 9,3 GPa, což je 46 %, u CV nižší o 8,4 GPa, což je 41% a u DV o 6,3 GPa, což je 31 %, než u referenčního vzorku. Hodnoty dynamického modulu ve smyku mají podobnou tendenci. AV, BV má nižší hodnotu o 3,7 GPa, což je 47 %, CV o 3,3 GPa, což je 42 % a DV o 2,5, což je 32 %, než u EV.

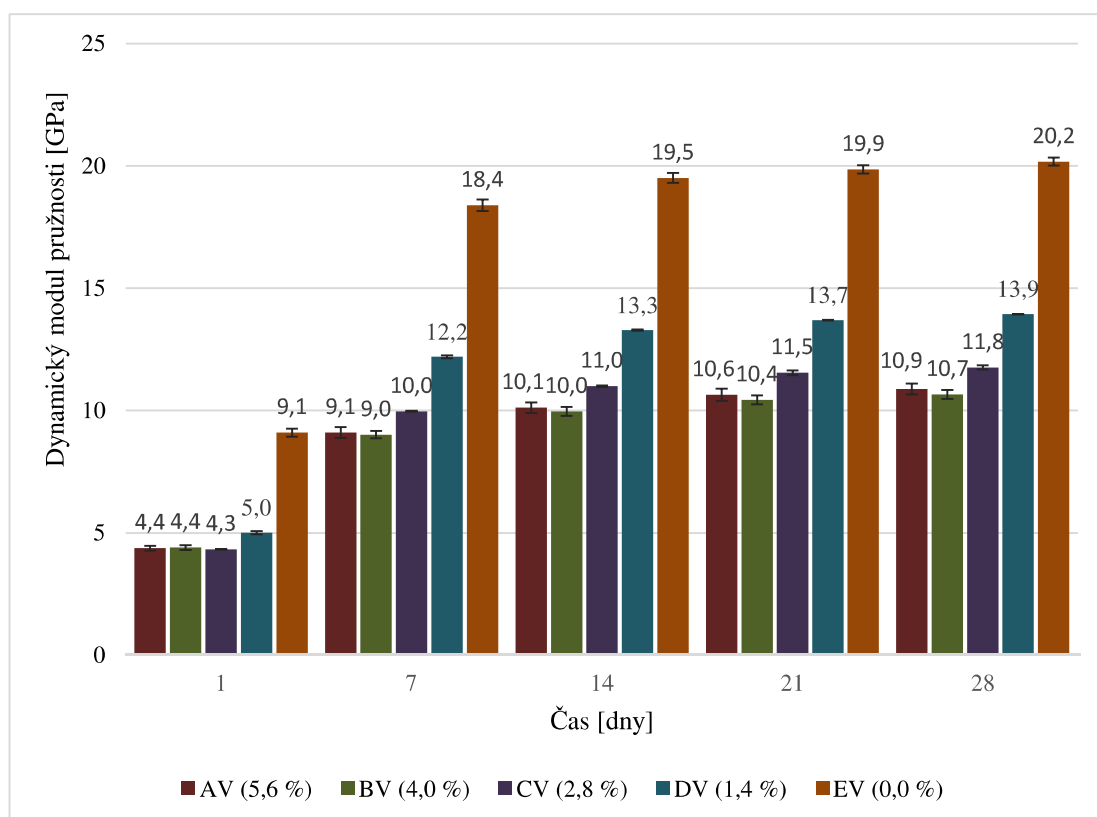
Také jsou patrné větší hodnoty vzorků, které byly celou dobu vloženy v mokřém prostředí o 3-4 GPa, což je 20 – 27 % (u dynamického modulu pružnosti) a o 1 GPa, což je 16 % (u dynamického modulu ve smyku) u referenčního vzorku označeného EV, oproti vzorkům nechaným v suchém prostředí. Hodnoty ostatních vzorků modifikovaných PVA označených jako B a C jsou podobné, ať v suchém či mokřém prostředí. Ale vzorky A a D mají rozdílné hodnoty. Rozdílné v tom, že vzorek A (s největším obsahem PVA 5,6 hm. %) má v mokřém prostředí pokles dynamického modulu pružnosti o 1,2 GPa, což je 10 % a pokles dynamického modulu ve smyku o 0,5 GPa, což je 12,5 %. Naopak vzorek D (s obsahem PVA 1,4 hm. %) vykazuje nárůst v mokřém prostředí, dynamického modulu pružnosti o 1,9 GPa, což je 16 % a dynamického modulu ve smyku o 0,6 GPa, což je 12,5 %. Uvedené procentuální rozdíly jsou pro hodnoty při stáží vzorků 28 dní. Ostatní porovnání můžeme provést vizuálně z grafů č. 3 – 10.

Kontrolu dynamického modulu pružnosti jsem provedl výpočtem ze základní vlastní frekvence příčného kmitání, viz grafy č. 5 a 6, jelikož jsou hodnoty stejné nebo se liší jen o pár desetin GPa. Mohu konstatovat, že měření dynamického modulu proběhlo úspěšně.

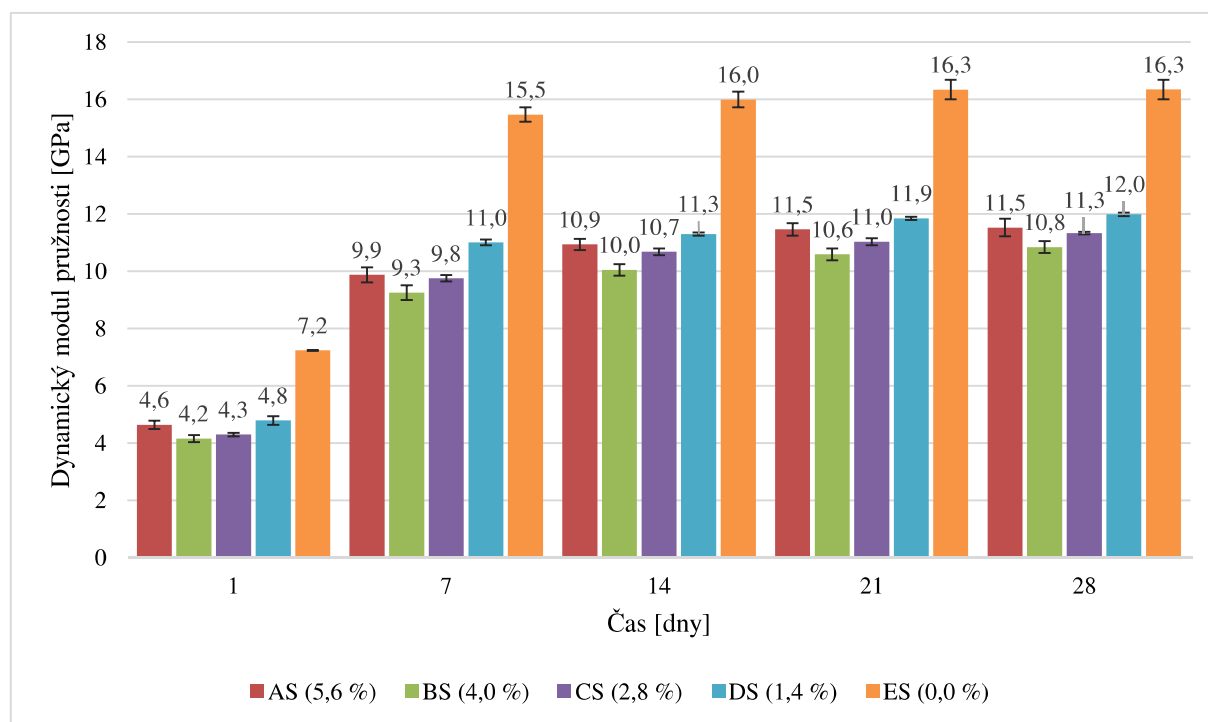
V porovnání se studií [Topič, 2015] je dynamický modul pružnosti i dynamický modul ve smyku srovnatelný s hodnotami naměřenými v rámci mé diplomové práce, ale pouze u referenčního vzorku. I když vzorky se liší obsahem cementu. V studii [Topič, 2015] vyrobili vzorky z cementu, když to v našem případě jsme použili 65% cementu a 35% recyklovaného betonu. Dynamický modul pružnosti i dynamický modul ve smyku ostatních vzorků, které jsou modifikovány PVA. Jsou odlišné i přes stejné hmotnostní množství PVA, ale když vezmu v úvahu hmotnostní množství PVA ku cementu, tak právě kvůli zmíněnému recyklovanému betonu jako plnivu, obsahují vzorky větší hmotnostní množství PVA. Možné vysvětlení na snížení daných hodnoty je tedy recyklovaný beton.



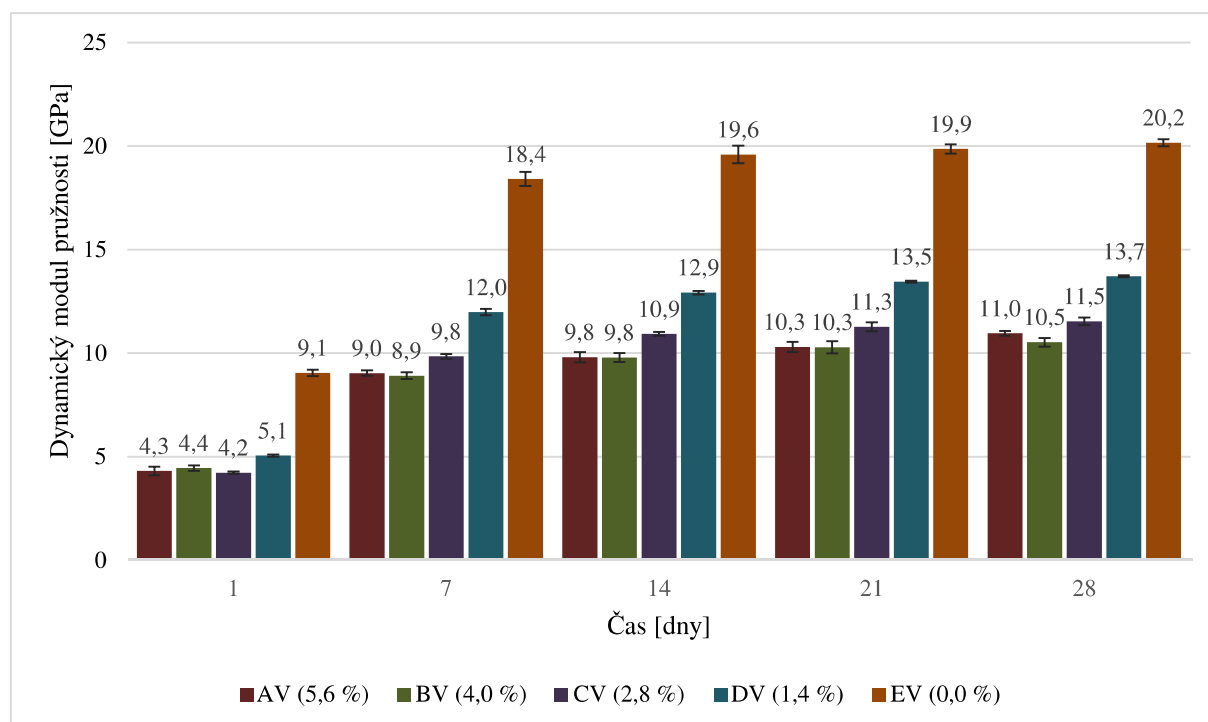
Graf 3: Dynamický modul pružnosti vypočtený z podélného kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou



