



**Návrh kompozitní směsi zdicího bloku s využitím recyklovaného betonu
a přísad**

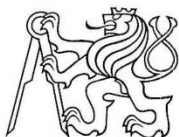
**Design of a Composite Mixture of Masonry Block Using Recycled Concrete
and Additives**

Diplomová práce

Studijní program: Magisterský navazující Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.
Konzultant: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Bc. Jaromír Hruža



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hrůza Jméno: Jaromír Osobní číslo: 410751
Zadávací katedra: Katedra mechaniky - K132
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh kompozitní směsi zdicích bloků s využitím recyklovaného betonu a přísad
Název diplomové práce anglicky: Design of a composite mixture of masonry blocks using recycled concrete and additives

Pokyny pro vypracování:
Zpracování rešerše na danou problematiku.
Návrh směsi s obsahem betonového recyklátu.
Zjištění vhodných variant a kombinací použitých plastifikátorů a urychlovačů tuhnutí v cementové směsi.
Určení mechanických a fyzikálních vlastností vyrobených vzorků.
Závěr, shrnutí dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:
Odborné články z internetové databáze (např. WoS, Science Direct, Scopus).

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.9.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Redacted Signature] Podpis vedoucího práce [Redacted Signature] 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“.

27.9.2017 Datum převzetí zadání [Redacted Signature] Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jaromír Hrůza

Název diplomové práce: Návrh kompozitní směsi zdicích bloků s využitím recyklovaného betonu a přísad

Základní část: Mechanika podíl: 80 %

Formulace úkolů: Zpracování rešerše na danou problematiku.

Návrh směsí s obsahem betonového recyklátu.

Zjištění vhodných variant a kombinací použitých plastifikátorů a urychlovačů tuhnutí v cementové směsi.

Určení mechanických a fyzikálních vlastností vyrobených vzorků.

Závěr, shrnutí dosažených výsledků.

Podpis vedoucího DP:

Datum: 3.1.2018

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

2. Část: Betonové a zděné konstrukce podíl: 20 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Josef Fládr Ph.D., K133

Formulace úkolů: Nedestruktivní testování - ultrazvuk

Destruktivní testování vyrobených vzorků

Vyhodnocení a grafické zpracování výsledků zkoušek

Podpis konzultanta:

Datum: 3.1.2018

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 zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 3. ledna 2018

Bc. Jaromír Hruza

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za věnovaný čas, podporu, trpělivost a připomínky při tvorbě mé práce. Zvláštní poděkování patří také Ing. Zdeňku Proškovi za zprostředkování užitečných materiálů a rad. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Vrzalovi ze společnosti Stachema s.r.o. a Tomáši Klausovi ze společnosti Chryso chemie, s.r.o za poskytnuté přísady do betonu. Poděkování patří i Ing. Pavlu Reitermanovi a Ing. Pavlu Padevětovi za provedení destruktivních zkoušek. Práce vznikla v rámci řešení projektů Centra pro nanotechnologie ve stavebnictví FSv ČVUT v Praze.

Abstrakt

Diplomová práce se v úvodu věnuje rešerši zabývající se současným stavem problematiky v oblasti kompozitních materiálů s využitím recyklovaných betonů, chemických přísad do betonu včetně jejich použití, uplatnění a aplikace. Rešerše přibližuje také problematiku samotného cementu, jeho výrobu a chemické procesy při styku tohoto pojiva s vodou.

Hlavní částí práce je experimentální stanovení fyzikálních a mechanických vlastností mnou vyrobeného kompozitního materiálu s jemně mletým recyklovaným betonem a chemickými přísadami. Je zde zahrnuta samotná výroba, metodika testování a následně testování samotné se závěrečnou prezentací výsledků. Hlavní část je rozdělena do třech fází, jejichž návaznost a posloupnost vede k výrobě kompozitních směsí s recyklovaným betonem a přísadami. Jedním z cílů práce je i zjištění samotného fungování přísad ve styku s mletým recyklátem, jelikož se jedná o doposud prakticky neprozkoumanou oblast. Výsledkem experimentu je na základě testování zvolena nejvhodnější směs na výrobu betonové tvárnice. V závěrečné části jsou zjištěné poznatky z testování shrnuty a v diskusi jsou vlastnosti kompozitních směsí objektivně zhodnoceny.

Klíčová slova:

Recyklovaný beton, superplastifikátor, urychlovač tuhnutí, mechanické vlastnosti, betonové zdivo, plnivo, náhrada pojiva.

Abstract

The diploma thesis deals in the introduction with the current state of the problematics in the field of composite materials using recycled concrete, chemical additives in concrete including their use and applications. The research also focuses on the issue of cement itself, its production and chemical processes in contacting this binder with water.

The main part of the thesis is the experimental determination of the physical and mechanical properties of composite material made with fine ground recycled concrete and chemical additives. This part includes production itself, testing methodology, and then testing itself with a final presentation of the results. The main part is divided into three phases, which continuity and succession leads to the production of composite mixtures with recycled concrete and additives. One of the aims of the thesis is also to find out the function of the additives in contact with fine ground recycled material, since it is a practically unexplored area so far. The result of the experiment is choose the most suitable mixture for the production of concrete blocks. In the final part, the findings from the tests are summarized and in the discussion the properties of composite mixtures are objectively evaluated.

Keywords:

Recycled concrete, superplasticizer, solidification accelerator, mechanical properties, concrete masonry, filler, binder replacement.

Obsah:

1	Úvod.....	9
2	Současný stav problematiky.....	11
2.1	Cement.....	11
2.1.1	Historie	11
2.1.2	Výroba portlandského cementu	12
2.1.3	Složení slínku portlandského cementu	15
2.1.4	Hydratace cementu	16
2.1.5	Klasifikace portlandského cementu.....	19
2.1.6	Makrostruktura a mikrostruktura ztvrdlého cementu	21
2.2	Chemické přísady v kompozitních materiálech.....	24
2.2.1	Provzdušňovače	25
2.2.2	Zpomalovače tuhnutí	26
2.2.3	Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu	26
2.2.4	Vodoredukující přísady – plastifikátory	27
2.2.5	Změkčovadla (superplastifikátory).....	30
2.3	Cementové směsi s využitím jemně mletého recyklovaného betonu	34
2.4	Cementové kompozity s využitím recyklovaného betonu a přísad do betonu	39
3	Cíle diplomové práce.....	43
4	Praktická část	44
4.1	Použité materiály, výroba vzorků a stanovení rozlivů.....	47
4.2	Způsoby stanovení mechanických vlastností vzorků.....	55
4.3	Výsledky a diskuse	60
4.3.1	1. Fáze - orientační zjištění funkčnosti přísad	60
4.3.2	2. Fáze - průzkumné ověření dob tuhnutí přísad	63
4.3.3	3. Fáze - hlavní část výroby vzorků s vybranými přísadami	65
5	Závěr.....	79
6	Seznam použité literatury.....	81
7	Seznam obrázků	84
8	Seznam tabulek.....	86

1 Úvod

Jedním z důvodů uplatnění recyklovaného betonu v cementové směsi pro budoucí výrobu zdícího bloku byla snaha najít využití tohoto odpadního materiálu, který je skladován na skládkách, tím se pokusit tyto skládky co nejvíce eliminovat a zároveň tak šetřit životní prostředí. Zároveň samotná představa o opětovném využití betonového odpadu pro smysluplné uplatnění v nových materiálech a konstrukcích je také velmi zajímavá a motivující.

Betonový odpad v podobě recyklátu, který pochází z demolic staveb má rizikové vlastnosti, jimiž jsou rozdílné atributy a nehomogenita tohoto odpadu, které jsou zapříčiněny přítomností ostatních materiálů z demolic konstrukcí/staveb. „Čistota“ recyklovaného betonu je tak závislá na míře a pečlivosti třídění betonového recyklátu. Ovšem třídění odpadu se bohužel negativně projevuje v ceně této suroviny. V práci byl použit jemně mletý recyklovaný beton ze silničních žlabů, které nebyly nikterak vyztuženy a svým způsobem by se mělo jednat o relativně „čistý“ betonový recyklát o stejnorodých vlastnostech bez přítomnosti dalších nežádoucích materiálů jako např. sklo, dřevo, vápno, ocel, atd.

Diplomová práce navazuje na mou práci bakalářskou, kde jsem výpočtem určoval největší zatížení betonového bloku v obvodovém nosném zdivu (v patě zdiva) jednopodlažního, mnou navrženého „vzorového“ objektu a na jeho základě jsem vybral navrženou směs s největším hm. % nahrazením cementu jemně mletým recyklovaným betonem splňujícím parametry důležité pro únosnost zdiva. Vzorový objekt jsem navrhl jako jednoduchý jednopodlažní objekt určený k bydlení osob z důvodu lepší představivosti a podložení „realistických“ rozměrů pro zjednodušený statický výpočet a výběr některé z navržených a testovaných cementových malt jako matrice pro další budoucí experimenty zaměřené na výrobu betonových zdících prvků. Inspiraci návrhu exteriéru jsem pro jejich jednoduchost a skromnost hledal v domech Středního východu. Oblast Středního východu byla vybrána také proto, že v této oblasti by bylo možno odpadní materiály dobře využít i s ohledem na méně rozvinutou infrastrukturu. Jedná se o nízkonákladový přízemní objekt obdélníkového půdorysu s plochou střechou o jednoduché dispozici. V domě se nachází vstupní chodba, kuchyňský kout, obývací pokoj, koupelna s WC a ložnice. Při návrhu bylo počítáno s obýváním maximálně 4 dospělých osob. Jedná se pouze o studii, jelikož tento rozsah projektu sloužící k dalšímu postupu v hledání minimální pevnosti zdícího prvku, byl plně postačující. Na navržený „vzorový“ objekt byl sestaven zjednodušený statický výpočet, jehož konečným výsledkem byla minimální požadovaná pevnost v tlaku zdícího prvku (tvarovky) pro obvodové zdivo objektu. Výpočet byl tedy aplikován na modelový objekt a založen na zjištění minimální únosnosti zdiva

a následně zdicího prvku. Pro výpočet minimální požadované hodnoty pevnosti zdicího prvku v tlaku jsem použil program MS Excel. Obsahem souboru zjednodušeného statického výpočtu byly celkem 4 listy (základní parametry, zatížení, požadovaná pevnost prvku, parametry zdicího prvku) s výpočtovými daty, které jsou vzájemně interaktivně propojeny a jako celek tvoří variabilní „nástroj“ pro určení pevnosti v tlaku zdicího prvku. Hlavním cílem bakalářské práce bylo nalezení varianty směsi s nahrazením určitého množství jemně mletého recyklovaného betonu v matrici pro směs zdicích prvků s potřebnými mechanickými vlastnostmi (pevnost v tlaku, modul pružnosti atd.). Výsledná směs posloužila jako základní vodítka a podklad pro další stupeň experimentu (diplomovou práci), kde je směs modifikována pomocí přidaných chemických přísad do betonu.

Práce je zaměřena na návrh ideální kompozitní směsi, která bude obsahovat co největší procentuální nahrazení cementu jemně mletým recyklovaným betonem za přispění přidaných přísad do betonu pro rychlý nárůst počátečních pevností a superplastifikátorů. Výsledná směs by měla vycházet ze základní směsi z bakalářské práce, být modifikována a sloužit jako upravená „vylepšená“ matrice pro betonovou směs na výrobu betonového zdicího bloku. V experimentu jednotlivých směsí není použito kamenivo, neboť kamenivo je prakticky vždy pevnější složkou než cementová směs, která ho obaluje/obklopuje. Pouze v případech vysokohodnotných betonů s pevnostmi nad 70 MPa je používáno hutné, kvalitnější kamenivo, kde už problém s pevností kameniva nastává. V našem případě takových pevností dosahovat nebudeme, a tak kamenivo může být vynecháno a zaměření experimentu se bude týkat pouze samotné matrice. Požadavky na kompozitní směs jsou tedy dány především tlakovou únosností (pevností) a následně modulem pružnosti a smrštěním. Při experimentu byla snaha najít pomyslný průsečík mezi maximální mírou náhrady cementu jemně mletým recyklovaným betonem a dostatečnou tlakovou pevností. Jemně mletý recyklovaný beton je použit v cementové maltě jako plnivo s určitými pojivovými vlastnostmi. Z předchozích experimentů (Hrůza 2016), (Topič et al. 2017) bylo dokázáno, že s přibývajícím procentuálním hmotnostním zastoupením recyklátu ve směsi dochází k poklesům tlakových pevností. Proto, aby si směs zachovala určitou ještě vyhovující tlakovou pevnost, byly použity různé přísady do betonu, které způsobují nárůst počátečních a konečných tlakových pevností.

2 Současný stav problematiky

V následující kapitole se budu věnovat okruhům spojeným s tématem mé práce. Účelem by mělo být uvedení do dané problematiky a získání si obecného přehledu a pohledu na řešené téma. Nedílnou součástí bude představení podobných experimentů, kterým se věnovali také jiní odborníci z různých zemí.

2.1 Cement

Cement je v současnosti nejpoužívanějším pojivem ve stavebnictví a je hydraulickým pojivem, čili po smíchání s vodou a většinou po počátečním zatuhnutí na vzduchu je schopen dále tuhnout a tvrdnout na vzduchu i pod vodou. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou chemicky reaguje. Vzniká mletím slínku, který je produktem rozdrčených a rozemletých surovin vhodného složení (vápeneč, slínovec) vypálených nad mez slinutí (cca 1450 °C) (Jirásek & Vavro 2008).

2.1.1 Historie

Používání cementu se podstatným způsobem rozšířilo zejména v posledních dvou stoletích, avšak již ve starověku byl známý proces hydraulického tuhnutí a tvrdnutí. První údaje o cementu pocházejí z období okolo poloviny prvního tisíciletí př. n. l. z Řecka, Fénicie a Říma. Název cement pochází z latinského slova „caedere“, tj. tlouci. Staří Římané ale používali tento výraz i pro označení lomového kamene. Zdivo vystavěné z tohoto materiálu pak označovali jako „caementa“, resp. „structurae caementicae“ (Tůmová 2008). Moderní pojem „cement“ vznikl náhodou, když v roce 1774 překládal Francouz Lorient dílo *Naturalis historia* od Gaia Plinia Secunda a pro slovo „caementa“ použil výraz „ciment“. Odtud přešel tento výraz do odborné literatury jako označení pro maltoviny tvrdnoucí pod vodou v pevnou hmotu (Jirásek & Vavro 2008).