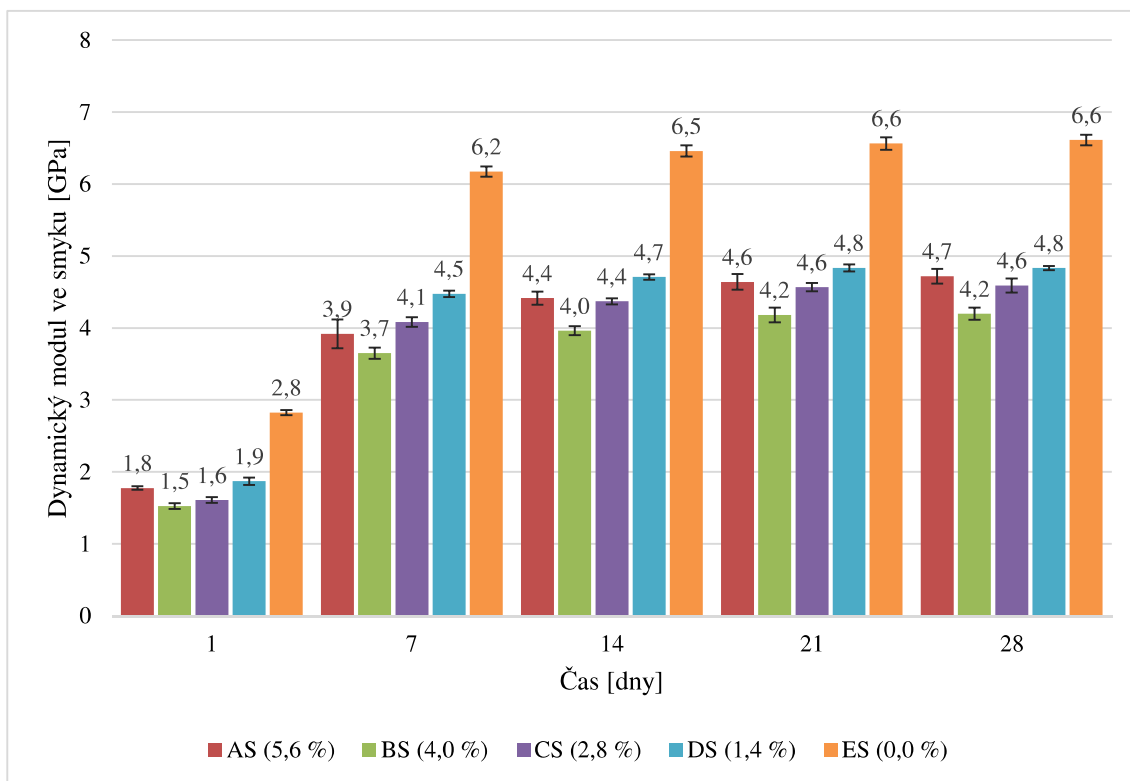
Graf 4: Dynamický modul pružnosti vypočtený z podélného kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou



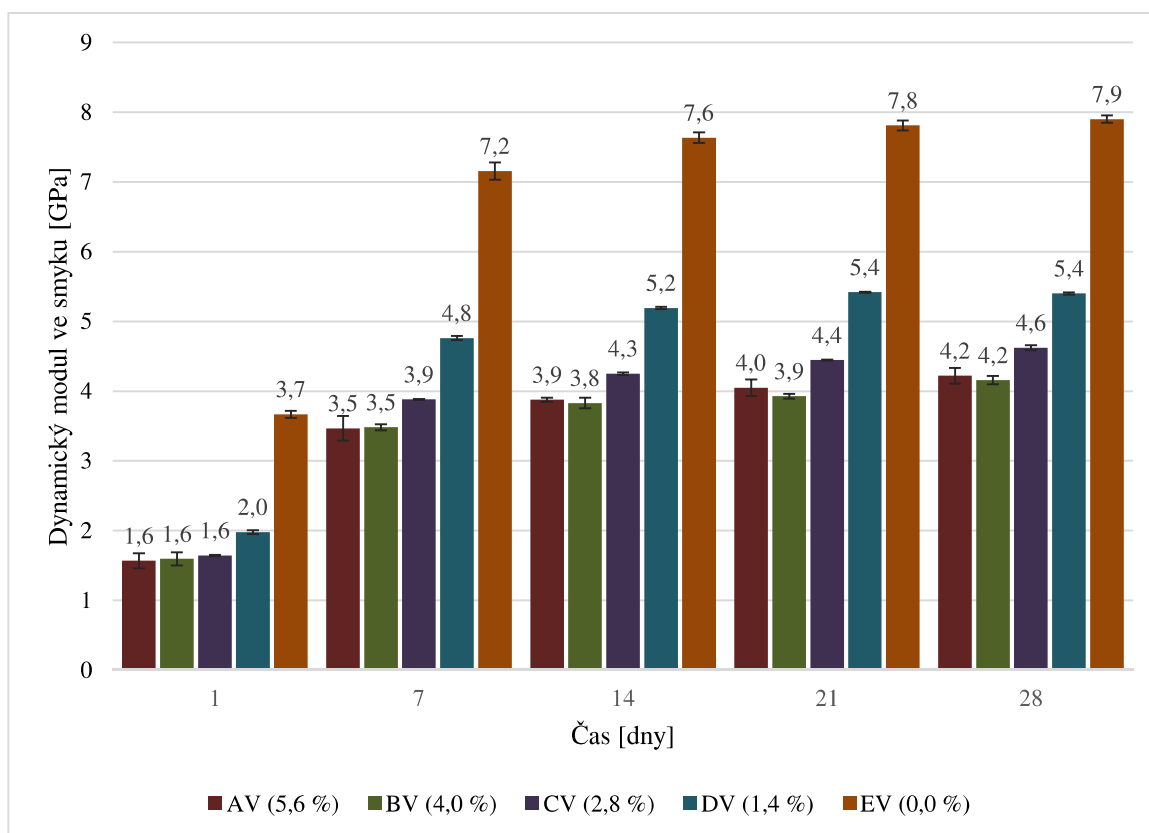
Graf 5: Dynamický modul pružnosti vypočtený z příčného kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou



Graf 6: Dynamický modul pružnosti vypočtený z příčného kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou

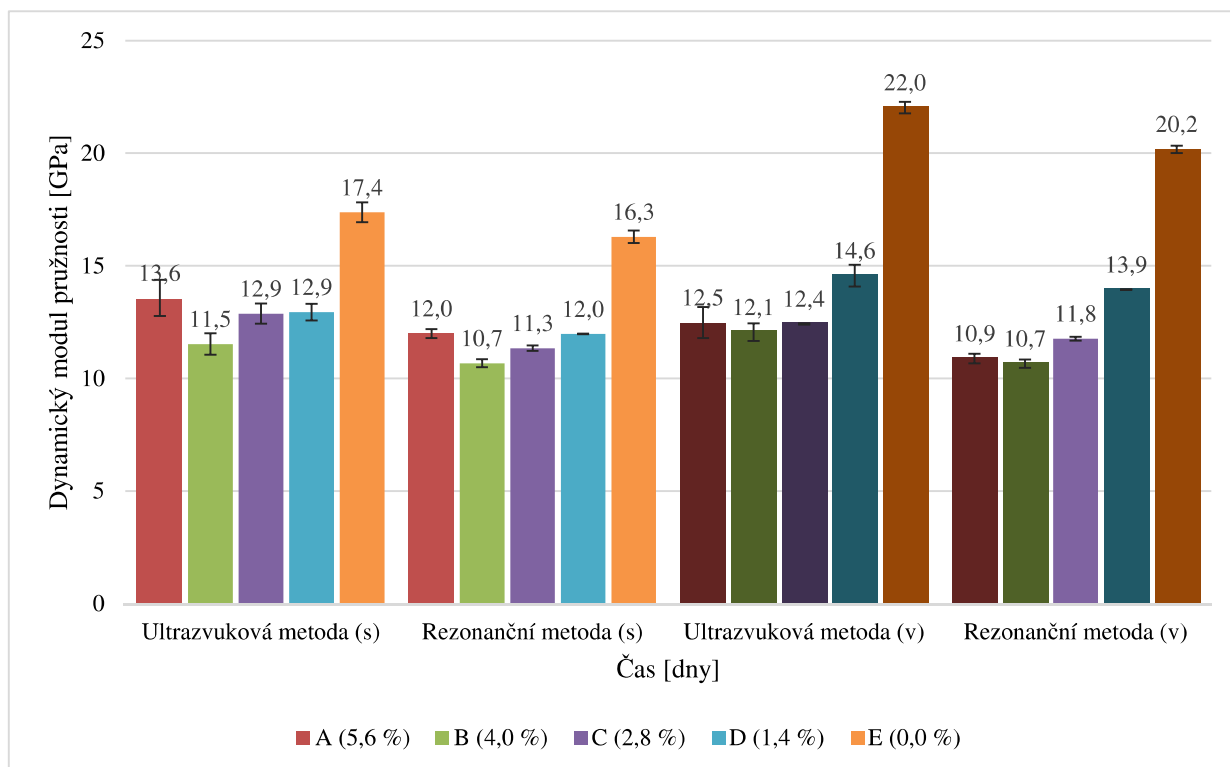


Graf 7: Dynamický modul pružnosti ve smyku vypočtený z torzního kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou



Graf 8: Dynamický modul pružnosti ve smyku vypočtený z torzního kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou

Jako poslední vyhodnocení tu mám porovnání dvou nedestruktivních metod dynamického modulu pružnosti, a to metodu rezonanční a metodu ultrazvukovou. Hodnoty, které jsem měřil a porovnával, jsou pouze 28 denní. Jak v suchém, tak v mokřém prostředí. V grafu č. 9 jsou prostředí, ve kterých byly vzorky uskladnění označeny: (s) pro suché prostředí, (v) pro mokřé prostředí. Z grafu č. 9 je patrné, že ultrazvukovou impulzovou metodou jsou hodnoty v obou měřených prostředích vyšší o cca 1,2 GPa, což je cca 9 %. Rozdíl v měřeních může být i v nedokonalém povrchu vzorku lícových stran, z důvodu nedokonalého povrchu forem.



Graf 9: Porovnání dynamických modulů pružnosti měřených rezonanční metodou a impulzovou ultrazvukovou metodou po 28 dnech

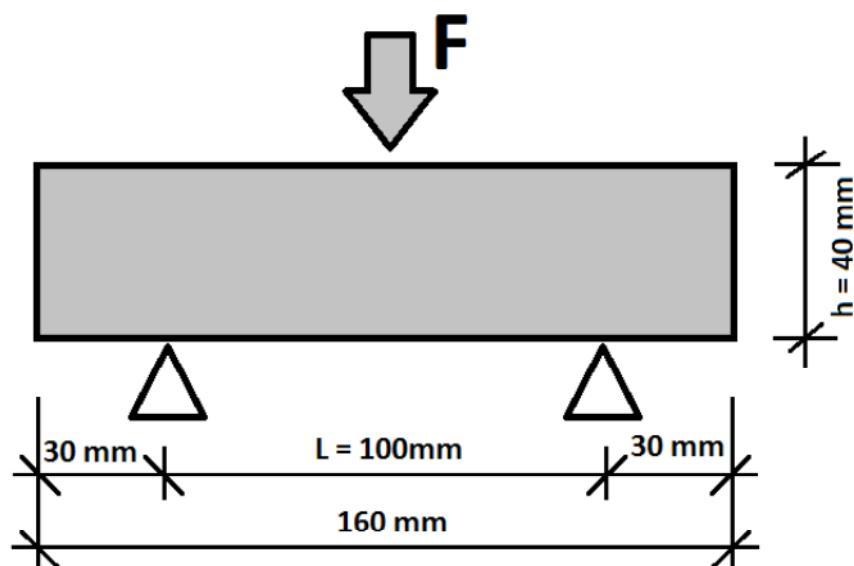
4.3 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu se naměřila zkouškou tzv. tříbodovým ohybem na trámečcích o rozměrech 40×40×160 mm, po 28 dnech od výroby. Zmíněnou zkouškou se testovaly tři vzorky z každé sady směsi označené písmenem S (AS, BS, CS, DS, ES) a V (AV, BV, CV, DV, EV), celkem 30 vzorků. Zkoušku provedl Ing. Josef Fládr, Ph.D. v laboratořích ČVUT. Provedená zkouška je destruktivní, z čehož vyplývá, že Ing. Josef Fládr, Ph.D. vzorky přelomil na dvě části, které se dále použily na následnou zkoušku pevnosti v tlaku. Při všech těchto zkouškách jsem byl osobně přítomen.



Obrázek 27: Příklad přístroje FP 100

Pevnost v tahu za ohybu se měřila tříbodovým ohybem. Zkouška se prováděla na přístroji, viz obrázek č. 27, s maximální silou 100 kN. Způsob zatěžování se definoval tak, jako by se měřil klasický beton, to znamená konstantní rychlostí 0,2 mm/s. Vzorky byly přístrojem zatěžovány kolmo na směr hutnění. A protože se jednalo o tříbodový ohyb, viz obrázek č. 28, zatížení bylo definované jako samostatná síla působící uprostřed. Vzdálenost mezi podporami jsem opět převzal od Ing. Jaroslava Topiče Ph.D., která byla 100 mm. Vzorky se zatěžovaly tak dlouho, dokud se neporušily, a protože se jednalo o nicím nevyztužené vzorky, předpokládal jsem, že porušení bude křehkým lomem, což se mně během měření potvrdilo. Příklad přístroje zaznamenával aktuální zatěžovací sílu a deformaci. Data se ukládala do počítače.