V průběhu 18. století, v souvislosti s rozvojem výzkumů v chemii a stavebnictví, se postupně dospělo k názoru, že hydraulické vlastnosti nemá vápno vyrobené z čistých vápenců, ale z vápenců znečištěných jíly (1756 – John Smeaton, stavba majáku v Eddystonu). V roce 1796 byl v Anglii přiznán Jamesovi Parkerovi patent na výrobu cementu, vyrobeného z „kentského“ vápence, který vykazoval vhodný obsah jílovitých složek. Parker tuto surovinu rozmělnil a páčil v peci až téměř do slinutí. Svůj výrobek nazval románským cementem, protože se svojí barvou podobal pojivu starých Římanů (Jirásek & Vavro 2008), (Tůmová 2008).

Na začátku 19. století byla L. J. Vicatem vyrobena a v praxi použita maltovina, připravená ze směsi vápence a jílu, čímž bylo potvrzeno, že jílovitou složku je možno do vápence dodat „uměle“, pokud v něm není obsažena přirozeně. Patent na výrobu portlandského cementu byl přiznán v roce 1824 Johnu Aspdinovi, zedníkovi z Leedsu. Název portlandský dostal proto, že beton z něj vyrobený se vzhledem podobal oblíbenému šedobílému vápenci z anglického ostrova Portlandu. „Vynález“ portlandského cementu „dokončil“ I. Ch. Johnson, který roku 1844 upozornil na důležitost přesného dodržování a stálého sledování správného mísicího poměru surovin. Hlavní důraz kladl na ostré pálení, aby nastalo slinutí (Bárta 1961). Ke konci 19. století byly objeveny latentní hydraulické vlastnosti vysokopecní strusky. Zjištěný objev vedl k zavedení výroby struskoportlandských cementů (do 30 % strusky) a vysokopecních cementů (více jak 70 % strusky). Zavedením strusky jako příměsi ke slínku byly položeny základy k pojivové složce lépe odolávající agresivnímu prostředí. Poznatky o vlivu obsahu trikalciumaluminátů (C_3A) na odolnost vůči síranovému iontu vedly k výrobě tzv. síranovzdorných cementů (Sunnysoft s.r.o 2017).

2.1.2 Výroba portlandského cementu

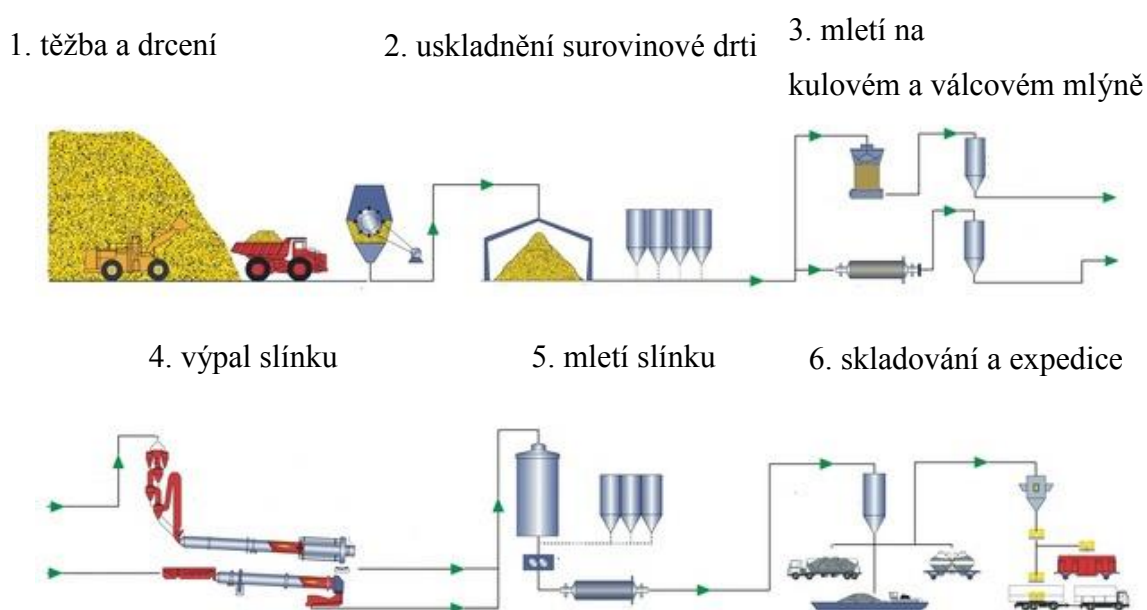
Samotná výroba začíná povrchovou těžbou cementářských surovin tj. vápence a různých jíílů a hlín, pokud již hlíny a jíly nejsou primárně obsaženy ve vápencích. Ideální cementářskou surovinou je slínovec, hornina, která obsahuje uhličitán vápenatý s příměsí jílových minerálů. Po těžbě následuje jednostupňové (málo zpevněné horniny) nebo dvoustupňové drcení (Obr. 1, 1. krok). Většinou jsou horniny drceny ve dvou stupních za pomoci čelistových nebo kuželových drtičů. V soustavě drtičů bývají vloženy třídiče k vrácení nadsítných zbytků k předdrcení. Surovinové drti se poté uskladňují v zásobnících nebo na předhomogenizačních skládkách (Obr. 1, 2. krok). Z předhomogenizačních sil jsou surovinové drti mlety (Obr. 1, 3. krok). Mletí je jednou z nejdůležitějších fází výroby cementu a také patří k technologicky a energeticky nejnáročnějším procesům. Surovinové drti jsou mlety na moučku o velikosti zrna v řádech desítek μm . Jemnost mletí je zásadním faktorem, který významně rozhoduje o průběhu slinování a rychlosti tvorby slínku při výpalu. Mletí cementářských surovin v dnešní době za suchého způsobu výroby probíhá v plně automatizovaných a dálkově ovládaných jednostupňových mlýnicích s mechanickým oběhem a současným sušením mletých surovin. Nejpoužívanějšími mlýny jsou tzv. kulové mlýny, které jsou jakýmsi dutými bubny nebo válci. Válec (buben), ve kterém jsou z části mlecí tělesa – železné koule (Obr. 2), se otáčí kolem své vodorovné osy a pomocí odstředivé síly a mlecích těles dopadají na mletý materiál. Namleté cementářské suroviny jsou poté skladovány v homogenizačních silech.

Z homogenizačních sil putuje namletá surovina na nejdůležitější část celé výroby a to je samotný výpal slínku (Obr. 1, 4. krok) (Jirásek & Vavro 2008).

Slínek se vypaluje v cementářských pecích, které můžeme dělit do třech kategorií:

- Rotační – vysoký výkon, kvalitní výpal slínku,
- Šachtové – malý výkon, obtížné drcení výpalu, výsledný slínek je horší kvality,
- Ostatní – např. slinovací rošty (Jirásek & Vavro 2008).

V současnosti se používají výhradně kontinuálně pracující rotační pece, i když původně probíhala výroba cementu i v pecích šachtových (Svoboda 2008).



Obr. 1: Zjednodušené schéma výroby cementu (Jirásek & Vavro 2008).

Slínek, který je základní surovinou pro další výrobu cementu obsahuje především křemičitany (silikáty) a hlinitany (alumináty) vápenaté. Jedná se o sloučeniny podobné přírodním horninotvorným minerálům. S ohledem na tuto skutečnost se sloučeniny tvořící slínek označují jako slínekové minerály. Slínek (Obr. 2) se po částečném vychladnutí drtí a poté se nechává vychladnout ve skladovacích slínekových silech (Obr. 1, 5. krok).



Obr. 2: Portlandský slínek v kulovém mlýnu (Matějka 2010).

Době, po kterou je slínek v těchto silách, se už dnes nepřipisuje takový význam jako dříve a kapacita sil se volí jen taková, aby spolehlivě vyrovnávala výrobní výkyvy. Ze skladovacích prostor se slínek průběžně odebírá a společně s přísadou 2 až 6 % sádrovce (přírodního sádrovce sádrovcových střepů z použitých sádrových forem, průmyslového odpadního sádrovce) se mele na definitivní jemnost, čímž vzniká jednosložkový (portlandský) cement (Obr. 1, 5. krok). Sádrovec slouží v cementu jako regulátor rychlosti tuhnutí. Ke stejnému účelu je možné použít i přírodní anhydrit, sádrovci se však většinou dává přednost. Požadavky na kvalitu sádrovce i anhydritu předepisuje ČSN 72 1206. Kromě sádrovce se mohou (v množství nepřesahujícím 1 % z hmotnosti cementu) přidávat i vedlejší přísady, např. intenzifikátory mletí nebo hydrofobní přísady. Výsledkem závěrečné mlecí operace je jemně práškovitý produkt s měrným povrchem 225 až 400 m²/kg, který je dopravován do skladovacích cementových sil, ze kterých se pak podle potřeby dávkuje buď do přepravních aut, příp. vagonů nebo na pytlovací linku (Obr. 1, 6. krok) (Svoboda 2008). V současné době je v ČR v provozu celkem pět cementáren, viz Obr. 3. V závodě Králův Dvůr je nyní výroba dočasně zastavena, v provozu je balicí linka a expedice (Starý 2016).



Obr. 3: Cementárny v České Republice.

Z pohledu světové produkce cementu bylo za rok 2015 vyprodukováno 4100 mil. t cementu. Hlavním producentem je Čína s 2 500 mil. t cementu, což představuje 57,3 % z celkového množství. Za Čínou pak následuje Indie a USA s 6,6 a 2,0 % (Starý 2016).

2.1.3 Složení slínku portlandského cementu

Slínkových minerálů je sice možné ve slínku identifikovat okolo dvaceti, ale prakticky za významně považované jsou jen čtyři z nich, viz Tab. 1.

Tab. 1: Hlavní slínkové minerály běžného portlandského cementu (Svoboda 2008).

Chemický název	Chemická značka	Zkratka	Ozn.	Hmotnostní podíl [%]
Trikalciumsilikát	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	Alit	45–65
Dicalciumsilikát	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	Belit	15–30
Trikalciumaluminát	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Amorfni fáze	1–8
Tetrakalciumaluminátferit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Celit	8–15

Zmíněné čtyři sloučeniny tvoří dohromady přes 90 % z celkové hmotnosti slínku. K výše uvedené tabulce je nutno ještě k úplnosti vysvětlit význam tzv. cementářské notace, kde se používají v souvislosti s touto problematikou dané zkratky veličin (Svoboda 2008):

C = CaO	S = SiO ₂	A = Al ₂ O ₃	F = Fe ₂ O ₃
H = H ₂ O	$\bar{\text{S}}$ = SO ₃	M = MgO	-

Každá ze čtyř složek nějak ovlivňuje výsledné vlastnosti cementu tím, že do něj vnáší svoje charakteristické vlastnosti.

Alit (C_3S) nabývá pevnosti převážně v počáteční době do 28 dní. Jeho vyšší obsah je proto žádoucí pro rychlé dosažení pevností umožňujících navázat další operace např. odbedňování konstrukcí. Alitový cement je proto všeobecně používaným typem cementu. Rovněž rychlovazné cementy mají obsah C_3S co nejvyšší (Svoboda 2008). Je málo odolný vůči agresivnímu prostředí.

Belit (C_2S) má po hydrataci nízké počáteční pevnosti, a proto z větší části vytvrzuje až po 28 dnech. Konečné pevnosti se ale vyrovnají Alitu. Uplatňuje se převážně v belitovém cementu s nízkým hydratačním teplem, jenž se používá při betonáži mimořádně masivních konstrukcí (např. přehradních hrází), kde je zapotřebí delší dobu k postupnému odvodu tepla vyvinutého při hydrataci (Svoboda 2008). Oproti Alitu je odolný vůči agresivnímu prostředí.

Amorfní fáze (C_3A) se oproti předchozímu Belitu vyznačuje velmi rychlou reakcí a je součástí tzv. tmavé mezerní hmoty. Z tohoto důvodu přidáváme ke slínku dihydrát síranu vápenatého jako regulátor tuhnutí. C_3A má zásadní vliv na korozi, proto se jeho množství redukuje u síranovzdorných cementů.

Celit (C_4AF) dává po hydrataci velmi malé počáteční i konečné pevnosti a má obdobně jako amorfní fáze (C_3A) zásadní vliv na korozivzdornost. Celit je součástí tzv. světlé mezerní hmoty, která může ve své struktuře obsahovat oxid železitý (Hlaváč 1981).

2.1.4 Hydratace cementu

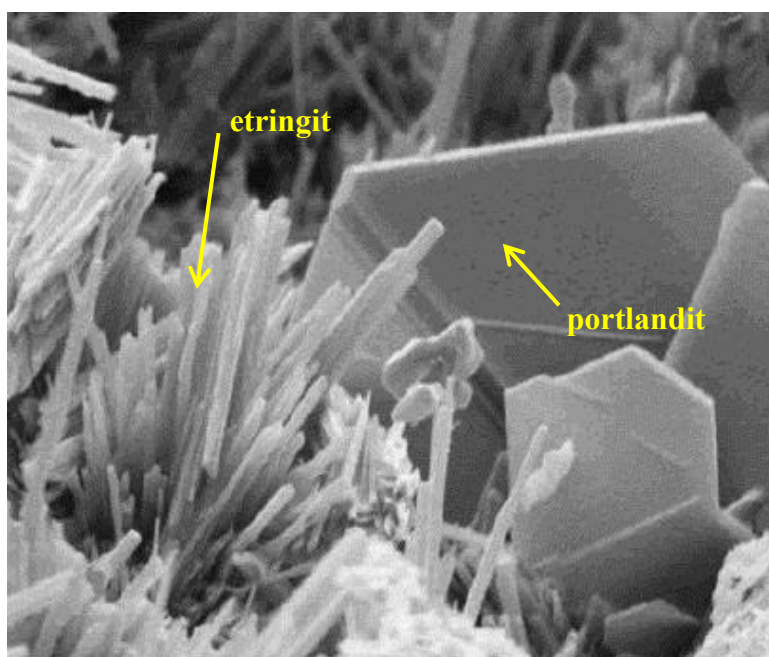
Cement začíná hydratovat ihned po smíchání s vodou. Jedná se o složitou fyzikálně-chemickou reakci, při které reagují slínkové minerály cementu s vodou za vzniku málo rozpustných sloučenin. Hned v úvodu je vhodné poznamenat, že průběh hydratačních reakcí je kromě mineralogického složení závislý také na jemnosti mletí, množství záměsové vody, teplotě a přítomnosti dalších přísad nebo příměsí. U běžně mletých cementů hydratuje pouze asi 15 % cementu. Ke zbývajícím částem cementových zrn se už voda přes vzniklé hydratační produkty nedostane a tato část cementu zůstává uzavřena v hydratované struktuře v původní podobě a slouží pouze jako plnivo (Svoboda 2008). Během této reakce dochází ke vzájemnému pevnému spojení slínkových minerálů, které vytváří mikrostrukturu ztvrdlého cementového kamene, čímž cementová pasta tuhne a tvrdne. Hydratace cementu je reakce exotermní, znamená to, že se při ní uvolňuje tzv. hydratační teplo.

Hydratace začíná probíhat hned po prvním kontaktu cementových zrn s vodou. Reakcí s vodou se původní bezvodé minerální fáze cementu přeměňují na hydratační produkty. Nové sloučeniny (hydratační produkty) již obsahují chemicky vázanou vodu, jsou stálé a ve vodě nerozpustné. Jednotlivé složky slínku však nereagují stejnou rychlostí. Nejprve hydratuje C_3A (amorfní fáze), jehož rychlá reakce musí být zpomalena přidáním retardéru (sádrovce), který se do cementu přidává v množství max. 5 % již během mletí slínku. Jako druhý začíná hydratovat C_4AF (Celit) spolu s C_3S (Alit) a nejpomaleji hydratuje C_2S (Belit) (Ščučka & Martinec 2013). Na hydrataci má mimo jiné také velký vliv množství vody ve směsi, které označujeme jako vodní součinitel (v/c). Vodní součinitel potřebný k plné hydrataci cementu je teoreticky 0,23, ale z důvodu zpracovatelnosti a zhydratování většiny zrn cementu se vodní součinitel u betonu v praxi pohybuje od 0,36 do 0,5 v závislosti na složení a požadované konzistenci směsi (Zongjin 2011).

Hydrataci cementu lze pro zjednodušení rozdělit do tří jednotlivých hydratačních stupňů, ke kterým dochází při smíchání cementu s vodou:

1. Fáze (0 – 1 hodina)

První fáze nastává ihned po smíchání cementu s vodou a vzniká přesycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obsahující ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} . Proces rozpouštění je poměrně rychlý a hydratace je exotermická. Následně začínají v tomto roztoku vznikat jehličkovité krystaly minerálu etringitu ($\text{C}_6\text{A}\hat{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) a destičkovité krystaly minerálu portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Obr. 4). Krystaly etringitu a portlanditu se usazují na povrchu částic C_3A (amorfní fáze) a vytváří kolem nich hutný, jemně krystalický obal. Voda a ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} mohou přes vzniklý obal jen velmi pomalu difundovat k ještě nehydratovaným slínkovým minerálům a proces hydratace se tak zpomaluje. Obal na povrchu zrn se vlivem krystalizačních tlaků postupně porušuje a opět zaceluje novými krystalky, tak dlouho, dokud koncentrace iontů SO_4^{2-} v roztoku neklesne pod hodnotu potřebnou pro vznik ettringitu. V první fázi hydratace probíhají reakce pouze na povrchu cementových zrn. Velikost zrn a prostory mezi nimi se významně nemění (Ščučka & Martinec 2013), (Aitein 2005).

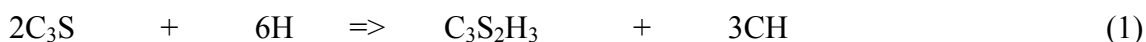


Obr. 4: Krystaly etringitu (C-S-A-H) a portlanditu (C-H) (Pavlík 2013).

2. Fáze (1 – 24 hodin)

Ve druhé fázi hydratace začínají vznikat vláknité gelovité krystalky C-S-H (kalciumsilikáthydrátů neboli vodnatých křemičitanů vápenatých). Z důvodu toho, že prostory mezi cementovými zrny zatím nejsou vyplněny hydratačními produkty, tak mohou krystaly CSH volně růst do podoby vláken o délce cca 100 nm (dlouhovláknitý CSH). Vlákná CSH spolu s dlouhými krystaly ettringitu pomáhají „přemostit“ póry a vytváří prostorové vazby,

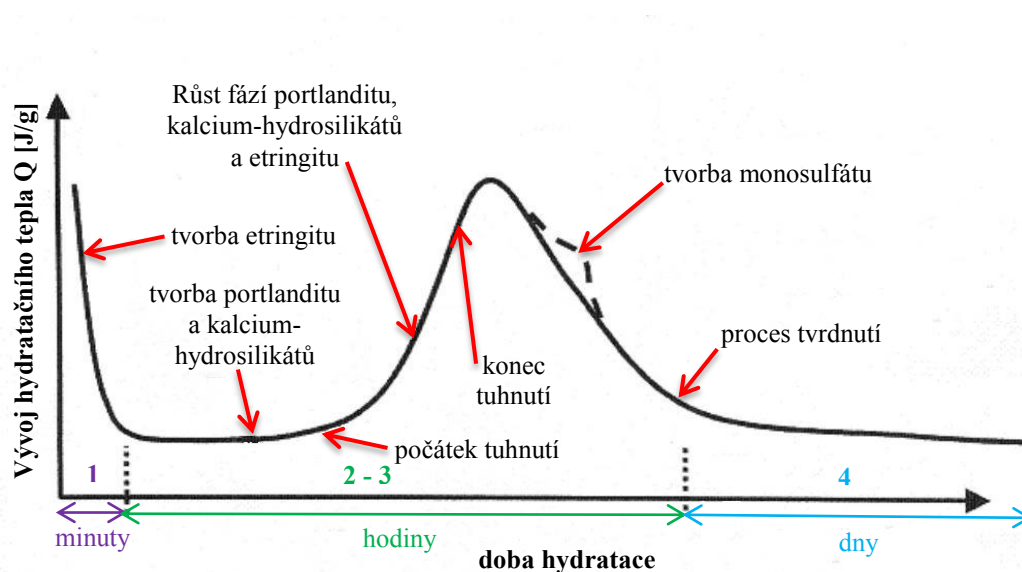
kteří se postupně zahušťují (zhutňují) a dochází tím k začátku tuhnutí cementového tmelu. S přibývajícím množstvím hydratačních produktů a zhutňováním struktury přestává vznikat dlouhovláknitý CSH, ale jeho nové krystaly dostávají kratší listkovitý (fóliovitý) tvar. CSH vzniká hydratací kalciumsilikátů C_2S (Belit) a C_3S (Alit). Složení C-S-H se pohybuje v poměrně širokém rozmezí a závisí významně především na velikosti vodního součinitele, teplotě a stáří betonu. Hydrataci kalciumsilikátů lze zjednodušeně popsat následujícími rovnicemi:



Rovnice popisují vznik C-S-H (kalciumsilikáthydrátu) a portlanditu (hydroxidu vápenatého) z reakce kalciumsilikátů (Alit, Belit) s vodou. Z uvedených rovnic (1), (2) je zřejmé, že kromě CSH vzniká hydratací kalciumsilikátů také portlandit (hydroxid vápenatý). Portlandit je zde důležitou složkou, protože ve vytvrzeném cementovém kameni vytváří alkalické prostředí (pH kolem 12,5). Vysoké pH v betonu (více jak 11,5) zaručuje dobrou ochranu výztuže proti korozi. Dostatečné množství portlanditu v cementovém kameni je proto známkou kvalitního "zdravého" betonu (Ščučka & Martinec 2013).

3. Fáze

V poslední fázi hydratace cement tvrdne. Objevují se nové hydratační produkty, pórový prostor se jimi postupně vyplňuje a zhutňuje. Začíná klesat obsah etringitu, neboť se mění na monosulfát. Velikost vláken vznikajících C-S-H se neustále zmenšuje a na konci hydratace je $10 \times$ až $100 \times$ menší než na konci druhé fáze (krátkovláknitý CSH) (Ščučka & Martinec 2013).



Obr. 5: Schéma procesu hydratace a vývoj hydratačního tepla, převzato a upraveno (Tegel 2001).

Souhrnné schéma hydratace cementu je zobrazeno na Obr. 5, kde je uvedena závislost vývoje hydratačního tepla na době hydratace. Z pohledu dosažení co nejvyšších hodnot pevností v tlaku je důležité, aby hydratací portlandského cementu vznikl C-S-H gel o co nejkompaktnější mikrostrukturu, protože silikátové fáze (reprezentující přibližně 80 % hmotnosti portlandského cementu) jsou hlavními nositeli pevnosti (Veleba 2008).

Při rozboru chemických reakcí, které probíhají při hydrataci cementu, nelze opomíjet fakt, že jde o velmi komplexní proces, ve kterém se uplatňují chemické, fyzikální i mechanické jevy a dodnes v podstatě neexistuje jednotná, komplexní a obecně uznávaná teorie, která by dokázala vysvětlit veškeré pochody probíhající při tuhnutí a tvrdnutí cementu (Matějka 2010). V žádném případě nestačí k uspokojivému popsání tohoto procesu pár chemických rovnic, je potřeba uvážit i fyzikální a mechanické aspekty procesu.

2.1.5 Klasifikace portlandského cementu

Cementů se vyrábí celá řada. Jednotlivé druhy se od sebe liší vstupními surovinami, obsaženými v surovinové směsi nebo poměrem těchto surovin a tím pádem složením slínku, pomocnými látkami, které se přidávají při mletí cementu ke slínku apod. Rozdíly v chemickém a mineralogickém složení mají za následek odlišnosti ve vlastnostech různých druhů cementů.

Z pohledu používání cementů ve stavebnictví je můžeme rozdělit na:

- cementy pro obecné použití,
- cementy speciální (Jirásek & Vavro 2008).

Speciální cementy se od těch běžných liší složením, postupem výroby a následným mechanismem tuhnutí. Do této kategorie patří například cement silniční, hlinitanový, expanzivní, vysokohodnotný či bílý atd. (Pavlík 2013). Protože portlandský cement nespadá do této kategorie, nebudu se problematikou speciálních cementů dále zabírat.

Základní charakteristika, rozdělení a složení cementů (Obr. 6) je specifikováno v ČSN EN 197 – 1 ed. 2 Cement – část 1: Složení specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Druhy cementů pro obecné použití podle ČSN EN 197 – 1:

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

Cementy také dále dělíme podle:

- pevnostní třídy (32,5; 42,5; 52,5 MPa)
- druhu příměsí (L – vápenec, P – přírodní pucolány)
- množství (A, B, C)
- nárůstu a vývoje počátečních pevností (R – rychlovačný, N – normální)
(ČSN EN 197 –1 2012)

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy cementů pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle hmotnosti ^{a)})										Doplňující složky	
			Hlavní složky											
			Slínek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílky		Kalcinovaná břidlice	Vápenec			
						přírodní	přírodní kalcinované	křemičité	vápenaté					
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100											0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35										0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94		6-10									0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94			6-20								0-5
		CEM II/B-P	65-79			21-35								0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20							0-5
		CEM II/B-Q	65-79				21-35							0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94				6-20							0-5
		CEM II/B-V	65-79				21-35							0-5
		CEM II/A-W	80-94					6-20						0-5
		CEM II/B-W	65-79					21-35						0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94						6-20					0-5
		CEM II/B-T	65-79						21-35					0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94							6-20				0-5
		CEM II/B-L	65-79							21-35				0-5
		CEM II/A-LL	80-94								6-20			0-5
		CEM II/B-LL	65-79									21-35		0-5
	Portlandský směsný cement ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35										0-5	
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65										0-5
		CEM III/B	20-34	66-80										0-5
		CEM III/C	5-19	81-95										0-5
CEM IV	Pucolánový cement	CEM IV/A	65-89		11-35								0-5	
		CEM IV/B	45-64		36-55								0-5	
CEM V	Směsný cement ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30		18-30								0-5
		CEM V/B	20-68	31-50		31-50								0-5
a)	Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.													
b)	Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.													
c)	Hlavní složky v portlandském směsném cementu CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánovém cementu CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsném cementu CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu.													

Obr. 6: Složení cementů pro obecné použití, (ČSN EN 197 –1 2012).

Norma ASTM C150 také dělí portlandský cement do pěti základních skupin podle jejich použití:

Type I – pro základní účely,

Type II – se střední odolností proti síranům a středním vývinem hydratačního tepla,

Type III – s vysokou počáteční pevností,

Type IV – s malým vývinem hydratačního tepla,

Type V – s vysokou odolností proti síranům (The Concrete Portal).

2.1.6 Makrostruktura a mikrostruktura ztvrdlého cementu

Struktura betonu obecně je termín, na kterém závisí veškeré vlastnosti ztvrdlé cementové směsi, ať už se jedná o pevnost v tlaku, tahu za ohybu, mrazuvzdornost či propustnost. Vlastnosti betonu jsou ovlivněny celkovým množstvím, velikostí pórů a způsobem jejich rozdělení. Výskytem pórů se beton stává porézním materiálem s prostorově nestejnou strukturou, proto je důležité se této problematice věnovat.

Makrostruktura

Je posuzována ve vazbě na beton respektive na řez betonovým prvkem (Obr. 7), kde je pohledem oka hodnocena. Beton je dvousložkový materiál obsahující kamenivo o různých tvarech a velikostech a pojivo, jenž je nesouvislou vrstvou zhydratovaného cementu, který k sobě spojuje hrubé i jemné kamenivo. Z důvodu velikosti pórů a hydratačních produktů, vzniklých při reakci cementu s vodou, je pro nás makrostruktura ztvrdlého cementu málo vypovídající.