Obrázek 28: Schéma zkoušky tříbodovým ohybem

Pevnost v tahu za ohybu jsem vypočetl ze vzorce pro napětí:

$$6) \quad \sigma = \frac{M}{W},$$

kde M je ohybový moment uprostřed rozpětí [MNm], W je průřezový modul [m³] a σ je napětí, respektive pevnost v tahu za ohybu [MPa].

Pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu jsem potřeboval výpočet ohybového momentu uprostřed rozpětí M [MNm] podpor:

$$7) \quad M = \frac{F L}{2 \cdot 2},$$

kde F je zatěžovací síla [MN] a L je rozpětí podpor [m].

A také jsem potřeboval vědět průřezový modul W [m³], který se u obdélníkového průřezu vypočte:

$$8) \quad W = \frac{1}{6} b t^2,$$

kde b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m].



Obrázek 29: Zkouška tříbodovým ohybem



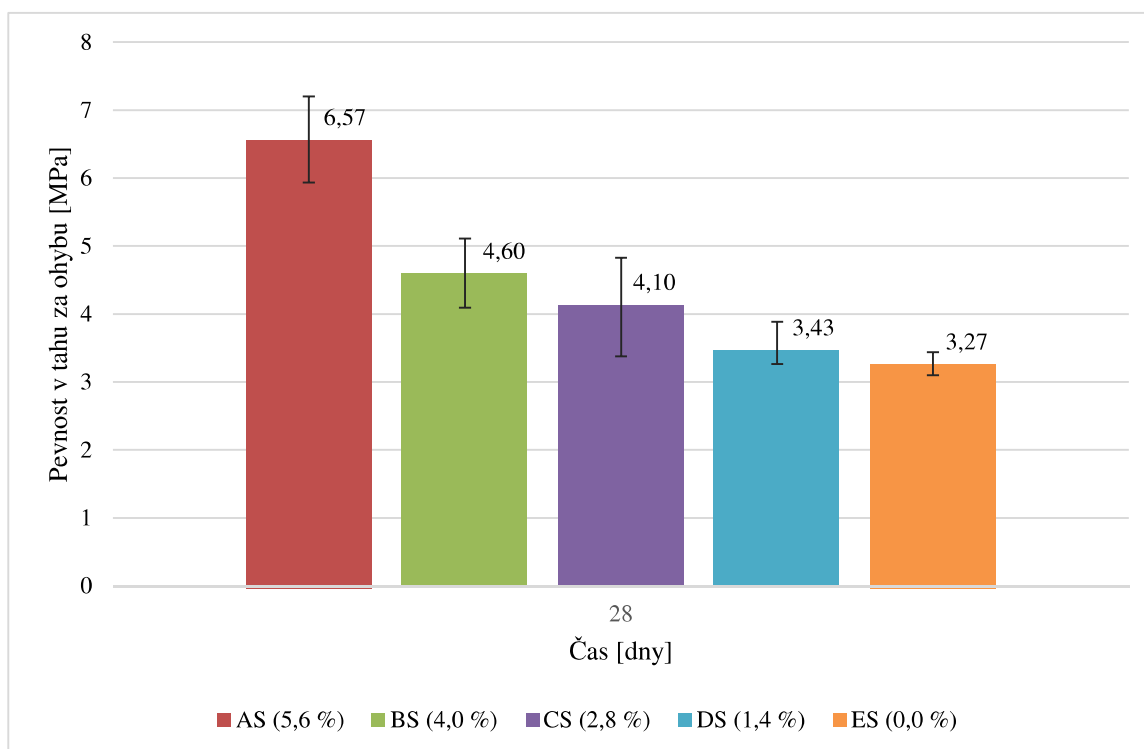
Obrázek 30: Zkouška tříbodovým ohybem

4.3.1 Vyhodnocení

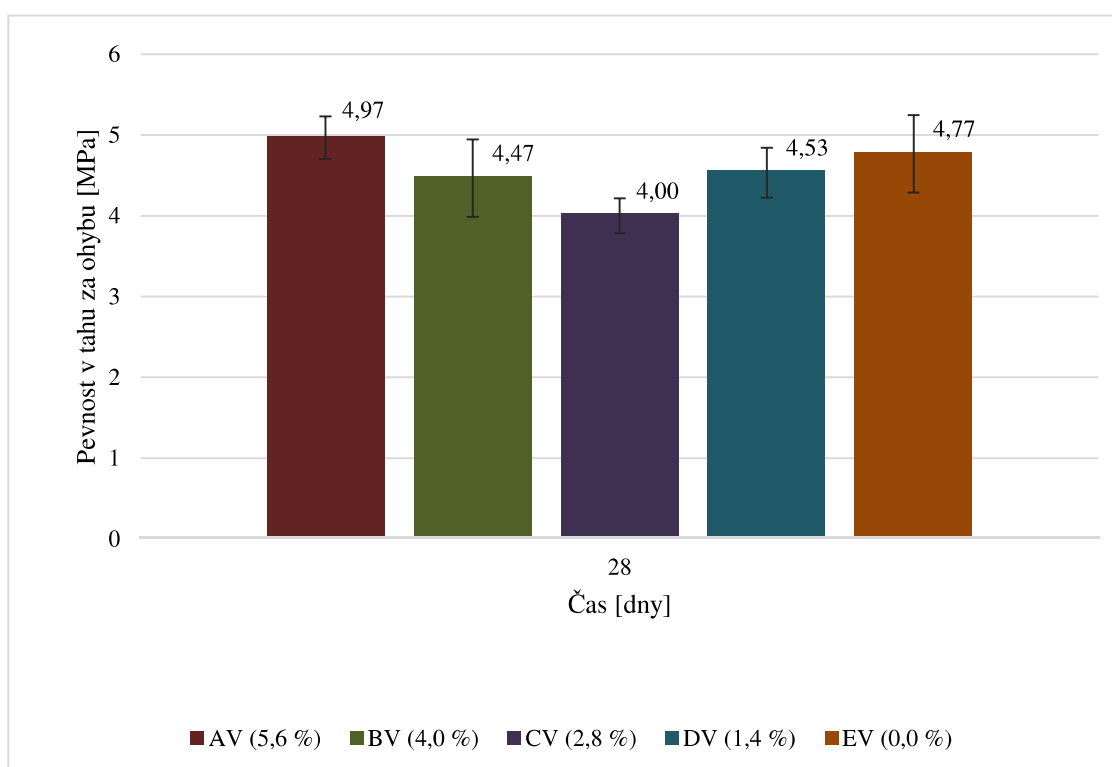
Po stanovení pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých vzorků a jejich zprůměrováním jsem jejich průměrné hodnoty shrnul v následujících grafech, které jsou rozdělené podle prostředí, kde se vzorky po dobu 28 dnů nacházely. V grafu č. 10 je patrný trend klesající pevnosti v tahu za ohybu s klesajícím množstvím PVA. Největší pevnosti v tahu za ohybu dosahoval vzorek s největším obsahem PVA, jehož hodnota je 6,57 MPa, nejmenší pevnost vykazoval referenční vzorek, pouze 3,27 MPa, což je o 50 % nižší hodnota. Na místo toho v grafu č. 11 už není patrné, že s přibývajícím množstvím PVA roste i pevnost v tahu za ohybu, když jsou vzorky ponořené do vody. Je to z důvodu vyplavování PVA ze vzorků, které je vidět jako film a usazená vrstva na dně nádoby ve vodě po vyndání vzorků.

Z obou grafů je zřejmý nárůst ohybové pevnosti referenčního vzorku ve vodě o 1,5 MPa, což je o téměř 50 %. A také už zmíněné vyplavování PVA. Má za následek stejné pevnosti v tahu za ohybu bez ohledu na počáteční množství PVA ve vzorcích. Pevnost v tahu za ohybu dosahuje cca 4,6 MPa.

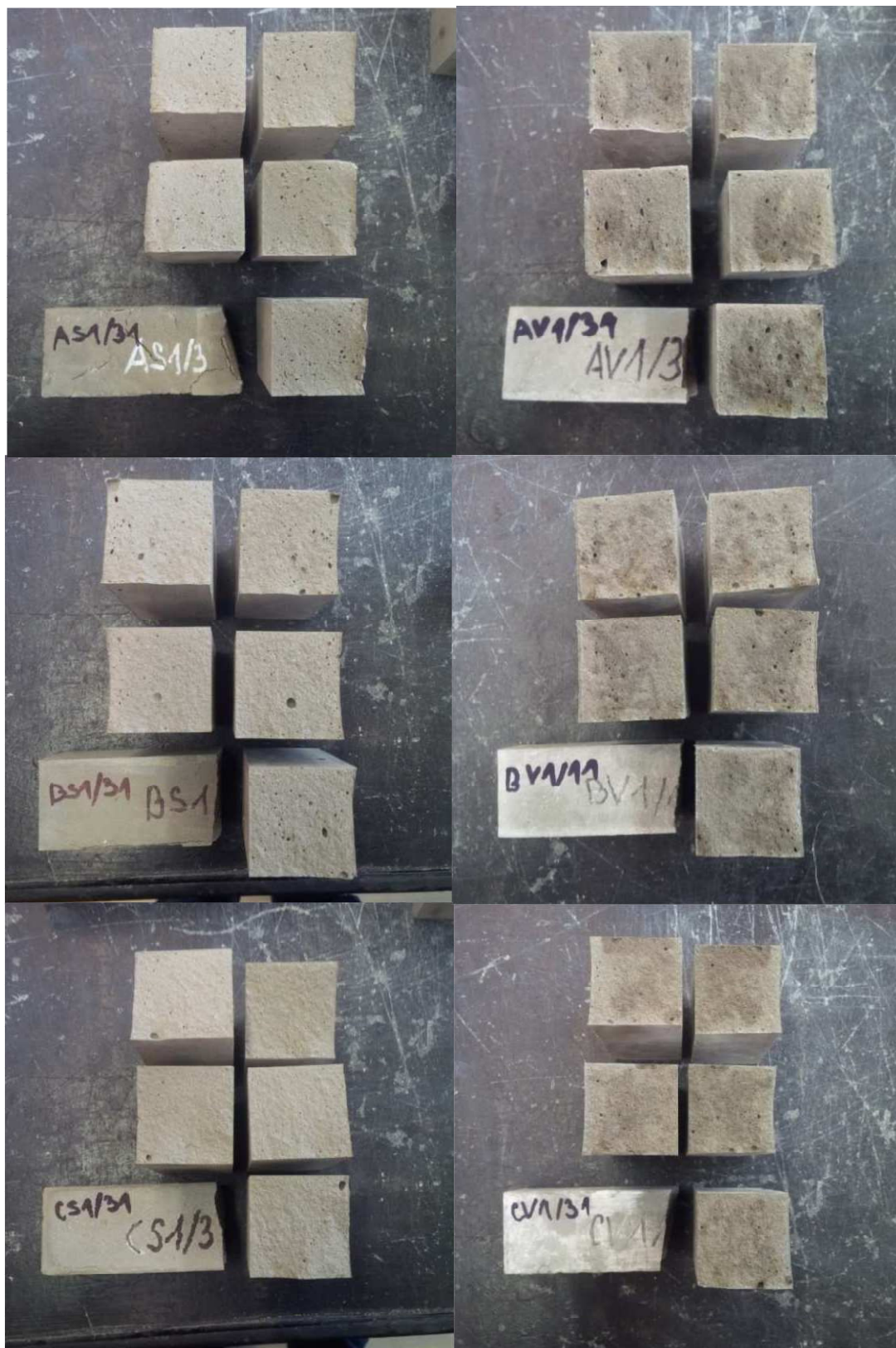
Oproti studii [Topič, 2015] hodnoty pevností v tahu za ohybu se liší o více než 50 % u všech porovnatelných vzorků. I referenční vzorek má pevnost v tlaku za ohybu 3,27 MPa a ve studii [Topič, 2015] dosahuje pevnosti 7,5 MPa.



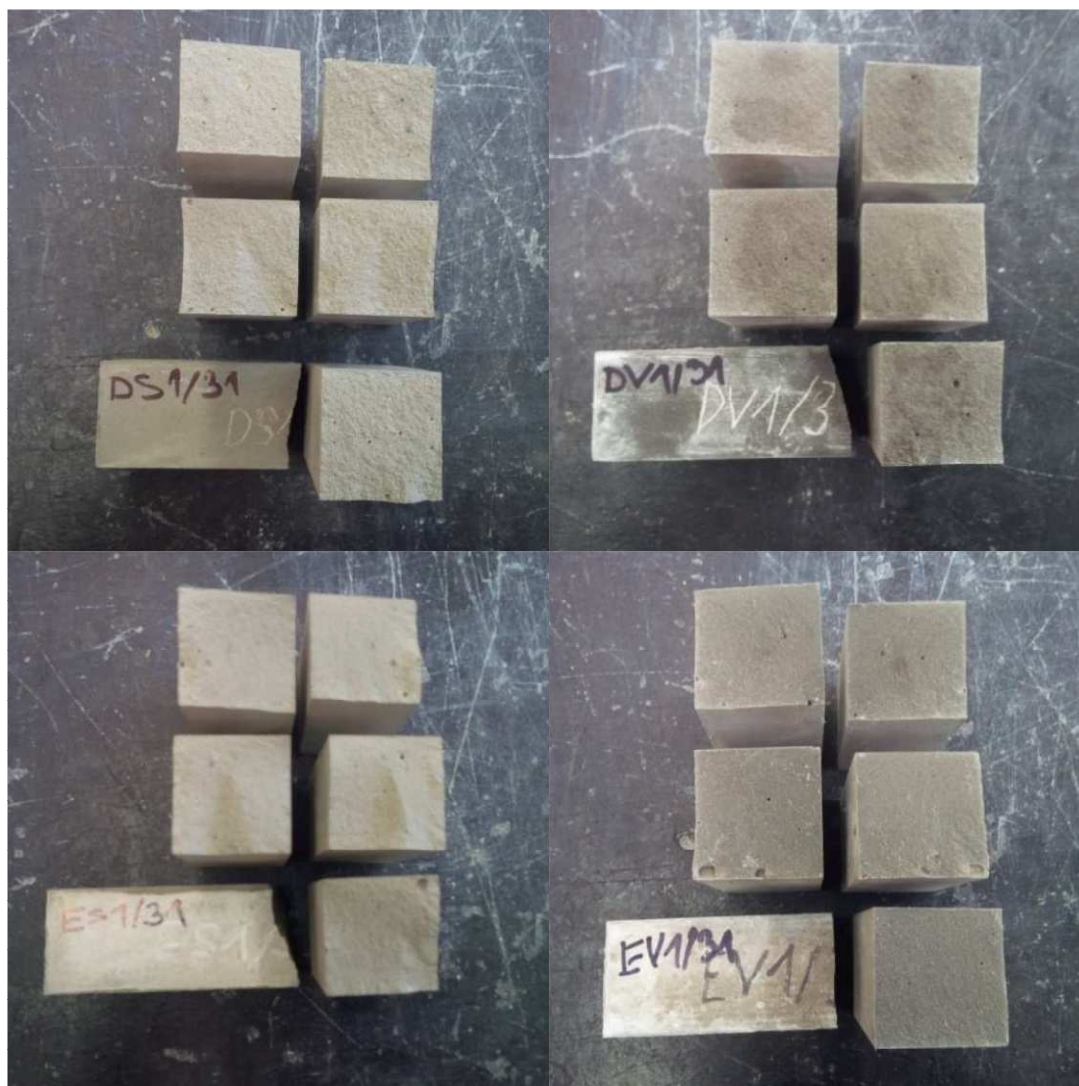
Graf 10: Pevnost v tahu za ohybu při stáří vzorků 28 dní v suchém prostředí



Graf 11: Pevnost v tahu za ohybu při stáří vzorků 28 dní v mokřém prostředí



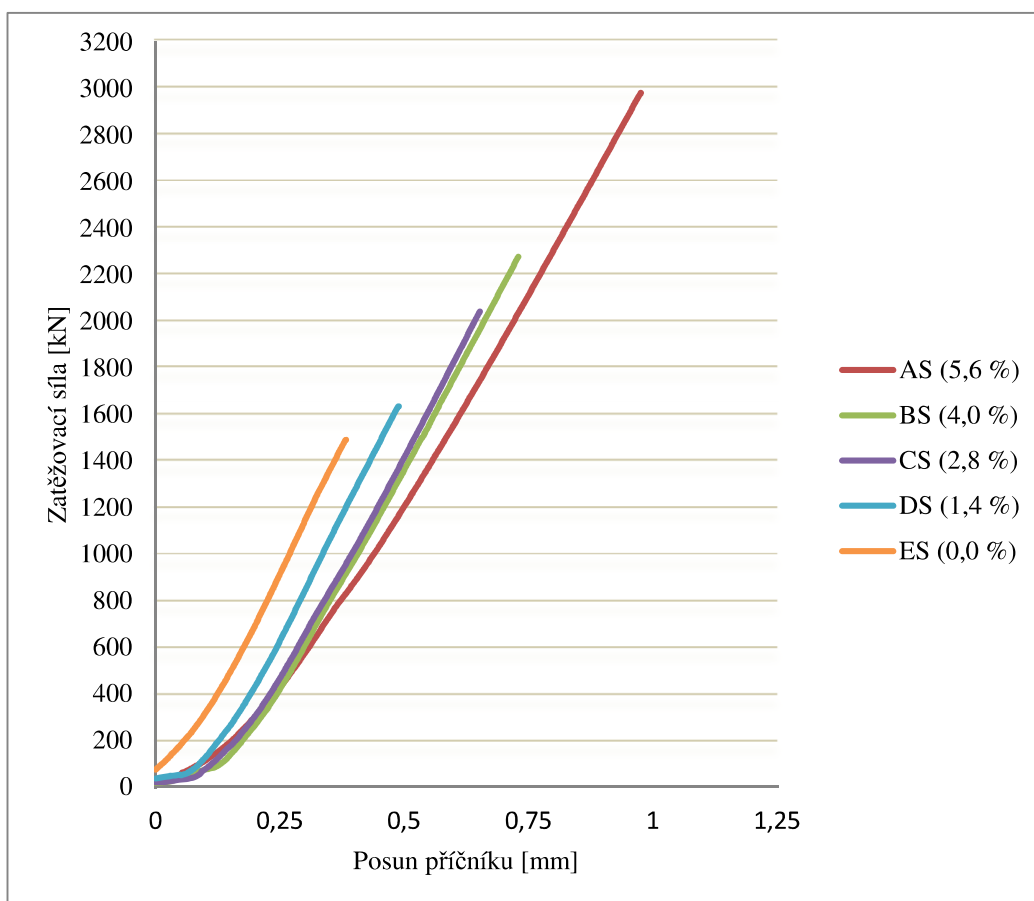
Obrázek 31: Vzorky AS, AV, BS, BV, CS, CV po zkoušce: pevnost v tahu za ohybu



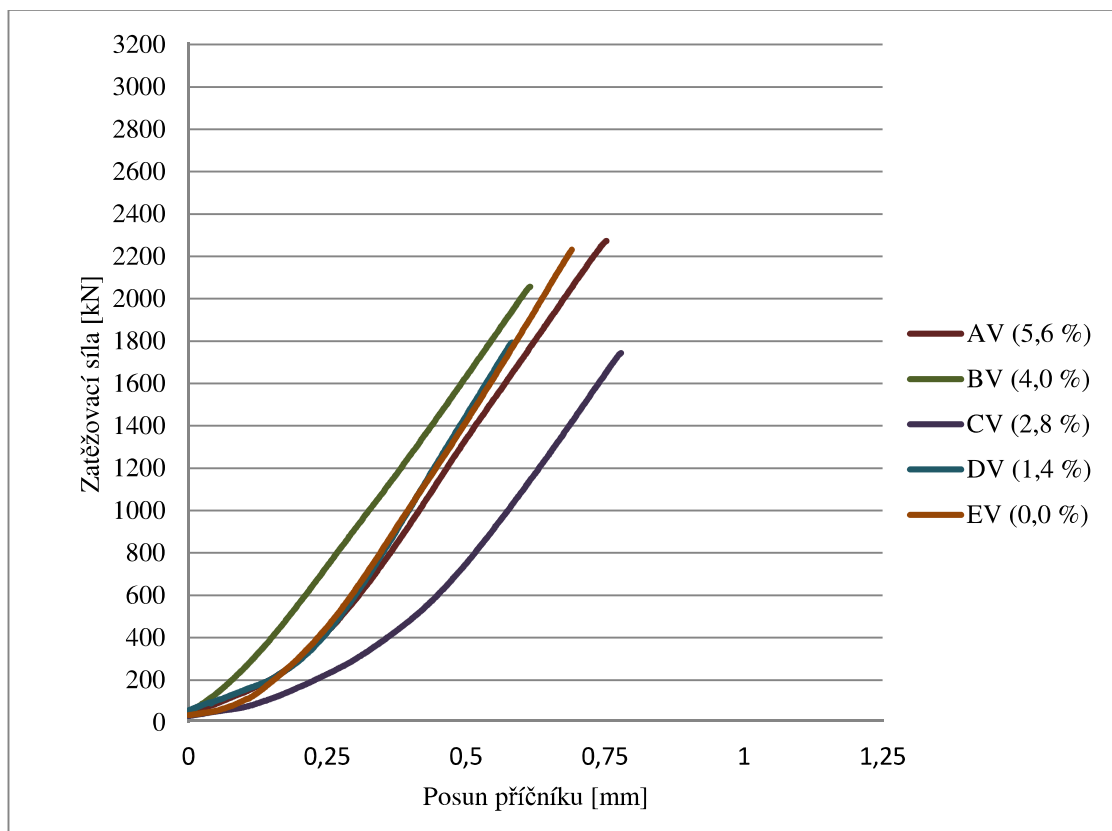
Obrázek 32: Vzorky DS, DV, ES, EV po zkoušce: pevnost v tahu za ohybu

Na průběhu zkoušky v tahu za ohybu viz graf č. 12 a 13 je vidět zakončení křehkým lomen bez ohledu na množství PVA ve vzorkách, a na tom zda jsou ponechány na suchu či ve vodě. V grafu č. 12 je dále patrná malá pevnost v tahu za ohybu referenčního vzorku ES, který se láme už při průhybu 0,4 mm. Když to vzorek s největším množstvím PVA (5,6 hm. %) dosahuje největšího posunu příčnicku 1 mm a největší pevnosti.

Graf č. 13 znázorňuje nárůst pevnosti referenčního vzorku v tahu za ohybu a průhyb oproti vzorkům v suchém prostředí skoro dvojnásobný 0,7 mm. Po 28 dnech vzorek AV stále dosahuje největší pevnosti, ale vlivem odplavení PVA ztlačně menší.



Graf 12: Průběh zkoušky v tahu za ohybu vzorků v suchém prostředí



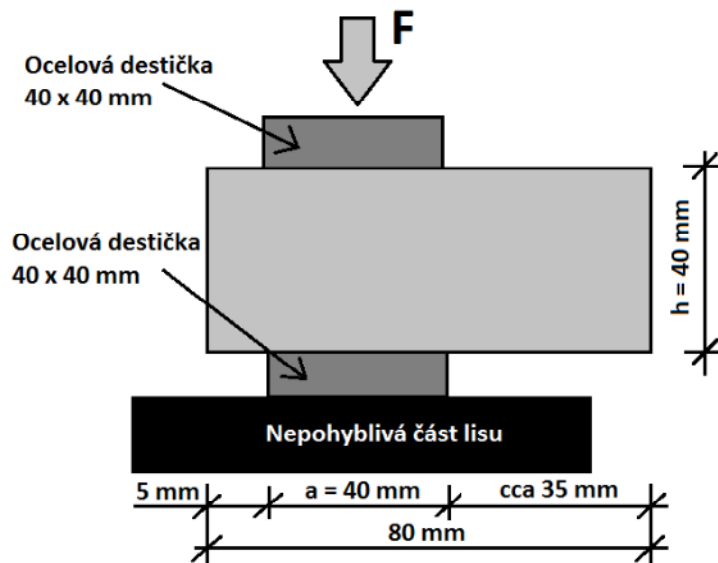
Graf 13: Průběh zkoušky v tahu za ohybu vzorků v mokřém prostředí

4.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku opět měřil Ing. Josef Fládr, Ph.D., jednoosou tlakovou zkouškou na vzorkách zlomených ze zkoušky pevnost v tahu za ohybu o rozměrech 40×40× cca 80 mm. Testováno bylo 5 vzorků z každé sady směsi, celkem 55 vzorků při stáří 28 dní. 5 vzorků, respektive 1 vzorek z každé sady se ponechal a uskladnil.