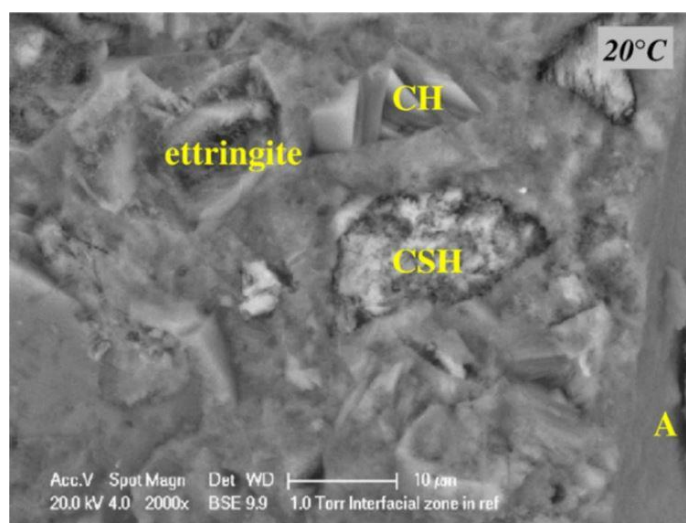


Obr. 7: Makrostruktura betonu, řez betonovou dlaždicí (Stroyres 2017).

Mikrostruktura

Oproti makrostruktuře je zásadním faktorem, který ovlivňuje veškeré vlastnosti ztvrdlé cementové pasty. Mikrostrukturu můžeme pozorovat pomocí elektronového mikroskopu, kde díky zpětně odraženým elektronům získáme snímek k identifikaci a rozboru dané, u betonu velmi porézní, struktury, kde můžeme rozpoznat čtyři základní pevné složky zhydratované cementové pasty (Obr. 8):

- Kalcium silikát hydrát (C-S-H),
- Kalcium hydroxid (C-H) – portlandit,
- Kalcium sulfoalumináty (C-S-A-H) – etringit,
- Nezhydratovaná cementová zrna (Pavlík 2013).



Obr. 8: SEM snímek cementové matrice při 20 °C, CH – portlandit, CSH) – kalcium silikát hydrát, CSAH – etringit, A – kamenivo, převzato z (Procházka 2015).

Struktura pojiva (cementu) je v různých místech dosti rozdílná, protože zdánlivě homogenní pojivo má porézní strukturu o různém tvaru a velikosti pórů. Jedná se o následující tři druhy pórů (dutin):

- *Technologické póry* – vzniklé při výrobě směsi stržením okolního vzduchu nebo úmyslně vytvořené přidáním přísad. Hrají důležitou roli při propustnosti betonu, neboť jsou daleko větší než kapilární póry.
- *Kapilární póry* – póry vzniklé mezi zrny hydratujícího cementu. Mají velký význam z hlediska transportních procesů, ale naopak malý význam z pohledu míry hydratace. Jejich velikost je ovlivněna vodním součinitelem (Procházka 2015).

- *Gelové póry* – nazývané také jako intersticiální, jsou součástí C-S-H gelu (Pavlík 2013). Díky své velikosti neovlivňují průsak vody, ale mohou přispívat ke smršťování z důvodu vysoušení a dotvarování betonu (Procházka 2015).

Nejpodstatnějšími faktory ovlivňujícími porézní strukturu betonu jsou vodní součinitel (v/c), chemické složení slínku, velikost zrn cementu (jemnost mletí), teplota v průběhu hydratace a vnější prostředí při tvrdnutí (Neville 2011). Pórovitost je jednou z dominantních vlastností, která ovlivňuje zásadním způsobem pevnost, modul pružnosti, permeabilitu a trvanlivost betonu. Přehledné rozdělení pórů je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2: Klasifikace pórů v hydratované cementové pastě (Pavlík 2013).

Název	Velikost	Charakteristika	Vliv na mechanické vlastnosti
Technologické póry	1000–15 μm	kulového tvaru	pevnost a propustnost
Kapilární póry	15–0,05 μm	širší kapiláry	pevnost, propustnost a smrštění na poč. tuhnutí
	50–10 nm	střední kap., kapilární dutiny	pevnost, propustnost a smrštění při vyšší vlhk.
Gelové póry	10–2,5 nm	úzké kapiláry	průběh smrštění při relativní vlhkosti < 50%
	2,5–0,5 nm	mezi útvary v gelu	smrštění a dotvarování
	< 0,05 nm	mezi vrstvami gelu	smrštění a dotvarování

2.2 Chemické přísady v kompozitních materiálech

Chemické přísady jsou složky betonu, které se přidávají do směsi bezprostředně při míchání betonu nebo v jeho průběhu. Výrobci vyrábějí chemické přísady zejména pro snížení nákladů na betonové konstrukce, pro upravení vlastností ztvrdlého betonu (hlavně zvýšení pevnosti), pro redukce spotřeby záměsové vody, pro nižší pórovitosti, pro vyšší vodovzdornosti a mrazuvzdornosti, pro provzdušnění, pro zajištění kvality betonu během míchání či dopravy, ukládání, zpracovávání betonové směsi, k čemuž se váže i prodloužení či urychlení začátku tuhnutí (Zajíček 2008).

Pro úspěšné použití chemických přísad je nutno dodržet správné a vhodné metody dávkování a betonování. Většina chemických přísad je dodávána v tekuté formě, které jsou ihned připravené pro použití a do betonu jsou přidávány při míchání na betonárce nebo v domíchávači na staveništi. Některé přísady, jako jsou pigmenty, expanzní činidla a prostředky pro podporu čerpání se používají ve velmi malém množství a obvykle jsou dávkovány ručně z odměrných nádob. Chemické přísady jsou rozděleny podle jejich funkcí. Rozlišujeme těchto pět různých tříd chemických přísad (Můj beton 2017):

- Provzdušňovače
- Zpomalovače tuhnutí
- Urychlovače tuhnutí
- Vodoredukující – plastifikátory
- Změkčovadla – superplastifikátory

Kromě zmíněných přísad existují další typy, jako např.: hydrofobizační přísady (odpuzející vodu), protikorozi (inhibitory koroze), biocidní, protizmrazovací, expanzní atd. (Ščučka & Martinec 2013).

Někteří výrobci stavební chemie:

- | | |
|------------------------------------|--------------------------|
| - Sika CZ, s.r.o. | - Herz |
| - Stachema CZ s.r.o. | - Giacomini Czech s.r.o. |
| - Chryso Chemie s.r.o. | - Baufan |
| - Den Braven Czech and Slovak a.s. | - Enaspol a.s. |
| - Tytan | |

2.2.1 Provzdušňovače

Opakované zmrazování a rozmrazování má na trvanlivost betonu negativní vliv, a proto pro zvýšení odolnosti betonu proti těmto jevům včetně růstu krystalů solí z chemických rozmrazovacích látek používáme provzdušňující přísady. Zmrzne-li voda, která při změně skupenství zvětší svůj objem o 9 %, potom v kapilárních pórech v cementovém kameni tyto objemové změny způsobí tlak na stěny pórů. Vzniklé napětí vede ke vzniku trhlin a poškození betonu. Přidání provzdušňovací přísady do čerstvého betonu během míchání způsobí vytvoření velkého množství drobných bublinek, které v betonu zůstanou i po jeho zatvrdnutí (Ščučka & Martinec 2013). Požadované optimální parametry obsahu, tvaru a vzájemného rozložení vzduchových bublinek v betonu ovlivňuje více faktorů: proměnlivé složení vstupních surovin, míchání, technologie betonování a teplota (Zajíček 2008). Kulovité bublinové póry přerušují kanálky kapilárních pórů a vytvoří tak záložní prostor, do kterého může mrznoucí voda expandovat. Důležitá je velikost vytvořených bublinek, která se má pohybovat od 10 do 300 μm a celkový obsah vzduchu v provzdušněném betonu má být 4 až 6 % objemu betonu. Provzdušněním se také zlepšuje (prodlužuje) zpracovatelnost a soudržnost betonu. Bohužel negativním účinkem je snížení především tlakové pevnosti betonu. Na každé procento provzdušnění betonu připadá snížení jeho tlakové pevnosti o 4 až 5 %. Provzdušňovací přísady (čínidla) se vyrábí převážně ze solí přírodních pryskyřičných a mastných kyselin nebo na bázi syntetických sulfonanových tenzidů. K provzdušnění betonu lze použít také duté tenkostěnné polymerní mikrodutinky o velikosti setin mm, které se do betonu přimíchávají ve formě vodní pasty (Ščučka & Martinec 2013).

2.2.2 Zpomalovače tuhnutí

Zpomalovače tuhnutí nebo také retardační přísady zpomalují rychlost tuhnutí cementu (prodlužují proces hydratace) a prodlužují tím dobu přechodu betonu z čerstvého do plastického stavu. Používají se k eliminaci zrychlujících účinků tuhnutí betonu při betonáži v teplém počasí a udržují tak beton ve zpracovatelné formě pro uložení. Vysoké teploty často způsobí zvýšenou rychlost tuhnutí, což má za následek velmi obtížné zpracování a ukládání betonu (Můj beton 2017). Retardační přísady se také používají v případech, kdy je potřeba prodloužit dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu (např. při dopravě transportbetonu na velké vzdálenosti) (Ščučka & Martinec 2013). Dalším uplatněním je v případě masivních konstrukcí, kdy by příliš rychlý vývin hydratačního tepla mohl způsobit vznik trhlin a zhoršení mechanických vlastností struktury betonu (Zajíček 2008). U masivních konstrukcí, kde je ukládáno velké množství betonu, také přidáním retardéru zabráníme nedokonalému spojení následujících vrstev betonu (omezíme množství pracovních spár) (Ščučka & Martinec 2013).

Vlastností většiny zpomalovačů je i snížení spotřeby záměsové vody při stejné míře zpracovatelnosti, čili typické vlastnosti tzv. plastifikátorů, či superplastifikátorů (Můj beton). Retardační přísady zpomalují hydrataci C_3S (kterého je v portlandském cementu nejvíc) a C_3A (který ze slínkových minerálů tuhne nejrychleji). Většinou se jedná o látky na bázi solí hydroxykarboxylových kyselin nebo na bázi sacharidů a jejich derivátů. Přísady z hydroxykarboxylových kyselin mají současně i plastifikační účinky (Ščučka & Martinec 2013). Je tedy možno konstatovat, že většina zpomalovačů působí též taky jako superplastifikátory (Zajíček 2008). Zpomalovače také mohou mít vliv na tvorbu vzduchových bublinek v betonu (Můj beton 2017).

2.2.3 Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu

Urychlující přísady jsou materiály, které se přidávají do betonu, aby se zkrátilo tuhnutí, snížila potřebná doba pro správné ošetření a zvýšila rychlost náběhu počáteční pevnosti (Zajíček 2008). Urychlující přísady betonu můžeme rozdělit do dvou skupin:

- urychlovače tuhnutí cementu,
- urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu.

Urychlovače tuhnutí cementu

Urychlovače tuhnutí zkracují dobu přechodu betonu z čerstvého do plastického stavu a většinou to jsou látky na bázi hydroxidů, uhličitanů, hlinitanů nebo křemičitanů alkalických kovů. Urychlovače urychlují hydrataci trikalciomaluminátu (C_3A), při níž se uvolňuje značné množství tepla, které vede ke zrychlení hydratace dikalciumsilikátu (C_2S) a tím dochází

ke zvýšení počátečních pevností betonu. V praxi se s těmito přísadami můžeme setkat při použití ve stříkaných betonech nebo v cementových kaších a maltách pro utěšňování průniku vody v podzemních částech staveb nebo tunelech atd. (Ščučka & Martinec 2013).

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu urychlují vývoj nárůstu počátečních pevností betonu, přičemž mohou, ale nemusí urychlovat tuhnutí betonu. Jde o látky na bázi rozpustných halogenidů, dusitanů, dusičnanů, mravenčanů, tiosíranů nebo tiokyanatanů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu urychlují hydrataci trikalciumpilikátu (C_3S), což vede ke zvýšenému vývinu hydratačního tepla a k tvorbě C-S-H gelu v počáteční fázi hydratace.

Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí se používají v případech potřeby rychlého odbednění stavebních konstrukcí nebo odformování betonových dílců (Ščučka & Martinec 2013). Jsou zvláště užitečné pro modifikaci vlastností betonu při betonáži v chladném (zimním) počasí, při betonování pod studenou vodou a při betonování stříkaným betonem. Rychlý vývin hydratačního tepla zkracuje v zimě dobu potřebnou pro ochranu betonu před promrznutím (Zajíček 2008).

Speciální kategorii představují urychlovače způsobující velmi rychlé ztuhnutí betonové směsi v průběhu pouze několika minut. Používají se zejména při aplikaci stříkaného betonu. Jedná se o: křemičitan sodný, hlinitan sodný, chlorid hlinitý, fluorid sodný a jiné (Zajíček 2008).

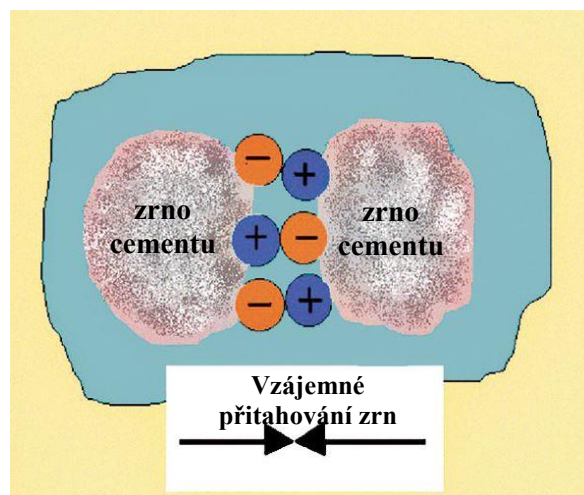
2.2.4 Vodoredukující přísady – plastifikátory

Z obecného hlediska lze říci, že plastifikátory jsou přísady do betonu, které svým „chováním“ snižují množství vody potřebné k hydrataci cementu. Zpomalují hydrataci C_3A fáze (tzv. retardační účinek – tvorba vrstvičky ettringitu na povrchu částic C_3A , čímž dochází k znesnadnění hydratace zrn této nejreaktivnější minerální fáze v portlandském cementu), což se samozřejmě projevuje zlepšením mechanických vlastností betonu, zejména pak dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku. V důsledku toho beton, který obsahuje vodoredukující přísady, potřebuje méně vody k dosažení požadovaných vlastností než beton, který tuto přísadu neobsahuje. Beton upravený plastifikátory může mít nižší vodní součinitel. Vodoredukující přísady neboli plastifikátory obvykle snižují požadované množství vody v betonové směsi o 5 až 15 % (Můj beton 2017). Obecně také platí, že čím méně bude v betonu použito záměsové vody, tak tím nižší bude pórovitost a tím vyšší pevnost a trvanlivost betonu (Veleba 2008).