4.4.1 Měření

Pevnost v tlaku se měřila jednoosou zkouškou pevností v tlaku. Zkouška se provedla na samém přístroji FP 100, co v předešlé kapitole. Použitý měřicí stroj má rozsah zatěžovací síly 0 kN až 100 kN. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí 0,3 mm/s. Výstupem měření byl časový průběh zatěžovací síly a svislého posunu. Vzorky jsme zatížili kolmo na delší rozměr. Zatěžování probíhalo pomocí jedné síly působící na plochu 40×40 mm. Jako roznášecí plochy byla použita ocelové destičky o rozměrech, viz obrázek č. 33. Vzorky přístroj zatěžoval až do úplného porušení.



Obrázek 33: Schéma zkoušky jednoosým tlakem

Pevnost v tlaku jsem vypočetl ze vzorce pro napětí:

$$9) \quad \sigma = \frac{F}{A},$$

kde F je zatěžovací síla [MN], A je zatěžovací plocha ocelové roznášecí destičky [m^2], σ je napětí, respektive pevnost v tlaku [MPa].



Obrázek 34: Zkouška jednoosým tlakem



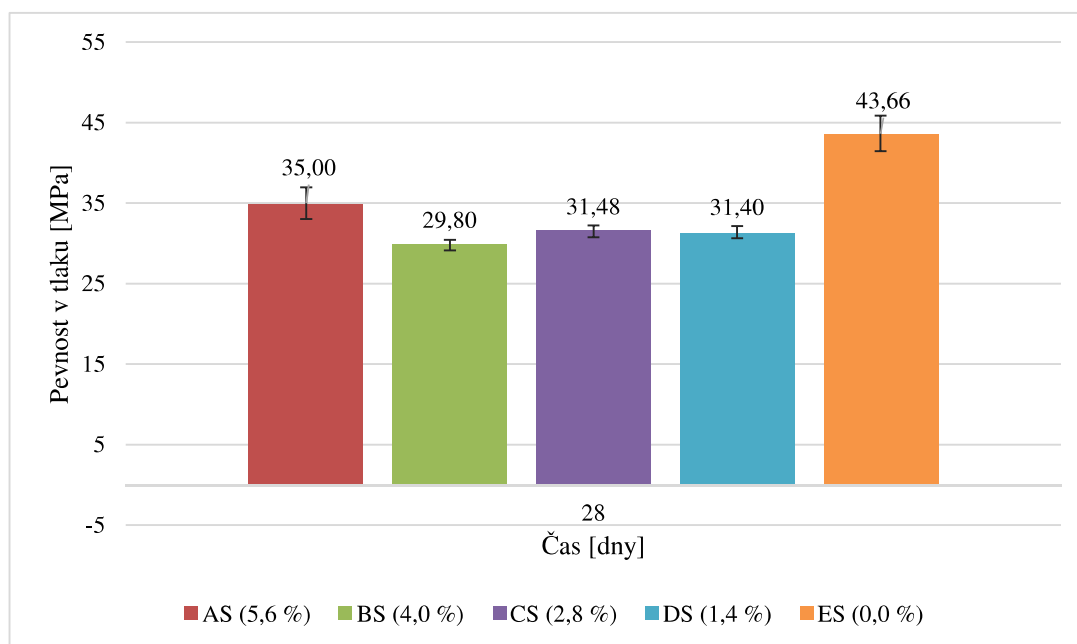
Obrázek 35: Zkouška jednoosým tlakem – destrukce vzorku

4.4.2 Vyhodnocení

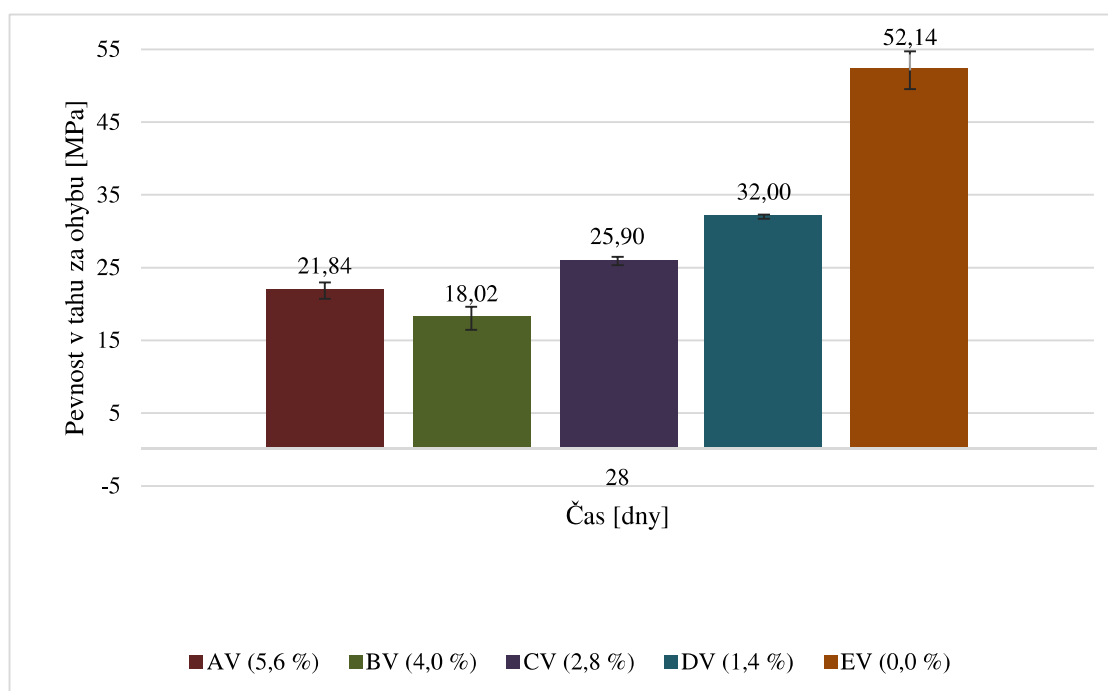
Po stanovení pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků a jejich zprůměrováním jsem jejich průměrné hodnoty shrnul v následujících grafech, které jsou rozdělené podle prostředí, kde se vzorky po dobu 28 dnů nacházely. V grafu č. 14 je patrná převyšující pevnosti v tlaku referenčního vzorku, která je 43,66 MPa. Na rozdíl od pevnosti v tahu za ohybu není jasný trend zvyšující se pevnosti v tlaku s klesajícím množstvím PVA. Vzorky BS, CS, DS dosahují podobných hodnot kolem 30,5 MPa. Za povšimnutí stojí zjištění, že vzorek AS nedosahuje nejnižší pevnosti, kterou jsem očekával. Vzorek AS s největším obsahem PVA má hodnota 35 MPa, což je o 20 % nižší hodnota než referenční vzorek. Ale je to také druhá nejvyšší naměřená hodnota všech vzorků. V grafu č. 15 je patrný trend stoupající pevnosti referenčního v tlaku s klesajícím množstvím PVA, který není u pevnosti v tahu za ohybu. Největší pevnosti v tlaku má referenční vzorek EV, jehož hodnota je 52,14 MPa. Nejnižší hodnotu má vzorek BV pouhých 18,02 MPa, což je snížení o 65 %. Z důvodu největšího obsahu pórů, respektive nejmenší objemové hmotnosti, viz grafy č. 18, 19.

Z obou grafů je zřejmý nárůst tlakové pevnosti referenčního vzorku o 8,48 MPa, což je o téměř 20 %. A snížení této pevnosti vzorků AS, BS, CS ve vodě. DS i DV zachovává pevnost v suchém i v mokřém prostředí stejnou. Vzorky s velkým obsahem PVA, ponořené celou dobu ve vodě, vykazují o téměř 50 % snížení pevnosti v tlaku.

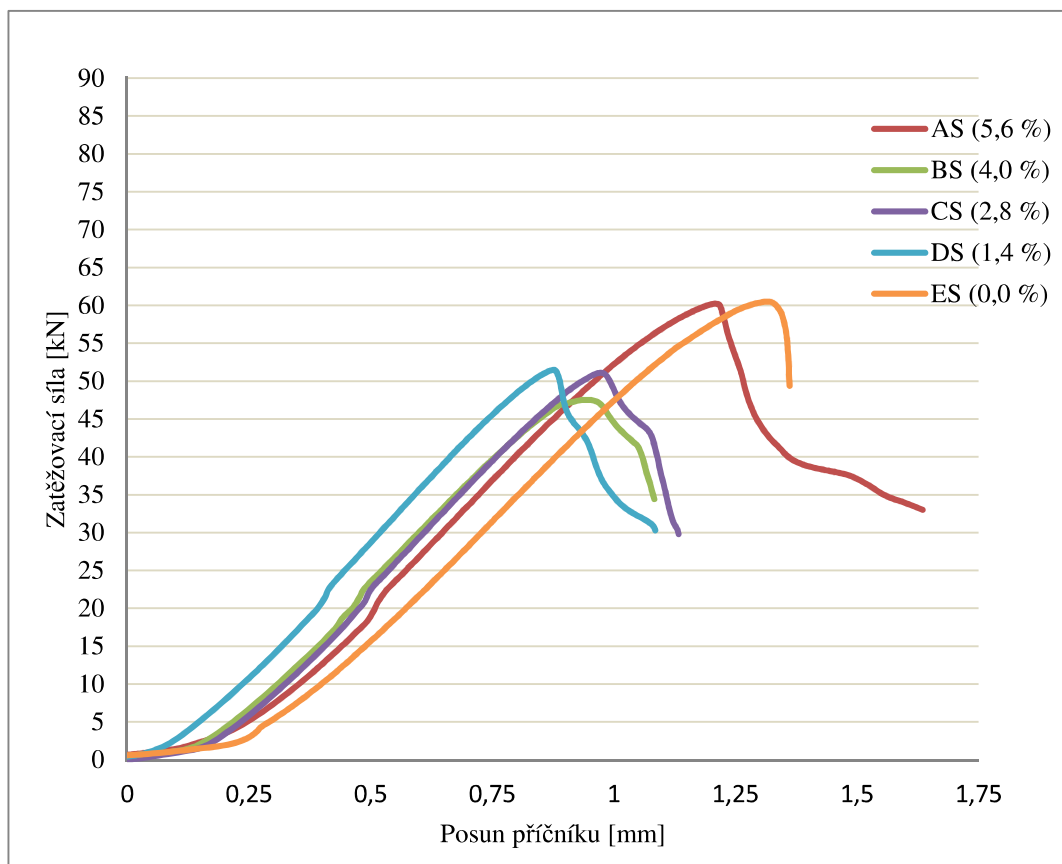
Ve studii [Topič, 2015] zjistili rozdílné výsledky pevnosti v tlaku v porovnání vzorků. V mé diplomové práci jsou pevnosti v tlaku vyšší. Je to z důvodu přidání recyklovaného betonu do cementové směsi. Největšího rozdílu dosahuje vzorek DS o 5,9 MPa, což je 19 % zvýšení pevnosti v tlaku oproti studii. Vzorky CS i DS mají sice jiná hodnoty, ale poměrově se liší o pár desetin GPa, což souhlasí se studií [Topič, 2015]. Vzhledem k tomu, Ing. Jaroslav Topič vyloučil vzorek s největším množstvím PVA, proto nemohu porovnat pevnosti v tlaku vzorku AS.



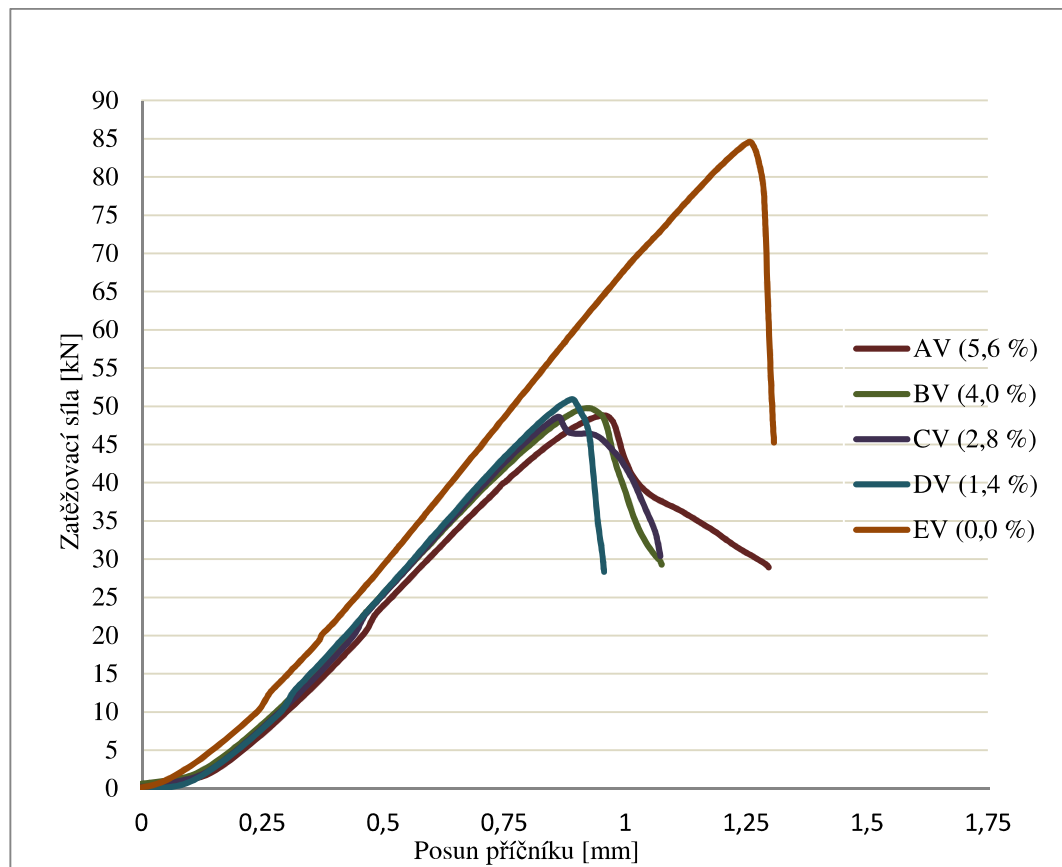
Graf 14: Pevnost v tlaku při stáří vzorků 28 dní v suchém prostředí



Graf 15: Pevnost v tlaku při stáří vzorků 28 dní v mokřém prostředí



Graf 16: Průběh zkoušky v tlaku vzorků v suchém prostředí



Graf 17: Průběh zkoušky v tlaku vzorků v mokřém prostředí

Na průběhu zkoušky v tlaku, viz grafy č. 16 a 17, jsou vidět největší dosahující hodnoty referenčních vzorků bez ohledu, zda jsou ponechány na suchu či ve vodě. V grafech č. 16 a 17 je dále patrná, že u vzorků modifikovaných PVA po dosažení maximálního zatížení nedochází k okamžité ztrátě pevnosti jako u referenčního vzorku. Jev je s přibývajícím množstvím PVA zřetelnější, proto je nejvíce vidět na vzorku AS. Důvodem je lepší vnitřní soudržnost.

Při ponoření vzorků do vody dochází k částečnému vyplavování PVA, tudíž nedochází k takové soudržnosti cementového kompozitu, jak znázorňuje graf č. 17. Proto jsou vzorky náchylnější k okamžité ztrátě pevnosti v tlaku.

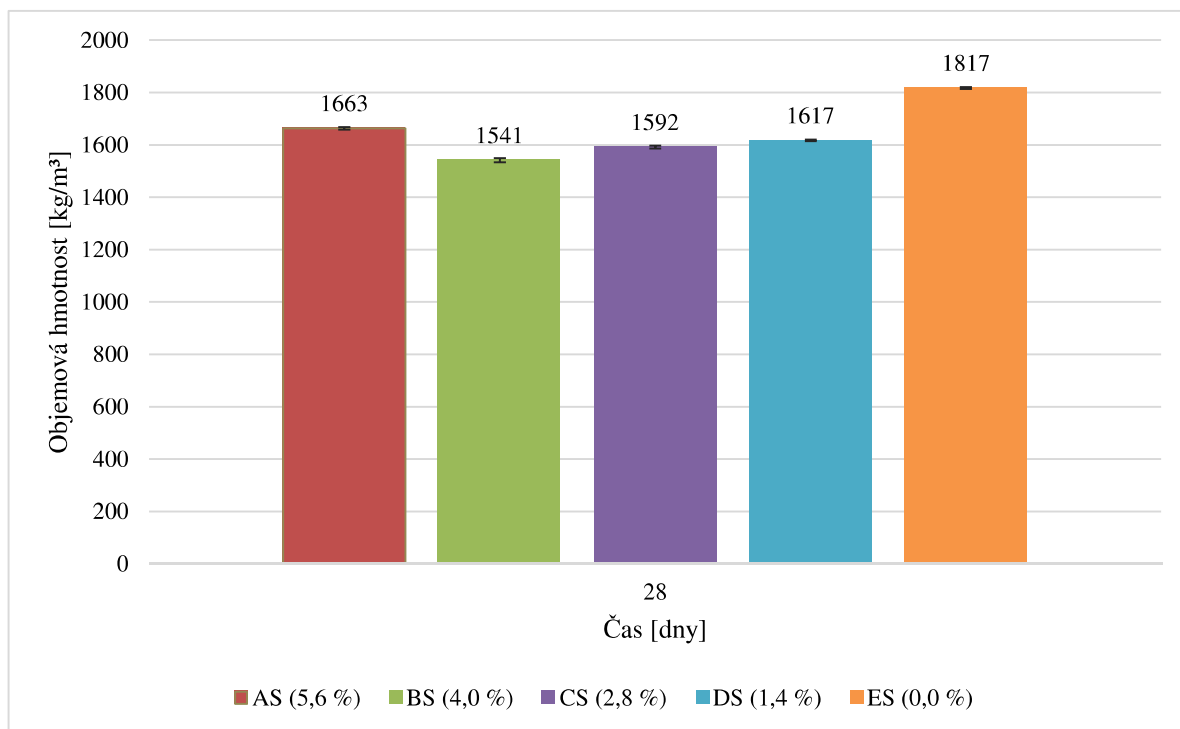
4.5 Diskuze

4.5.1 Zpracovatelnost

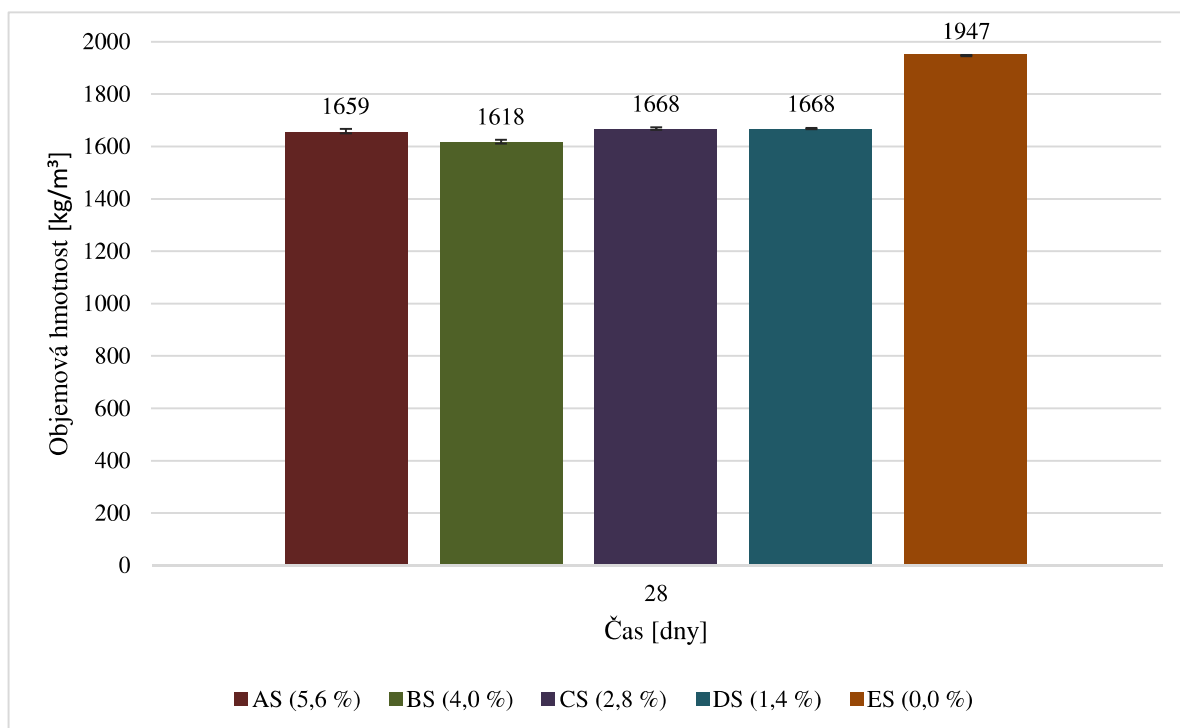
Při výrobě vzorků můžu konstatovat, že přibývajícím množstvím PVA má negativní vliv na zpracovatelnost. V důsledku vysoké viskozity PVA. Při větším jak 4% hmotnostním množstvím PVA se cementová směs obtížně zpracovává a hutní. Směs má velmi vysokou viskozitu. Zjištění se shoduje se všemi studii zabývající se zpracovatelností. Při 4 % hmotnostním množstvím PVA je třeba provést kvalitní hutnění, aby se zamezilo vzniku velkého množství pórů. Zmíněné tvrzení se liší od studie [Topič, 2015]. Závěr byl takový, že s tímto množstvím PVA vzorky vykazují uspokojivou zpracovatelnost a uspokojivé množství pórů. Při 2,8 % hmotnostním množstvím PVA je razantně mění vlastnosti cementového kompozitu, shodují se s tímto závěrem se studii [Kim; Santos, 1999], [Singh, 2001].

4.5.2 Pórovitost

Když vezmeme v úvahu, že snížení objemové hmotnosti je přímo úměrné se zvýšením pórovitosti. Z grafů č. 18, 19 je vidět větší objemová hmotnost referenčního vzorku než u ostatních. Proto se dá konstatovat, že PVA má za následek nárůst pórovitosti. Ke stejným závěrům došli i ve studiích [Morlat, 2007], [Ryšková, 2013], [Topič, 2015]. Ale z diplomové práce není patrné, jestli přibývajícím množstvím PVA má za následek větší pórovitost. Za to jsem zjistil, jak množství PVA ovlivnilo mechanické vlastnosti.