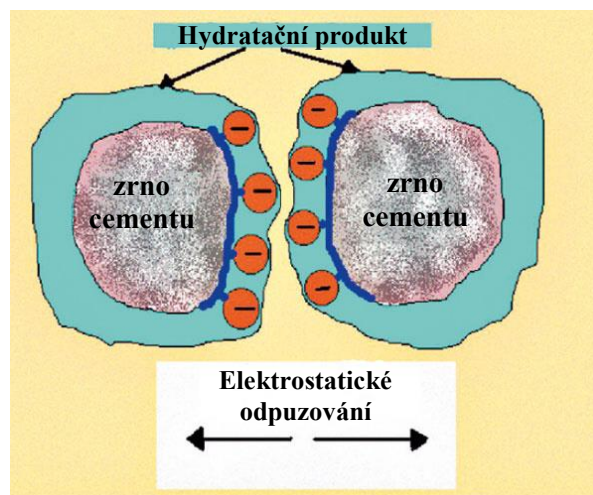
Plastifikátory jsou chemické přísady, které se přidávají do betonu během jeho míchání v rozmezí od 0,2 do 5,0 % hmotnosti cementu pro zlepšení nebo vylepšení čerstvého či tvrdnoucího betonu (Můj beton 2017). Dochází tak ke snížení vodního součinitele a zmíněnému nárůstu pevnosti ztvrdlého betonu. Plastifikační přísady zlepšují nejen pevnost v tlaku, ale také např.: odolnost vůči korozi a průsaku tlakové vody, mrazuvzdornost a zvyšují modul pružnosti (Jedla 2010).

Nedávné pokroky vedly k vývoji středně vodoredukujících přísad. Zmíněné přísady snižují obsah vody v betonu alespoň o 8 % a mají stabilní vlastnosti v širším rozmezí teplot. Středně vodoredukující přísady poskytují konzistentní časy tuhnutí než standardní vodoredukující přísady (Můj beton 2017).

V běžném cementovém kompozitu bez použití plastifikátoru dochází k shlukování zrn cementu, což je zapříčiněno mletím slínku, kdy se na nových povrchových plochách cementových zrn vyskytují elektrostatické náboje (kladné i záporné), (Obr. 9). Na základě rozdílných nábojů se jednotlivá zrna přitahují (shlukují), a tím je ztížen „průchod“ záměšové vody do cementových shluků. Voda se tedy hůře dostává k cementovým zrnům uvnitř shluků, a tak je sníženo využití cementu pro hydrataci všech zrn. Princip působení plastifikačních přísad spočívá v řetězci molekul s negativním nábojem, jehož části se vážou na cementová zrna, která mají náboj opačný, tedy pozitivní. Zbytek negativního náboje řetězce plastifikátoru je orientovaný směrem od zrn cementu, a tak dochází ke vzájemnému elektrostatickému odpuzování jednotlivých zrn, čímž se sníží tření a zvýší se pohyblivost kaše (Obr. 10). Molekuly plastifikátorů se po dobu hydratace stále více obklopují hydratačními produkty, až se zcela potlačí účinek přísad (Zajíček 2008).



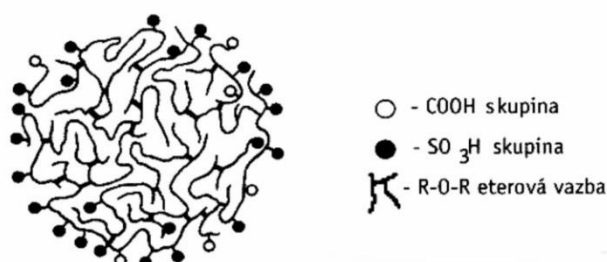
Obr. 9: Shlukování cementových zrn z důvodu rozdílných elektrostatických nábojů, směs bez plastifikátoru (Zajíček 2008).



Obr. 10: Princip působení plastifikátoru např. na bázi sulfonátů (Zajíček 2008).

Plastifikátory na bázi lignosulfonátů

Jedná se o první používané plastifikační přísady na trhu, které byly vyráběny ze sulfitových výluhů (Collepari 1998). Lignosulfonáty (Obr. 11) jsou látky obsažené v sulfitových výlužích, což je odpad vznikající při papírenském zpracování dřeva. Složení lignosulfonátů se bohužel dosti lišilo v čistotě, což bylo následkem rozdílných vlastností při použití. Nevýhodou lignosulfonátů je, že provzdušňují beton a mohou obsahovat sacharidy, které působí jako zpomalovače tuhnutí cementu, proto se v moderních výrobcích sacharidy odstraňují kvasnými procesy (Ščučka & Martinec 2013). Dnes jsou tedy s velmi nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel (Collepari 1998). Použitím lignosulfonátů je možné redukovat záměsové množství vody cca o 5 až 10 % bez projevení vedlejších účinků (Aitcin 2005). V dnešní době je na trhu stále najdeme, ale postupem času byly objeveny nové skupiny, které jsou efektivnější, nazýváme je superplastifikátory – viz kap. 2.2.5.



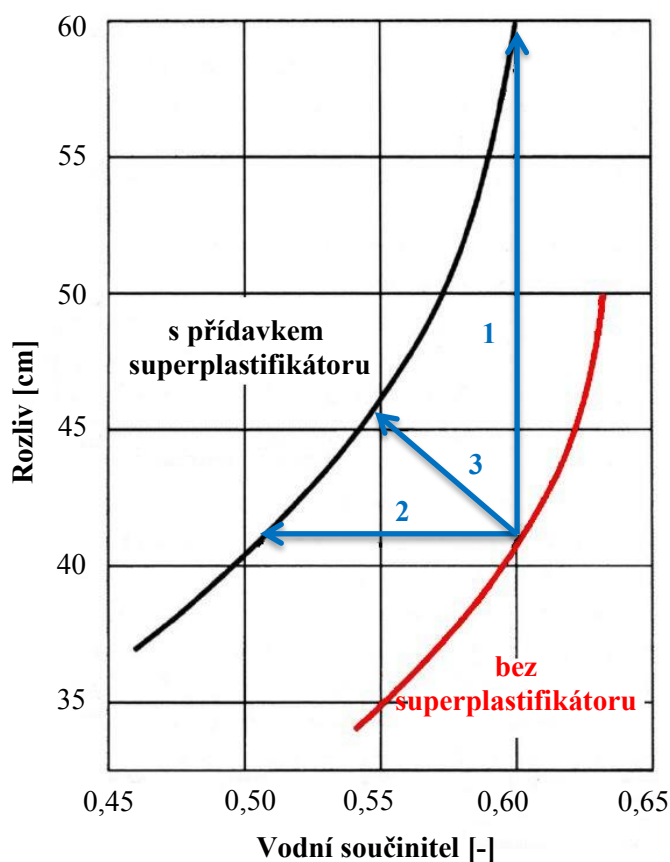
Obr. 11: Schéma lignosulfonátu (Aitcin 2005).

Plastifikátory či superplastifikátory jsou nejběžněji prodávány jako tekutiny, které jsou snadno smíchatelné se záměsovou vodou nebo se dávkuje přímo do zavlhlé betonové směsi. Balení přísad jsou různá, můžeme je zakoupit v litrové láhvi, 1000 litrovém barelu, či cisterně pro betonárky. Některé plastifikátory lze obdržet i ve formě prášku.

2.2.5 Změkčovadla (superplastifikátory)

Superplastifikátory (zkratka SP) jsou organické polymery s dlouhými řetězci molekul. Fungují v podstatě na stejném principu jako obyčejné plastifikátory, pouze ztekucující účinek betonové směsi je výrazně silnější. Superplastifikátory jsou tak oproti plastifikátorům látky, které mají výraznější účinky na snížení obsahu potřebné vody v betonu (Veľeba 2008). Umožňují širší manipulaci s množstvím vody a dávkou cementu a to pro tři způsoby použití (Obr. 12):

- 1 – ztekucení čerstvého betonu z konzistence F2 až na F5 při stejném vodním součiniteli
 - velké zjednodušení ukládání čerstvé betonové směsi
 - samozhutnitelné betony
- 2 – úspora vody při zachování stejné konzistence
 - zlepšení počáteční i konečné pevnosti
 - vysokohodnotné betony
- 3 – úspora vody (snížení vodního součinitele) při současném ztekucení
 - nejčastější využití ve všech oblastech výroby betonových konstrukcí (Svoboda 2008)



Obr. 12: Závislost vodního součinitele a rozlití čerstvého betonu s/bez superplastifikátoru, převzato a upraveno (Svoboda 2008).

Přidáním superplastifikační přísady do cementové směsi dochází k chemické modifikaci a ovlivnění výsledných mechanicko-fyzikálních vlastností. Superplastifikátory snižují oproti plastifikátorům obsah vody o 15 – 30 % a přidávají se do betonů s nízkým sednutím a vodním součinitelem, aby se zvýšila „tekutost“ betonu (Veleba 2008). Superplastifikátory mají v betonu vysoce vodoredukující funkci, čili použitím plastifikačních přísad dosáhneme snížení množství záměsové vody a docílíme snadné zpracovatelnosti, která je ovšem omezena trváním účinku přísad 30 – 60 minut. V závislosti na výrobci a rychlosti dávkování následuje po uplynutí určité doby významné zhoršení zpracovatelnosti, proto se superplastifikátory přidávají až na stavbě (Můj beton 2017).

Typy superplastifikátorů (SP)

Superplastifikační přísady jsou sulfítové výluhy, lignosulfonáty se sulfaminkresolem, sulfítové modifikované melaminové pryskyřice, hydrolyzáty bílkovin, polykarboxyláty a další látky. Zjednodušeně můžeme říci, že plastifikátory jsou organické makromolekulární látky adsorbující (shromažďující se) na povrchu cementových zrn, čímž umožňují měnit jejich náboj, rozptýlit aglomeráty částic a upravovat tím zpracovatelnost (konzistenci) čerstvého betonu (Zajíček 2008). Podle složení makromolekulárního řetězce rozlišujeme tyto základní typy superplastifikátorů:

- **PNS** – polykondenzát naftalensulfonátu s formaldehydem,
- **PMS** – polykondenzát sulfonovaného melaminu s formaldehydem,
- **PCL** – polykarboxyláty a polyakryláty (Zajíček 2008).

Superplastifikátory na bázi PNS

Jedná se o první superplastifikátory, které jsou produkty kondenzace sulfonovaného naftalenu s formaldehydem. Po chemické stránce jsou superplastifikátory na bázi naftalenu sulfonované soli polykondenzátu naftalenu a formaldehydu a jsou obvykle označovány jako sulfonáty polynaftalenů. Jedná se o kondenzační produkt kyseliny naftalesulfonové a formaldehydu. Mají podobu hnědé kapaliny s charakterickým zápachem nebo okrového prášku. Ztekucovače tohoto typu jsou externě účinné a mají téměř nulové retardační účinky. Výroba těchto ztekucovačů je dosti složitá a na trhu je celá řada jejich modifikací. Pro dosažení optimálního ztekucovacího účinku se do těchto superplastifikátorů přidávají látky, které způsobují vysoké ztekucení betonové směsi a zabraňují rozměšování. Použitím ztekucovačů na bázi naftalenu lze dosáhnout úspory až 35 hm. % záměsové vody při nezměněné konzistenci betonové směsi. Pokud použijeme kvalitní superplastifikátory na bázi naftalenu, nedojde k napěnění betonové

směsi. Naftalenové ztekucovače je možné dávkovat ve více krocích, tj. celkovou dávku můžeme rozdělit a část dávkovat při míchání betonové směsi v míchacím zařízení a část při dopravě betonové směsi nebo těsně před ukládáním betonové směsi, čímž lze poměrně dlouho udržet betonovou směs o vhodné konzistenci (Vetchý 2015).

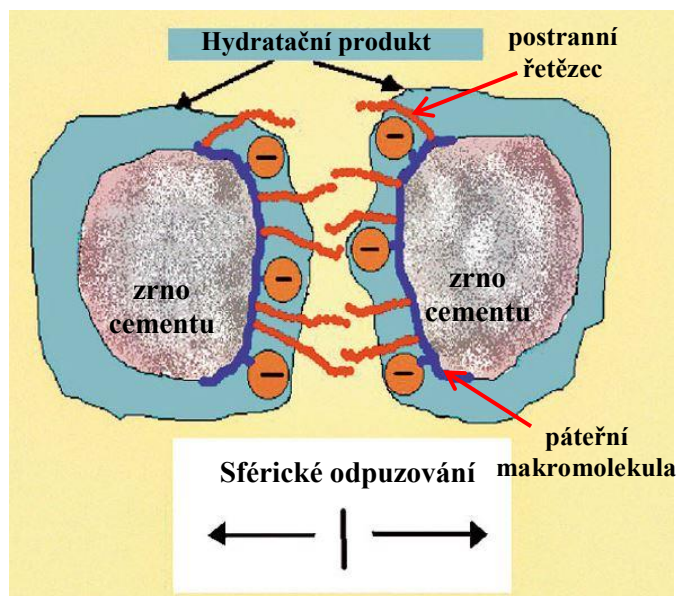
Superplastifikátory na bázi PMS

Superplastifikační přísady na bázi melaminu jsou po chemické stránce sulfonované melaminformaldehydové pryskyřice. Ztekucovače mohou být ve formě pevné (prášek) i kapalné (tekutina). Kapalná forma této přísady je vazká bezbarvá žlutavá kapalina. Prášková forma je bílý prášek (Vetchý 2015). Nelze u SP na bázi polykondenzátu sulfonovaného melaminu s formaldehydem (PMS) vzhledem k jejich struktuře počítat s výrazným smáčecím účinkem. Kapilární aktivita těchto superplastifikátorů je zanedbatelná, a tudíž nemají skoro žádný provzdušňovací účinek (Svoboda 2008). Stejně jako u předchozího typu SP na bázi PNS, tak i u těchto umožňuje absence sacharidů jejich používání ve větších dávkách a tím lze snížit vodní součinitel pod 0,3 (Šiler 2009). Způsobují až 30% úsporu záměsové vody (Vetchý 2015).

PCL – Polykarboxyláty

Patří mezi nejvýznamnější superplastifikátory, které nahrazují předchozí přísady se sulfoskupinami a jsou neúčinnějšími plastifikačními přísadami. Často bývají označovány jako hyperplastifikátory nebo superplastifikátory nové generace. Superplastifikátory polykarboxylátového typu jsou syntetizované tak, aby se dosáhlo zvýšeného prostorového efektu rozvětvených molekul upravením pobočného řetězce, který u polykarboxylátů rozhoduje. Aplikace těchto plastifikátorů je v množství odpovídající desetinám procent z hmotnosti cementu (Zajíček 2008). Polykarboxyláty umožňují snížit dávku záměsové vody i o více než 30 %. S použitím těchto superplastifikátorů je možné vyrobit speciální samozhutnitelné, vysokopevnostní nebo vysokohodnotné betony (Ščučka & Martinec 2013).

Principem plastifikátoru na bázi polykarboxylátů, jejichž hlavní řetězec nese záporný náboj, který je vázaný na zrna cementu s postranními prostorovými elektrickými zápornými řetězci, je pohyb (rotace) postranních řetězců, které svým pohybem zabraňují shlukování cementových zrn. Při fungování polykarboxylátového plastifikátoru (Obr. 13) je zásadní pohyb postranních řetězců, které jsou delší než v případě přísad na bázi sulfonátů, proto trvá delší čas, než hydratační produkty zcela eliminují plastifikační účinek (Zajíček 2008).



Obr. 13: Funkce superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů (Zajíček 2008).

Výhody polykarboxylátových (super)plastifikátorů oproti sulfonovaným:

- lepší kompatibilita v kombinaci s různými druhy cementů,
- použití v menším množství, neboť jsou účinnější,
- vlastnosti směsi se zde upravují mnohem dříve než u sulfonovaných polykondenzátů,
- u polykarboxylátových plastifikátorů se nevyskytuje zakázaný formaldehyd,
- polykarboxyláty mají flexibilní strukturu, která umožňuje různé modifikace (Jedla 2010)
- účinnost těchto superplastifikátorů roste s jejich molekulární hmotností (Janowska-Renkas 2015).

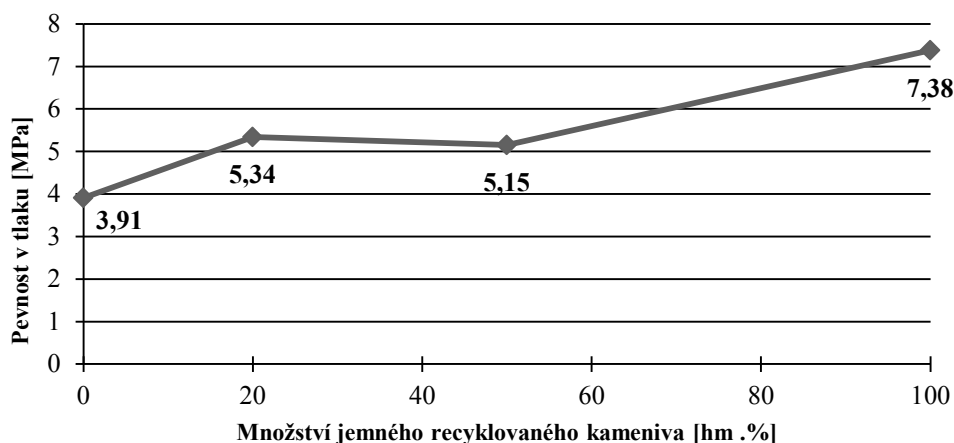
2.3 Cementové směsi s využitím jemně mletého recyklovaného betonu

Nyní se zaměřím na použití recyklovaného jemného kameniva, protože tato frakce bývá dosti opomíjena a zastíněna využitím hrubého kameniva. Danému tématu se tak věnuje daleko méně odborníků než použití recyklátu jako hrubého kameniva. Hlavním důvodem využití recyklovaného kameniva jako písku je snížení těžby písku z říčních koryt. Jemná frakce recyklovaného betonového kameniva je v podstatě složena z malty a ztvrdlé cementové pasty neboli cementového kamene. Nevýhodou této jemné frakce jsou její vysoké požadavky na záměsovou vodu, které ztěžují využití jemného recyklovaného kameniva při výrobě betonů a malt oproti využití hrubého recyklovaného kameniva (Zhao et al. 2015).

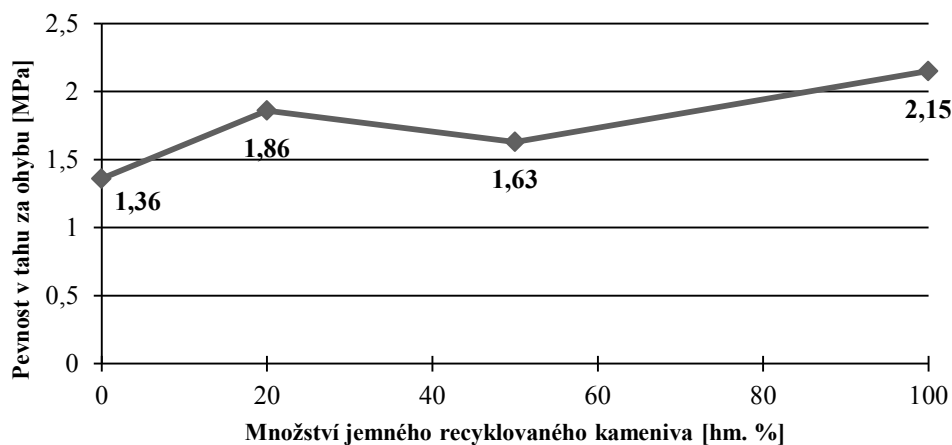
Evangelista a de Brito (2010) se snažili najít uplatnění jemného kameniva pro konstrukční beton. Zkoumali trvanlivost dílců, která je závislá na mikrostruktuře, a tím pádem může dojít k nadměrnému pronikání chloridů, které narušují chemickou stabilitu betonové směsi. Zásadní vliv na trvanlivost konstrukčního betonu má ale karbonatace, která je ovlivněna množstvím jemného recyklovaného kameniva ve směsi. Byly proto vyrobeny vzorky o stejném složení a stejné křivce zrnitosti, ovšem s rozdílnou mírou substituce jemného recyklovaného kameniva (0, 30 a 100 hm. %). Zkoumána byla nasákavost, kapilarita, pronikání chloridů a CO₂. Nasákavost betonu se při 100 hm. % nahrazení jemného betonového kameniva zvýšila o 46 %. Absorpce vody roste s množstvím recyklovaného jemného betonového kameniva. Důvodem je pórovitá struktura kameniva, která ovlivňuje betonovou matici. Při měření pronikání chloridů bylo zjištěno, že beton s plnou hmotnostní náhradou recyklovaného kameniva vykazoval nárůst pronikání chloridů o 34 % oproti betonu s pouze přírodním kamenivem. Hloubka pronikání CO₂ se u vzorků s 30 hm. % recyklovaného kameniva zvýšila o 40 % a u vzorků se 100% hmotnostní náhradou jemného recyklovaného kameniva bylo zvýšení dokonce o 110 % (Evangelista & de Brito 2010).

Catarina Neno a kol. (2014) se zabývala nahrazením přírodního písku při výrobě malt stejně velkými částicemi recyklovaného kameniva. Složení kompozitního materiálu na bázi cementu bylo následující: cement CEM II/B-L 32,5 N, písek z řeky Tagus (Španělsko), jemné drcené betonové kamenivo a voda. Odpadní betonové kamenivo bylo získáno drcením z betonových tvárnic (beton C 30/37). Při výrobě vzorků s hmotnostní náhradou jemného recyklovaného betonového kameniva 0, 20, 50 a 100 % byl použit různý vodní součinitel ($v/c = 1,21$ až $1,31$) z důvodu stejné zpracovatelnosti všech směsí. Na vzorcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a tvarové stability (smrštění). Výsledky zkoušek vzorků na pevnost v tlaku (Obr. 14) a v tahu za ohybu (Obr. 15) ukázaly

rostoucí trend oproti vzorkům referenčním (s 0 hm. % jemného recyklovaného kameniva). Důsledkem dosažených větších pevností může být ostřejší povrch recyklovaného kameniva, který zajišťuje lepší soudržnost, nebo reakce doposud nezhydratovaných cementových zrn, která pak reagují při styku s vodou. Údaje o smrštění nepřinesly žádné nové poznatky. Vzorky s jemným recyklovaným kamenivem se smršťují více než vzorky referenční (Neno et al. 2014).



Obr. 14: Pevnost malty v tlaku vzhledem k množství recyklovaného kameniva (Neno et al. 2014).



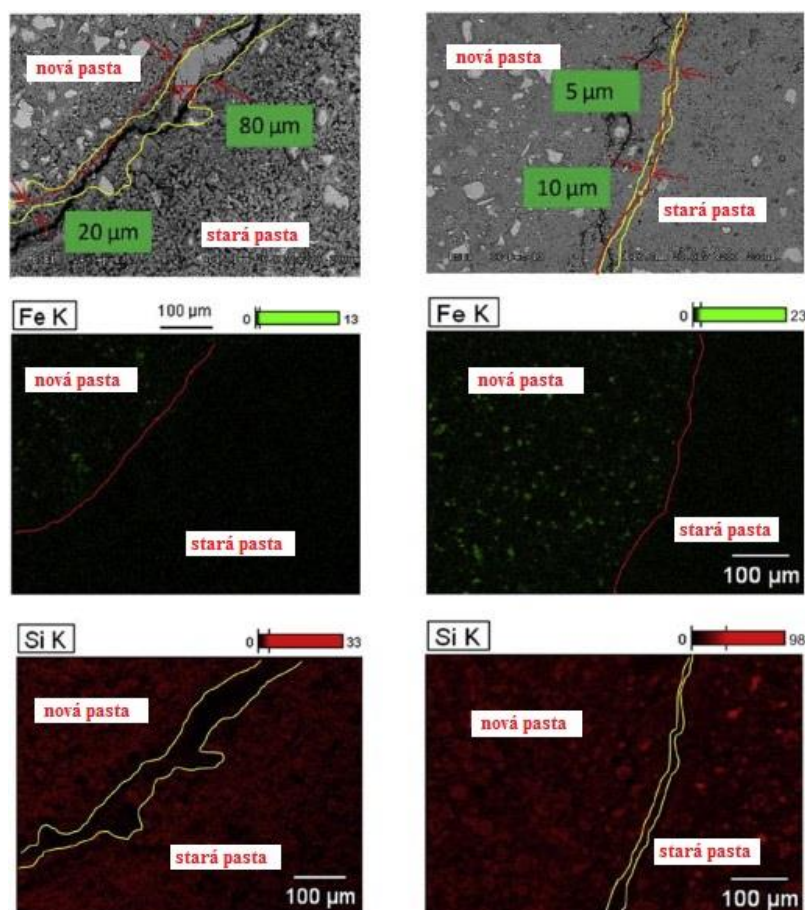
Obr. 15: Pevnost malty v tahu za ohybu vzhledem k množství rec. kameniva (Neno et al. 2014).

Výzkumem zdících malt se také zabýval Ledesma a kol. (2014). Pracoval s pětici směsí, které se lišily pouze v hmotnostním poměru nahrazeného přírodního písku jemným recyklovaným betonem (0, 5, 10, 20 a 40 %). Obě složky jemného kameniva byly o velikosti zrna max. 4 mm. Směsi byly vyrobeny o shodné konzistenci. Sjednocujícím parametrem byl rozliv (175 ± 10 mm), naopak vodní součinitel byl různý. U malt bylo prováděno měření

objemové hmotnosti a testování na pevnost v tahu za ohybu a v tlaku, smrštění, přilnavosti k povrchu, absorpce vody a paropropustnost. Výsledky ukázaly, že malta se 40 hm. % náhrady jemného recyklovaného betonu je použitelná pro výrobu zdící malty. Po dobu 180 dní stáří malt byla také sledována jejich mikrostruktura. Ledesma a kol. zjistil negativní vliv jemného recyklovaného kameniva ve spojení se zkracováním doby zpracovatelnosti směsi. Jemné recyklované kamenivo snižuje čas, během kterého si čerstvá malta zachovává odpovídající zpracovatelnost. Pro lepší zpracovatelnost malt s užitím jemného recyklovaného kameniva bude nutná další studie, kde bude zkoumán vliv přípravků na oddálení tuhnutí směsi (Ledesma et al. 2014). Zpracovatelností malt s recyklovanými materiály se zabývalo malé množství odborníků. Ve své práci se o ní zmiňuje např. J. R. Jiménez a kol. (2013).