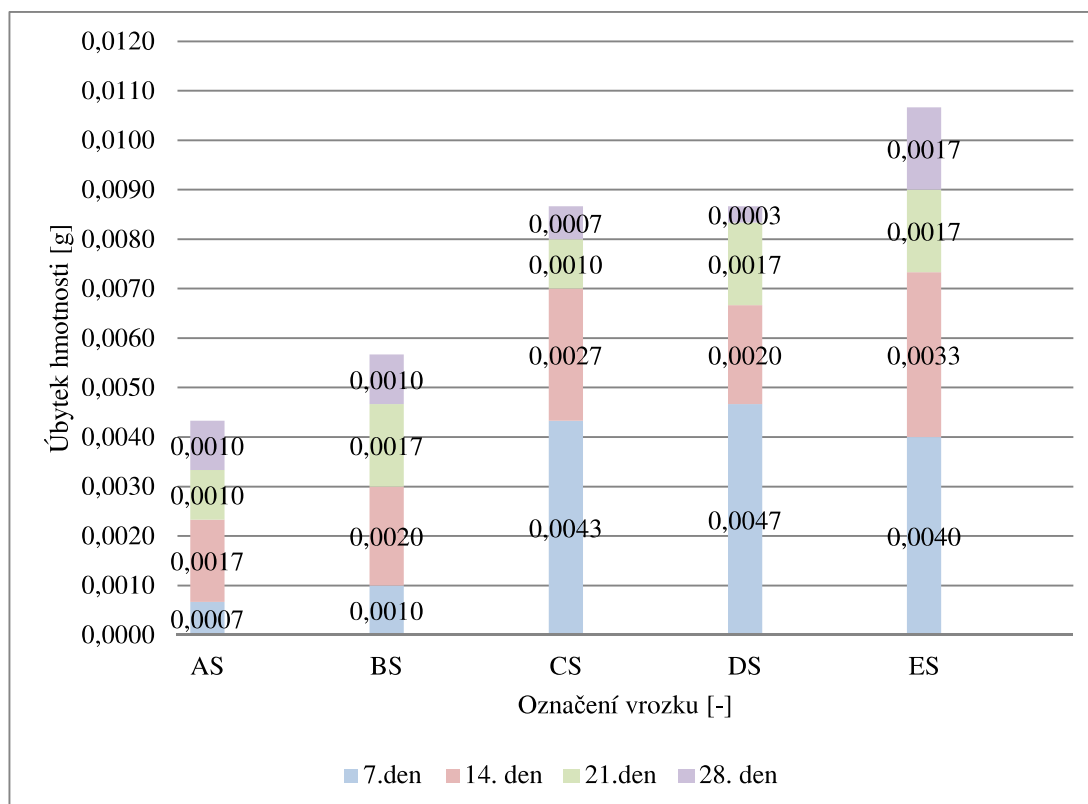


Graf 18: Objemová hmotnost vzorků v suchém prostředí

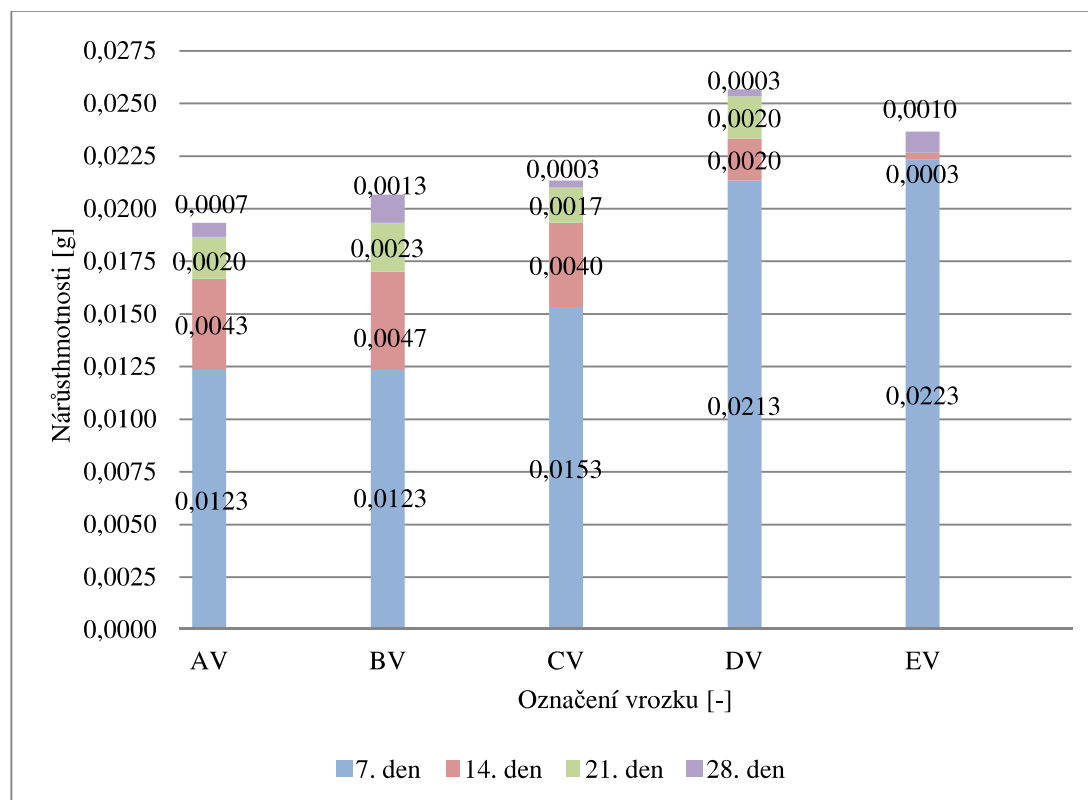


Graf 19: Objemová hmotnost vzorků v mokřém prostředí

4.5.3 Vysychání a nasákavost



Graf 20: Úbytek hmotnosti suchých vzorků



Graf 21: Nárůst hmotnosti mokrých vzorků

Další vlastnosti cementovém kompozitu modifikovaném PVA, kterou jsem nepřímo odvodil, viz grafy č. 18 a 19, jsou zamezení vysychání a snížení nasákavosti. PVA ve vzorkách skladovaných v suchém prostředí zabraňuje vysychání, v důsledku povrchové aktivity přítomného polymeru ve vodě, který zvyšuje viskozitu vodní fáze. Zjištění opět vedlo ke shodě se studii [Ohama, 1995]. Když to vzorky skladované v mokřém prostředí jsou méně nasákavé. Jev je zřetelnější u vzorků s větším hmotnostním množstvím PVA než 1,4 %. Se zmíněnou hypotézou se shoduje studie [Kim, 1998]. Důvodem jevu může být to, že cementové částice jsou více rovnoměrně rozloženy v cementové směsi. Redukce v mezipovrchové přechodové zóně (dále jen ITZ) zpomaluje absorpci vody, což naznačuje nízkou propustnost, a tím zlepšuje trvanlivost vzorku. Nebo to lze vysvětlit tvorbou fólie, která vytváří bariéru kolem nezhydratovaného cementu zrna. ITZ je oblast s největší pórovitostí a obsahuje velké množství hydroxidu vápenatého.

Snížení absorpce vody je jeden ze základních předpokladů pro zlepšení mrazuvzdornosti cementového kompozitu. Ale je to pouze hypotéza na základě předešlých zjištění, není obsahem mé diplomové práce.

4.5.4 Pevnost v tahu za ohybu a tlaku

Přírůstky polyvinylalkoholu mají za následek zvýšení pórovitosti, což způsobuje snížení objemové hmotnosti, respektive v této diplomové práci jsem zjistil snížení objemové hmotnosti, což přisuzuji zvýšení pórovitosti. Přidám-li k tomu snížení tuhosti polymeru, pak jsou zde dva činitele, kteří způsobují snížení pevnosti v tlaku. Snížení pevnosti popisují i ve studiích [Ryšková, 2013], [Topič, 2015], [Morlat, 2007].

Zároveň se zvyšuje pevnost v tahu za ohybu. Lepší vnitřní soudržnost způsobuje nižší tvorbu trhlin. Zvýšení pevnosti v tahu za ohybu jsou zaznamenány ve všech studiích, které se o popisovanou problematiku zajímali. Pevnost v tahu v suchém stavu cementového kompozitu byla přičítána vytvořené PVA fólii [Knapen, 2009].

ZÁVĚR

Diplomovou práci jsem zaměřil na studium složek cementu, betonu a polymeru, jak množství PVA ovlivní zpracovatelnost. Hlavním cílem bylo zkoumání mechanických vlastností v průběhu 28 dnů cementového kompozitu s recyklovaným betonem modifikovaným polyvinylalkoholem nedestructivními a destructivními metodami.

Výchozí surovinou se stal portlandský cement 42,5 R, vyrobený v cementárně Radotín s recyklovaným betonem s velikostí zrn $<0,25$ mm, namletí firmou Lavaris z odvodňovacích betonových žlabů a polyvinylalkohol, který je vyrobené alkalickou hydrolyzou polyvinylacetátu v methanolu (obchodní značka SLOVIOL® R), ve formě 16 % roztoku. Vyrobil jsem dvakrát 5 sad s různým množstvím PVA, v každé sadě 6 vzorků. Na vzorcích o rozměrech 40×40×160 jsem testoval mechanické vlastnosti.

Na základě všech vyhodnocení mohu konstatovat:

- Přírůstky mají negativní vliv na zpracovatelnost.
- S max. 3 hm. % PVA vzorky vykazují optimální mechanické vlastnosti při uspokojivé zpracovatelnosti a obsahu pórů.
- Polyvinylalkohol má za následek snížení objemové hmotnosti, respektive zvýšení pórovitosti, což způsobuje nárůst pevnosti v tahu za ohybu, ale pokles pevnosti v tlaku.
- Snížení absorpce vody.

Má vyhodnocení naznačují velký přínos modifikovaného cementovaného kompozitu u tažených a ohýbaných konstrukcí, ale naopak pro tlačené konstrukce nemá PVA význam. Pro svou nenasákavou vlastnost může mít cementový kompozit výhodu ve své trvanlivosti. V neposlední řadě prvky (konstrukce) modifikované PVA jsou také citlivé na přítomnost vody, kdy ztrácejí mechanické vlastnosti. Proto je unáhlené mluvit o PVA jako o zázračném materiálu. A jeho použití je závislé na statickém namáhání konstrukce.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schématické znázornění makromolekul a) lineárního, b) rozvětveného, c) plošně zesíťovaného,	17
Obrázek 2: Chemická reakce, při níž se alkohol změní na aldehyd	19
Obrázek 3: Struktura polyvinylalkoholu	19
Obrázek 4: PVA ve formě krystalů (zdroj: made-in-china.com)	20
Obrázek 5: Objemová hmotnost (zdroj: Topič, 2015).....	24
Obrázek 6: Dynamický modul pružnosti (zdroj: Topič, 2015)	24
Obrázek 7: Dynamický modul ve smyku (zdroj: Topič, 2015).....	25
Obrázek 8: Pevnost v ohybu (zdroj: Topič, 2015).....	25
Obrázek 9: Pevnost v tlaku (zdroj: Topič, 2015).....	26
Obrázek 10: PVA	Obrázek 11: Složení forem
Obrázek 12: Setřásací přístroj s komolým kuželem a dusadlem	32
Obrázek 13: Vzorek A	Obrázek 14: Vzorek B.....
Obrázek 15: Vzorek C	Obrázek 16: Vzorek D.....
Obrázek 17: Vzorek E	Obrázek 18: Zrání vzorků ve formách.....
Obrázek 19: Odformování	Obrázek 20: Struktura vzorků
Obrázek 21: Napojení piezoelektrického snímače zrychlení na vzorek (zdroj: Ing Zuzana Jandová)	37
Obrázek 22: Měřicí sestava Brüel a Kjær (A – měřicí stanice, B – rázové kladivo, C – piezoelektrický snímač zrychlení) (zdroj: Ing. Zuzana Jandová)	38
Obrázek 23: Schéma měření podélného kmitání	39
Obrázek 24: Schéma měření příčného a krouživého kmitání	39
Obrázek 25: Schéma měření impulsovou ultrazvukovou metodou	41
Obrázek 26: Měření impulsovou ultrazvukovou metodou	42
Obrázek 27: Přístroj FP 100	48
Obrázek 28: Schéma zkoušky tříbodovým ohybem	48
Obrázek 29: Zkouška tříbodovým ohybem	49
Obrázek 30: Zkouška tříbodovým ohybem	50
Obrázek 31: Vzorky AS, AV, BS, BV, CS, CV po zkoušce: pevnost v tahu za ohybu.....	52
Obrázek 32: Vzorky DS, DV, ES, EV po zkoušce: pevnost v tahu za ohybu.....	53
Obrázek 33: Schéma zkoušky jednoosým tlakem	55
Obrázek 34: Zkouška jednoosým tlakem	56
Obrázek 35: Zkouška jednoosým tlakem – destrukce vzorku	56

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Zkouška rozlitím	33
Graf 2: Poměrové vyhodnocení smrštění s referenčním vzorkem ES.....	36
Graf 3: Dynamický modul pružnosti vypočtený z podélného kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou	44