Zhao a kol. (2015) se jako předchozí odborníci zaměřil na mechanické vlastnosti malt ovlivněné různým množstvím nahrazeného jemného recyklovaného kameniva. Cílem byla studie vlivu rozdílně vodou nasyceného jemného recyklovaného kameniva na mechanické vlastnosti malt. Byly analyzovány vlastnosti malt včetně zkoušky čerstvé směsi sednutí kužele, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a mikrostruktura mezifázové přechodové zóny (ITZ). Použité materiály byly následující: bílý cement CEM I 52,5 „superblanc“, vápenný přírodní písek z lomu Tournai (Belgie), recyklovaný betonový písek frakce 0/5mm a voda. Vyrobeny byly tři velké skupiny vzorků. První skupina byla vyrobena pro účely zkoušek sednutí kužele, mechanických vlastností a pro analýzu mikrostruktury mezifázové přechodové zóny. Směs pro první skupinu vzorků obsahovala 100 hm. % vysušeného či vodou nasyceného recyklovaného nebo přírodního písku jako plniva, cement a vodu. Vzorky s recyklovaným kamenivem byly zhotoveny ve více variantách s odlišnými vodními součiniteli z důvodu zpracovatelnosti směsi. Druhá skupina vzorků byla vyrobena s různým poměrným nahrazením (0, 10, 20, 30, 50 a 100 hm. %) přírodního kameniva kamenivem recyklovaným. Na rozdíl od první skupiny byl zde užit jednotný vodní součinitel $v/c = 0,5$. Vzorky druhé skupiny byly vytvořeny taktéž pro testování mechanických vlastností. Ve třetí skupině vzorků byly vyrobeny vzorky ze směsi vždy o jedné nahrazené frakci recyklovaným betonovým pískem, ostatní zbylé frakce byly z přírodního písku. Pro jednotlivé směsi byly použity frakce 0/0,63; 0,63/1,25; 1,25/2,5 a 2,5/5,0 mm recyklovaného a přírodního kameniva. Třetí skupina vzorků byla určena na test mechanických vlastností, kde byl zkoumán vliv jednotlivých recyklovaných frakcí kameniva na výsledné pevnosti. Sednutí kužele při stejném vodním součiniteli bylo větší u směsi s vysušeným pískem oproti směsím s pískem namočeným předem ve vodě. Z mnoha předchozích studií a výzkumů bylo potvrzeno, že pevnost v tlaku i v tahu za ohybu byla menší u vzorků s recyklovaným kamenivem než s kamenivem přírodním. Pevnost v tahu za ohybu

u malt s nasyceným nebo vysušeným kamenivem je téměř stejná (cca $8,25 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$). Naopak pevnost malt v tlaku je vždy větší u směsi s vysušeným kamenivem než s kamenivem nasyceným. Ukázalo se, že frakce $0/0,63 \text{ mm}$ recyklovaného kameniva má horší vliv na mechanické vlastnosti a nasákavost malt. Mikrostruktura byla zkoumána pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM), který pracuje na principu odrazu elektronů na rovné leštěné ploše. Mikroskopem byly pořízeny snímky rastrovací elektronové mikroskopie vzorků s nahrazeným nasyceným a vysušeným kamenivem. Na snímcích byla podrobně zanalyzována mezifázová přechodová zóna mezi novou a starou cementovou pastou neboli recyklovaným pískem. Pro přesné určení mezifázové přechodové zóny bylo provedeno také mapování energo disperzním spektrometrem (EDS) křemíku (Si) a železa (Fe), viz Obr. 16.



Obr. 16: Elementární analýza EDS výsledků, vlevo směs s vodou nasyceným kamenivem a vpravo směs s kamenivem vysušeným (Zhao et al. 2015).

V oblasti recyklovaného betonového kameniva (staré pasty) nevidíme z daných prostředních fotografií na Obr. 16 skoro žádnou stopu železa, oproti tomu v nové cementové pastě železo spatřit lze (znázorněno zelenou barvou). Výskyt iontů železa v nové cementové pastě je dán shlukováním těchto iontů poblíž C_4AF (tetrakalcium aluminoférit), jednoho z hlavních

slínkových minerálů, při hydrataci cementu. Mapování iontů železa umožnilo určení mezifázové přechodové oblasti (znázorněno červenou křivkou na Obr. 16), ale toto EDS mapování železných iontů nelze použít pro stanovení šířky ITZ. Šířka mezifázové přechodové zóny byla určena mapováním energo disperzním spektrometrem koncentrace křemíku (Si), kde právě přechodová zóna je definovaná jako místo s malou koncentrací křemíku v blízkosti zóny s malým obsahem železa (znázorněno žlutou křivkou). Rozdíl mezi přechodovými oblastmi směsi s nasyceným a vysušeným kamenivem byl především v jejich šířkách. U směsi s vodou nasyceným kamenivem byla změřena šířka mezifázové přechodové zóny v rozmezí od 20 do 80 μm . Na rozdíl od směsi s vodou nasyceným kamenivem je šířka mezifázové přechodové zóny směsi s vysušeným kamenivem podstatně tenčí, 5 až 10 μm . Šíře mezifázové přechodové zóny je tedy ovlivněna stavem nasycení cementové pasty v jemném recyklovaném betonovém kamenivu (Zhao et al. 2015).

Vlivu předem namočeného kameniva na mechanické vlastnosti malt se věnoval také Cuenca-Moyano a kol. (2014). Studie hodnotila vliv přidávání jemného recyklovaného kameniva do malty pro zdění bez zvýšení vodního součinitele v/c . Přídavek recyklovaného jemného kameniva má negativní vliv na konzistenci a efektivní vodní součinitel, jelikož jemné recyklované kamenivo vstřebává část záměsové vody. Při 75 hm. % nahrazení jemného recyklovaného kameniva se stala směs příliš vysušenou a velmi špatně zpracovatelnou. Jakmile se zvýšil vodní součinitel z důvodu lepší zpracovatelnosti, došlo k negativnímu ovlivnění dalších vlastností. Z tohoto důvodu byla studie zaměřena na přidávání recyklovaného kameniva, které je předem namočeno, aby nedocházelo k vysušování a zmenšování efektivního vodního součinitele. Výsledky potvrdily zvýšení pevností v tlaku a v ohybu u vzorků s namočeným kamenivem. Namáčení jemného recyklovaného kameniva přispívá k menší nasákavosti a umožňuje tak zlepšení recyklace betonového kameniva (Cuenca-Moyano et al. 2014).

2.4 Cementové kompozity s využitím recyklovaného betonu a přísad do betonu

Použití plastifikátorů nebo superplastifikátorů je obecně v praxi spojeno s vysokohodnotnými betony (High Performance Concrete, HPC), proto se v následující kapitole zaměřím na cementové kompozity, kde je kromě pojiva a vody použit recyklovaný beton v různých frakcích a (super)plastifikační přísady.

Vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem (hrubým i jemným) jsou experimentálně potvrzeny, že i při 100% náhradě přírodního kameniva dostáváme přijatelné hodnoty modulu pružnosti, pevnosti v tlaku, tahu za ohybu atd. Nicméně velmi málo studií je zaměřeno na vysokohodnotné betony s použitím recyklovaného betonového kameniva (Vinay Kumar et al. 2017).

Recyklované betonové kamenivo a plastifikační přísady

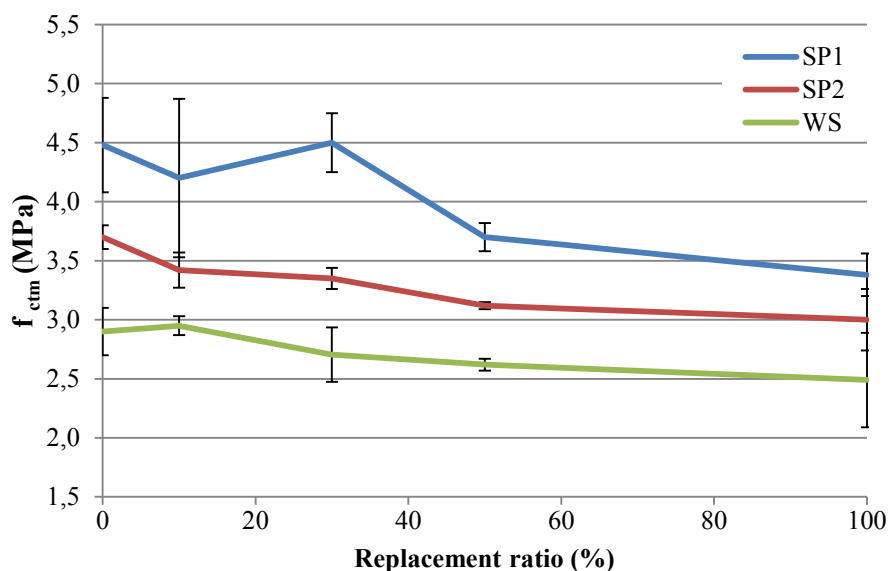
Použití recyklovaného kameniva v HPC souvisí i s použitím plastifikačních přísad, které jsou pro HPC nezbytné. Ajdukiewicz a Kliszcewicz ve svém experimentu studovali vlastnosti směsi HPC se 100% hmotnostním nahrazením přírodního kameniva kamenivem recyklovaným z demolice konstrukce z vysokohodnotného betonu. Zjistili, že výsledné vlastnosti jsou závislé na vstupních parametrech recyklovaného betonového kameniva, zvláště pak o jakou třídu betonu se jednalo. Dosažené pevnosti v tlaku směsi HPC s recyklovaným kamenivem se pohybovaly kolem 80 MPa, kdežto beton, ze kterého pocházelo recyklované kamenivo, byl o pevnosti přibližně 60 MPa. Při testu mrazuvzdornosti měl HPC s recyklovaným betonovým kamenivem větší trvanlivost než referenční směs s kamenivem přírodním (Ajdukiewicz & Kliszcewicz 2002).

Jiný velmi podobný výzkum posuzoval vliv vodního součinitele na výsledné mechanické vlastnosti HPC s recyklovaným betonovým kamenivem z důvodu vyšších požadavků recyklovaného kameniva na záměsovou vodu. Spolu s použitím plastifikátoru bylo snahou najít optimální konzistenci směsi s nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Ve srovnání s normálním (referenčním) HPC byl potvrzen pokles tlakové pevnosti vzorků s recyklovaným betonovým kamenivem o cca 20 až 30 % (Tu et al. 2006).

V. Kumar a kol. ve směsi použil cement, hrubé a jemné recyklované a přírodní kamenivo, křemičitý úlet a plastifikátor na bázi polykarboxylátů. Vodní součinitel směsí byl jednotný $v/c = 0,32$. Plastifikátor byl použit v dávkování 0,64 a 1,0 hm. % z hmotnosti cementu. V. Kumar oproti předchozím nahrazoval přírodní kamenivo pouze z 20 %. Šlo o náhrady pouze

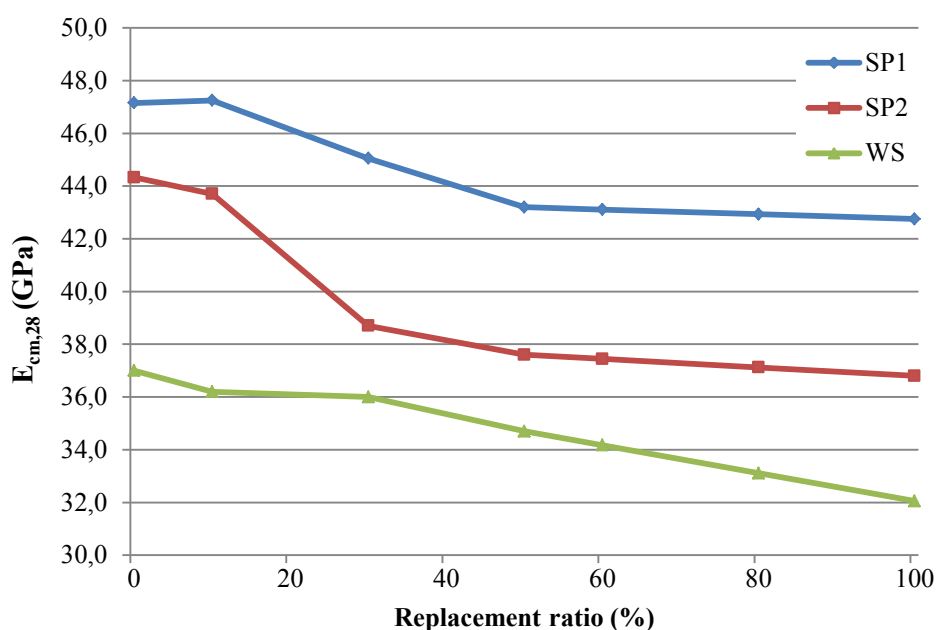
hrubé a pouze jemné frakce a následně i frakcí obou. Směs s jemným recyklovaným kamenivem ukázala redukcí zpracovatelnosti, což se projevilo ve vyšší dávce plastifikátoru pro požadovaný rozliv směsi $170 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. Výsledky ukázaly nepatrný pokles pevnosti v tlaku u směsi s 20 hm. % hrubé frakce recyklovaného kameniva. Naopak nárůst pevnosti v tlaku (cca 18 %) byl zaznamenán u vzorků s 20 hm. % jemného recyklovaného kameniva. Je to dáno zvýšenými absorpčními vlastnostmi jemného recyklovaného kameniva na vodu, čímž došlo ke snížení vodního součinitele a následně k nárůstu pevnosti (Vinay Kumar et al. 2017).

P. Pereira (2012) ve svém experimentu použil dva druhy plastifikátorů, jeden s chemickým základem lignosulfonátu (SP1) a druhý na bázi modifikovaných polykarboxylátů (SP2). Dávkování plastifikátoru představovalo 1,0 hm. % z hmotnosti cementu. Vodní součinitel byl stanoven pro zpracovatelnost směsi ze zkoušky sednutí kužele $120 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, pouze u směsi s plastifikátorem byl v/c nižší, aby byla zachována stejná zpracovatelnost (konzistence). Byly vyrobeny betonové směsi s různým procentuálním hmotnostním zastoupením jemného recyklovaného kameniva (10, 30, 50 a 100 hm. % jemného kameniva), s každým typem plastifikátoru (SP1 a SP2) a také směsi referenční (bez plastifikátoru – WS). Výsledky ukázaly, že použití plastifikátoru (SP1 a SP2) eliminuje negativní vliv recyklovaného betonového kameniva na ohybové pevnosti, ba dokonce oproti směsi referenční (WS) výsledné hodnoty zvyšuje (Obr. 17).



Obr. 17: Pevnost v tahu za ohybu s ohledem na poměr množství jemného recyklovaného a přírodního kameniva (Pereira et al. 2012).