Graf 4: Dynamický modul pružnosti vypočtený z podélného kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou	44
Graf 5: Dynamický modul pružnosti vypočtený z příčného kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou (kontrola)	45
Graf 6: Dynamický modul pružnosti vypočtený z příčného kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou (kontrola)	45
Graf 7: Dynamický modul pružnosti ve smyku vypočtený z torzního kmitání vzorků v suchém prostředí rezonanční metodou	46
Graf 8: Dynamický modul pružnosti ve smyku vypočtený z torzního kmitání vzorků v mokřém prostředí rezonanční metodou	46
Graf 9: Porovnání dynamických modulů pružnosti měřených rezonanční metodou a impulsovou ultrazvukovou metodou po 28 dnech	47
Graf 10: Pevnost v tahu za ohybu při stáří vzorků 28 dní v suchém prostředí.....	51
Graf 11: Pevnost v tahu za ohybu při stáří vzorků 28 dní v mokřém prostředí.....	51
Graf 12: Průběh zkoušky v tahu za ohybu vzorků v suchém prostředí	54
Graf 13: Průběh zkoušky v tahu za ohybu vzorků v mokřém prostředí.....	54
Graf 14: Pevnost v tlaku při stáří vzorků 28 dní v suchém prostředí	58
Graf 15: Pevnost v tlaku při stáří vzorků 28 dní v mokřém prostředí.....	58
Graf 16: Průběh zkoušky v tlaku vzorků v suchém prostředí.....	59
Graf 17: Průběh zkoušky v tlaku vzorků v mokřém prostředí	59
Graf 18: Objemová hmotnost vzorků v suchém prostředí.....	61
Graf 19: Objemová hmotnost vzorků v mokřém prostředí.....	61
Graf 20: Úbytek hmotnosti suchých vzorků.....	62
Graf 21: Nárůst hmotnosti mokřých vzorků.....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hlavní minerály portlandského cementu.....	12
Tabulka 2: Druhy klasických sedimentů podle velikosti zrn (zdroj: Svoboda, 2007)	14
Tabulka 3: Zpracované studie.....	26
Tabulka 4: Zpracované studie.....	27
Tabulka 5: Množství PVA ve vzorcích	30

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Příkopová tvárnice (zdroj: Grombří, 2014)	65
Příloha 2: Specifikace cementové malty	68
Příloha 3: Rozměry forem	69
Příloha 4: Smrštění	70
Příloha 5: Měření základních vlastních frekvencí 1. den (zdroj: Plachý, 2010)	71
Příloha 6: Dynamický modul 1. den (zdroj: Plachý, 2010).....	72
Příloha 7: Měření základních vlastních frekvencí 7. den (zdroj: Plachý, 2010)	73

Příloha 8: Dynamický modul 7. den (zdroj: Plachý, 2010).....	74
Příloha 9: Měření základních vlastních frekvencí 14. den (zdroj: Plachý, 2010)	75
Příloha 10: Dynamický modul 14. den (zdroj: Plachý, 2010).....	76
Příloha 11: Měření základních vlastních frekvencí 21. den (zdroj: Plachý, 2010)	77
Příloha 12: Dynamický modul 21. den (zdroj: Plachý, 2010).....	78
Příloha 13: Měření základních vlastních frekvencí 28. den (zdroj: Plachý, 2010)	79
Příloha 14: Dynamický modul 28. den (zdroj: Plachý, 2010).....	80

Použitá literatura

- Adámek, J. et al.: Stavební materiály. Brno: skripta FAST VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, 1997. 205 s. [cit. 2017-01-08].
- Allahverdi, A., Kianpur, K., Moghbeli, M. R., Effect of polyvinyl alcohol on flexural strength and some important physical properties of Portland cement paste, Iran. J. Mater. Sci. ENG. 7 (1), 2010, p. 1-6.
- Bezerra, E. M., Joaquim, A. P, Savastano, H. Júnior, Some properties of fibercement composites with selected fibers, Conferencie Bras, Mater. E Tecnol. Não-Convencionais Habitação e Infra-Estrutura Interess. Soc. NOCMAT., Pirassununga, SP, Brasil, 2004.
- ČSN P ENV 197-1 – Cementy – Složení, jakostní požadavky a kritéria pro stanovení shody.
- ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.
- ČSN EN 1330-4 – Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 4: Termíny používané při zkoušení ultrazvukem.
- ČSN EN 583-1 – Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 1: Všeobecné zásady.
- ČSN EN 583-2 – Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 2: Nastavení citlivosti a časové základny.
- ČSN EN 583-3 – Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Část 3: Průchodová technika.
- ČSN 73 1371 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu.
- ČSN 73 1372 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda.
- Ducháček, V., 2006 dotisk. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2. V Praze. Nakladatelství VŠCHT, 280 s. ISBN 80-7080-617-6. [cit. 2017-01-08].
- Hela, R. Technologie betonu, Brono 2005, 110 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupný z WWW: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ04-Technologie%20betonu%20I/technologie%20betonu%20I.pdf>.
- Hlaváček J., Diplomová práce – Příměsi ovlivňující tuhnutí portlandského cementu, Brno 2012, 69 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupný z https: [// https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53970](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53970).
- Hlubocký, L., Bakalářská práce – Návrh prvků stavebního systému na bázi odpadních materiálů při zpracování kamene, praktická část, Praha, 2016, 65 s. [cit. 2017-01-08].

Dostupný z <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65857/F1-BP-2016-Hlubocky-Lukas-priloha-2-cast.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.

- Horikoshi T., Ogawa A., Saito T., Hoshiro H., Properties of polyvinyl alcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites, *Int. RILEM Work. High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos. Struct. Appl.*, Rilem SARL, 2006. p. 145-153.
- Hu, W., Yang, X. G., Zhou, J. W., Xing, H. G., Xiang, J., Experimental research on the mechanical properties of pva fiber reinforced concrete, *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 5 (18), 2013, p. 4563-4567.
- Chai, W. W. S., Teo, D. C. L., Ng, C. K., Improving the properties of oil palm shell (OPS) concrete using polyvinyl alcohol (PVA) coated aggregates, *Adv. Mater. Res.* 970, 2014, p. 147-152, Dostupný z WWW:<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.970.147>.
- Kim, J. H., Robertson, R. E., Naaman, A. E., Structure and properties of poly(vinyl alcohol) – modified mortar and concrete, *Cem. Concr. RES.* 29 (3), 1999, p. 407-415, Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00246-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00246-4).
- Kim, J. H., Robertson, R. E., Effects of polyvinyl alcohol on aggregate-paste bond strength and the interfacial transition zone, *Adv. Cem. Based Mater*, 8 (2), 1998, p. 66-76, Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10/1016/S1065-7355\(98\)00009-1](http://dx.doi.org/10/1016/S1065-7355(98)00009-1).
- Kim, J. H., Robertson, R. E., Prevention of air void formation in polymer- modified cement mortar by pre-wetting, *Cem. Concr. Res.* 27 (2), 1997, p. 171-176, Dostupný z WWW:[http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00001-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00001-X).
- Knapen, E. and Gement, D. V. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water – soluble polymers. *Cement and Concrete Research*, vol. 39, 2009, p. 6-13. DOI:10.1016/j.cemconres.200810.003.
- Kou, S. C., Poon, C. S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 32 (8), 2010, p. 649-654, Dostupný z WWW: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>.
- Mach, V., Tuhé pěny založené na acetalizovaném PVAL, 2008, 52 s., Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- Mannan, M. A., Alexander, J., Ganapathy, C., Teo, D. C. L., Quality improvement of oil palm shell (OPS) as coarse aggregate in lightweight concrete, *Build. Environ.* 41 (9)9, 2006, p. 1239-1242, Dostupný z WWW:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.018>.
- Marten, F. L., Vinyl alcohol polymers, *Encycl. Polym, Sci. Technol.*, 2002, p. 399-437. [//www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62790](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62790)

- Mojumdar, S. C., Raki, L., Preparation and properties of calcium silicate hydrate-poly(vinyl alcohol) nanocomposite materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 82, p. 89-95, 2005.
DOI:10.1007/s10973-005-6837-y.
- Morlat, R. Orange, G. Bomal, Y., Godard, P. Reinforcement of hydrated portland cement with high molecular mass water-soluble polymers. *Journal of materials science*, vol. 42, 2007, p. 4858-4869.
DOI:10.1007/s10853-006-0645-z.
- Nedbal, F. A kol., *Za betonem do Evropy*, Svaz výrobců betonu, ČBS SERVIS, Praha 2008, ISBN 987-80-87158-12-8.
- Nováková, I., Bakalářská práce – Možnosti využití recyklovaného betonu jako náhrady drobného kameniva v cementových potěrech, Brno 2012, 65 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupný z WWW: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58190.
- Ohama, Y., *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars Properties and Process Technology*, Noyes Publications, New Jersey, 1995
- Ohama, Y, Polymer-based admixtures, *Cem. Concr. Compos.* 20 (2-3), 1998, p. 189-212, Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00065-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00065-6).
- Pavlíková, M., Ph.D. *Chemie anorganických stavebních pojiv II kamenivo*. Praha: ČVUT, 2015. In: *Výuka ČVUT [výuka]*. Přednáška dostupná po zapsání předmětu.
- Pique, T. M. and Vazquez, A. Control of hydration rate of polymer modified cements by the addition of organically modified montmorillonites. *Cement and concrete composites*, vol. 37, p. 54-60, 2013.
DOI: 10.1016/j.cemcencomp.2012.12.006.
- Ryšková, M., Diplomová práce – Polymer-cementové kompozity se zvýšenou žáruvzdorností, Brno 2013, 65 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupný z https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62790
- Santos, R. S., Rodrigues, F. A., Segre, N., Joekes, I., Macro-defect free cements influence of poly(vinyl alcohol), cement type, and silica fume, *Cem. Concr. Res.* 29 (5), 1999, p. 747-751, Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00070-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00070-8).
- Saxena, S. K., Polyvinyl alcohol (PVA), *Chem Tech Assess* 2004; 61 st. Jt. *Expert comm food addit.*, 2004.

- Shaikh F. U. A., Hirozo M. Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites. *Materials and Structures*, vol. 44, p. 1179-1191, 2011.
DOI:10.1617/s11527-010-9691-8.
- Shaker, F. A., El-Dieb, A. S., Reda, M. M., Durability of styrene-butadiene latex modified concrete, *Cem. Concr. Res.* 27 (5), 1997, p. 711-720. Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00055-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00055-0).
- Shilang X., Shuling G. Fracture and Tensile Properties of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 23, No. 1, p. 7-11, 2008.
DOI:10.1007/s11595-006-1007-z.
- Singh, N. K., Mishra, P. C., Singh, V. K., Narang, K., Effects of hydroxyethyl cellulose and oxalic acid on the properties of cement, *Cem. Concr. Res.* 33 (9), 2003, p. 1319-1329, Dostupný z WWW: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008/8846\(03\)0060-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008/8846(03)0060-7).
- Singh, N. B., Rai, S. Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and concrete research*, vol. 31, 2001, p. 239-243.
DOI:10.1016/S0008-8846(00)00475-0.
- Souček, P. Moduly pružnosti moderního betonu – předpisy, vliv složení, postupy v praxi. In 9. konference Technologie Betonu. Sborník příspěvků, ČBS Sevis, Praha 2010, s. 5-11. ISBN 9787-80-87158-23-4.
- Svoboda, L. a kol.. *Stavební hmoty*. Vyd. 2. V Bratislavě 2007. Nakladatelství JAGA GROUP, s. r. o. 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1. [cit. 2017-01-08].
- Thong, C. C., Teo, D. C. L., Ng, C. K. Application of polyvinyl alcohol in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Faculty of Engineering, Universiti Malaysia Sarawak*, 2015, p. 173-177.
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188. [cit. 2017-01-08].
- Topič, J., Prošek, Z., Indrová, K., Plachý, T., Nežerka, V., Kopecký, L., Tesárek, P., Effect of PVA modification on the properties of cement composites, *Acta Polytechnica* 55 (1), 2015, p. 64-75, DOI:10.14311/APOD.2015.55.0064, Dostupný z WWW: <http://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap>
- Vašková, J., *Betonové konstrukce 2 [přednáška]*. Praha: ČVUT, 2014. In: *Výuka ČVUT [výuka]*. Přednáška dostupná po zapsání předmětu.

- Veselý, J., Diplomová práce – Zkoušky modulu pružnosti betonu, Beroun 2012, 128 s. Dostupný z <http://www.betotech.cz/stahnout-soubor?id=201>
- Viswanath, P. Thachil, E. T. Properties of polyvinyl alcohol cement pastes. *Materials and Structures*, vol. 41, 2008, p. 123-130. Doi:10.1617/s11527-007-9224-2.
- Wang, S. X., Li, V. C., Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: materials design and performances, *Int'l RILEM Work, HPFRCC Struct. Appl.*, RILEM SARL, 2006, p. 65-73.
- Yongjia, H. E. et al. Effect of water soluble PVA on the microstructure characteristics of C-S-H formed in $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution systém. *Journal of Wuhan University of technology – Mater. Sci. Ed.*, vol. 26, No. 3, 2011, p. 552-555. DOI:10.1007/s11595-011-0266-5.