Významný vliv plastifikátoru můžeme pozorovat na výsledcích modulu pružnosti (Obr. 18), kde nejlepších výsledků dosahují směsi s použitím polykarboxylátového plastifikátoru. Trend hodnot ve vztahu k rostoucímu množství recyklovaného kameniva je obecně klesající, ale ve srovnání se vzorky bez plastifikační přísady je dosaženo hodnot vždy vyšších. Největší pokles lze pozorovat u směsi s použitým plastifikátorem na lignosulfonátovém chemickém základu. Plastifikátor lignosulfonátový (SP1) tak ovlivňuje vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem daleko více než plastifikátor polykarboxylátový (SP2). Závěrem můžeme říci, že daleko vhodnější a příznivější je použití plastifikátoru na polykarboxylátové bázi.



Obr. 18: Modul pružnosti ve stáří 28 dní (Pereira, Evangelista & de Brito 2012).

Stejný beton s plastifikátorem obecně vykazuje lepší mechanické vlastnosti než referenční směsi bez přísady. Z tohoto důvodu se můžeme domnívat, že mechanické vlastnosti betonu s jemným recyklovaným betonovým kamenivem mohou být tak dobré jako u běžného betonu, pokud použijeme plastifikační přísady ke snížení vodního součinitele (v/c) (Pereira, Evangelista & de Brito 2012).

Téma tohoto zaměření je ve světě poměrně rozšířené a zabývá se jím poměrně velké množství odborníků, kteří převážně zkoumají vliv různých plastifikačních přísad na redukci vodního součinitele (zpracovatelnost) a výsledné mechanicko-fyzikální vlastnosti betonů s použitím recyklovaného betonu (jemné a hrubé kamenivo) (Barbudo et al. 2013), (Matias et al. 2013), (Pereira, Evangelista & De Brito 2012), (Bravo et al. 2017).

Jemně mletý recyklovaný beton a plastifikační přísady či urychlovače

Použití jemně mletého recyklovaného betonu v kombinaci s přísadami do betonu (plastifikátor, urychlovače tuhnutí a tvrdnutí) není doposud prozkoumáno. Jedná se o téma, kterému se prakticky nikdo nevěnuje a je zastíněno použitím recyklovaného betonu jako jemného či hrubého kameniva, o kterých se v různých experimentech dočteme daleko častěji (viz kapitola 2.4.1). Velmi jemné frakci recyklovaného betonu se obecně ve svých studiích věnuje poměrně málo lidí (Neno et al. 2014), (Topič et al. 2017), natož potom ještě v kombinaci s přísadami pomáhající např. s nárůstem tlakových pevností. Neprozkoumané a nepublikované toto téma bylo i pro mě jedním z faktorů, proč se zaměřit na použití jemně mletého recyklovaného betonu, který slouží svým způsobem jako náhrada cementu a na přidání přísad pro zvýšení pevností. Přísady jsem zvolil z důvodu úbytku pevnosti (v tlaku i tahu za ohybu) materiálu s nahrazeným recyklovaným betonem. Přísady slouží k tomu, aby se tlakové pevnosti zachovaly na určitých hodnotách, ale zároveň došlo k co největší míře nahrazení cementu jemně mletým recyklovaným betonem.

3 Cíle diplomové práce

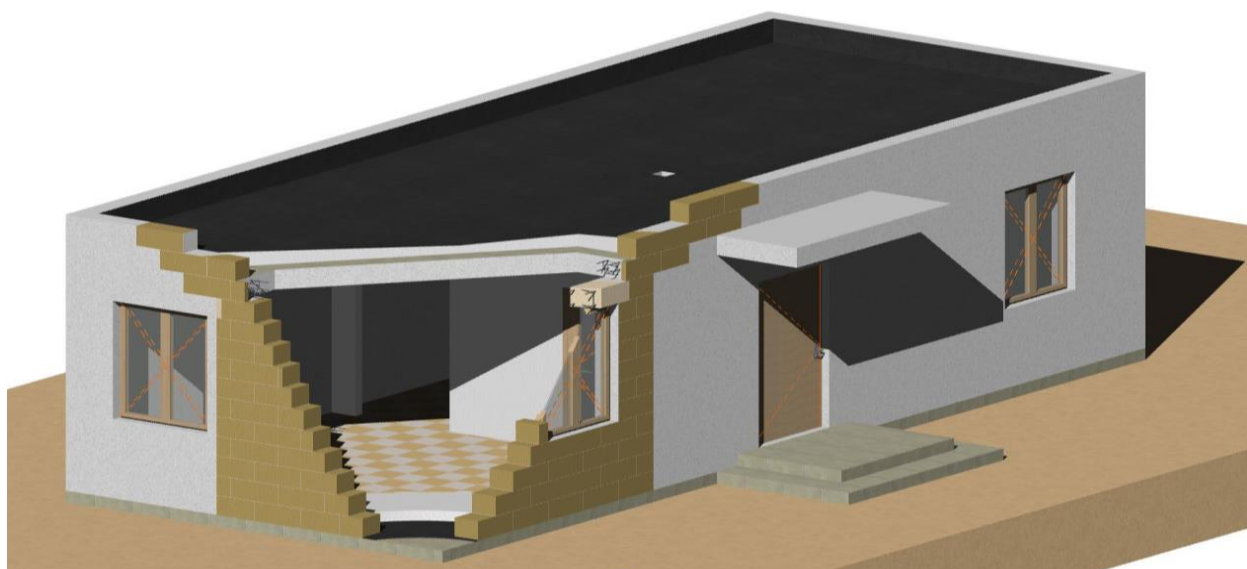
Jedním z prvních cílů práce je seznámení s danou problematikou a uvedení do řešeného tématu pomocí úvodní rešerše, která obecně rozebírá použité materiály, jejich výrobu a v neposlední řadě experimenty ostatních odborníků, kteří řešili podobné nebo příbuzné téma. Cílem práce je návaznost na bakalářskou práci, kde byl navržen jednopodlažní rodinný dům. Na „vzorový“ jednopodlažní rodinný dům byl sestaven zjednodušený statický výpočet, jehož konečným výstupem byla požadovaná pevnost v tlaku zdicího prvku pro obvodové zdivo. Na základě výsledné minimální požadované pevnosti v tlaku pro zdicí prvek byl určen vhodný vzorek cementové malty, jejíž směs se stala základní maticí pro další experiment.

Hlavním cílem diplomové práce je nalezení ideálního složení kompozitní směsi, která bude obsahovat co největší procentuální nahrazení cementu jemně mletým recyklovaným betonem za přispění přidávaných přísad do betonu pro rychlý nárůst počátečních pevností s ohledem na výsledné tlakové pevnosti. Vybraná směs na základě provedených destruktivních i nedestruktivních zkoušek by měla vycházet ze základní matrice z bakalářské práce, zde být modifikována přísadami a stát se betonovou směsí pro výrobu betonového zdicího bloku s budoucím vylehčením. Cílem je návrh samotné matrice bez použití kameniva, neboť kamenivo je prakticky vždy pevnější složkou než cementová směs, která ho obaluje/obklopuje.

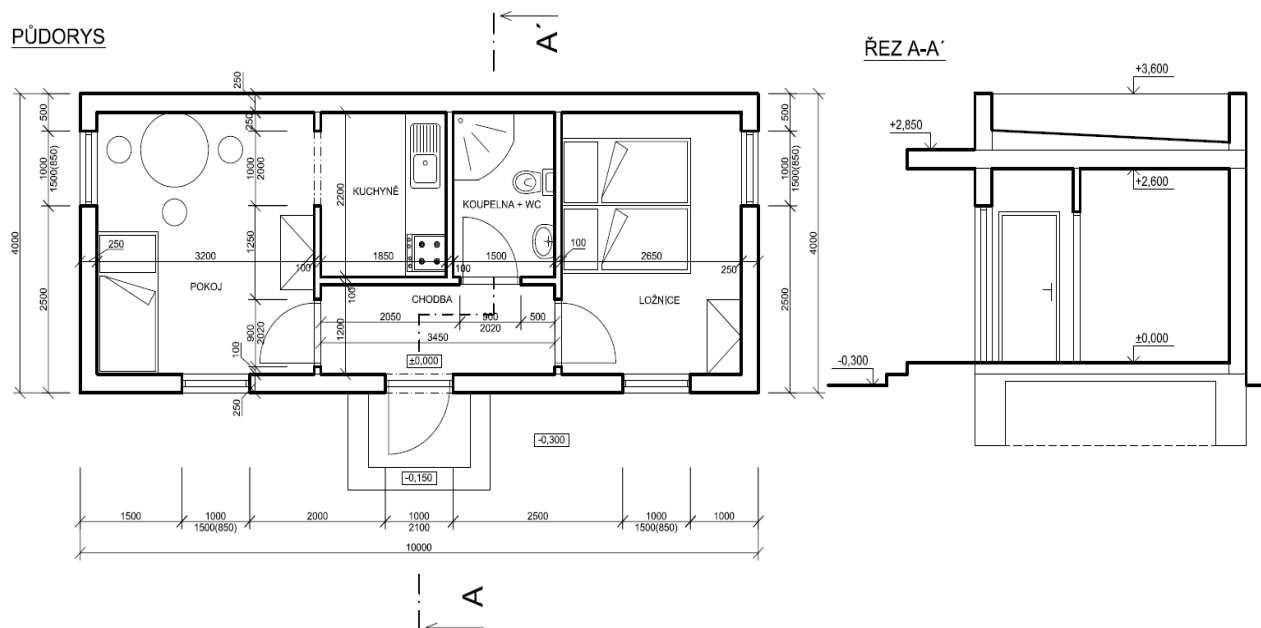
Základem experimentu je návrh ucelené řady jednotlivých směsí s použitím a bez použití jemně mletého recyklovaného betonu s různými přísadami pro urychlení tuhnutí a tvrdnutí a se superplastifikátory. Vzorky bez přidání recyklátu, tedy se samotným cementem, slouží jako referenční, pro účely porovnání vlivu přísad na recyklovaný beton a výsledné mechanické vlastnosti jednotlivých směsí. Požadavky na kompozitní směs jsou tedy dány tlakovou pevností, smrštěním a modulem pružnosti. Důležitým parametrem, na který jsem při návrhu směsi a výrobě vzorků kladl důraz, byla vždy stejná konzistence a zpracovatelnost směsí se stejnými druhy přísad, aby bylo možné hodnotit míru účinnosti přísad za stejného množství vody. Směsi se superplastifikátorem byly pomocí snížení vodního součinitele upraveny na stejné rozlivy jako směsi referenční, viz kapitola 4.1. Hlavní snahou v prováděném experimentu je nalezení pomyslného průsečíku mezi maximální procentuální mírou náhrady cementu jemně mletým recyklovaným betonem (za přispění přísad) a dostatečnou tlakovou pevností, která vytvoří „tlakovou“ rezervu umožňující v budoucím experimentu vylehčení směsi. Nalezení ideálního procenta náhrady cementu recyklátem bylo rozhodnuto na základě předchozích experimentů (Hrůza 2016), (Topič et al. 2017), protože práce je zaměřena především na vliv přísad a jejich účinnost společně s recyklovaným betonem.

4 Praktická část

Praktická část práce navazuje na mou práci bakalářskou, kde jsem výpočtem určoval největší zatížení betonového bloku v obvodovém nosném zdivu (v patě zdiva) jednopodlažního, mnou navrženého „vzorového“ objektu (Obr. 19 a Obr. 20) a na jeho základě jsem vybral navrženou směs s největším hm. % nahrazením cementu jemně mletým recyklovaným betonem splňujícím parametry důležité pro únosnost zdiva. Vzorový nízkonákladový přízemní objekt je obdélníkového půdorysu $4,0 \times 10,0$ m (Obr. 20) s plochou střechou o jednoduché dispozici a celkové podlahové ploše $32,0$ m². V domě se nachází vstupní chodba, kuchyňský kout, obývací pokoj, koupelna s WC a ložnice. Při návrhu bylo počítáno s obýváním maximálně 4 dospělých osob. Jedná se pouze o studii. Jelikož tento rozsah projektu sloužící k dalšímu postupu v hledání minimální pevnosti zdícího prvku, byl plně postačující.



Obr. 19: Vizualizace vzorového objektu (Hrůza 2016).



Obr. 20: Půdorys (studie) a schématický řez vzorového objektu (Hrůza 2016).

Závěrem předešlého výzkumu jakožto mé bakalářské práce bylo provedení výběru ideální směsi z návrhu složení směsi v ucelené řadě s 0, 33, 67 a 100 hm. % jemně mletého recyklovaného betonu, kde při výrobě směsi byl zvolen různý vodní součinitel pro splnění podmínky stejné konzistence bez použití plastifikátoru. Bylo ověřeno, že s rostoucím množstvím jemně mletého recyklovaného betonu ve směsi klesala objemová hmotnost. Ukázalo se, že vzorky s 33 % recyklátu mají velmi podobnou pevnost v tahu za ohybu a v tlaku jako vzorky bez přidaného recyklátu. Naopak malty se 100% hmotnostním množstvím jemně mletého recyklovaného betonu disponovaly velmi malou soudržností matrice, a proto v některých případech bylo jejich testování nemožné. Provedený návrh nízkonákladového vzorového jednopodlažního objektu sloužil jako podklad pro návrh zjednodušeného statického výpočtu. V bakalářské práci jsem za pomoci sestaveného zjednodušeného statického výpočtu dle ČSN EN 1996-1-1 došel k minimální tlakové pevnosti zdicího prvku 1,4 MPa. Zmínit ovšem musím, že se jedná o pevnost počítanou na prvek, který je po vzoru plné cihly, tedy bez jakýchkoliv dutin či žeber, proto je tato pevnost brána jako opravdu hodně limitní, neboť plná tvárnice z tohoto materiálu by byla neekonomická z pohledu spotřebovaného množství materiálu, ale také například z pohledu tepelné techniky budov. V mé práci jsem se zaměřil na vylepšení základní matrice z bakalářské práce, protože lze za pomoci přísad získat větší pevnosti v tlaku při větší náhradě cementu recyklátem. Minimální požadovaná (spočítaná) pevnost byla brána poněkud rezervovaně, protože cílem bylo nalézt takovou matici, která umožní její vylehčení (bude mít tlakovou rezervu) nebo bude schopna přenášet větší zatížení při extrémnějších podmínkách.

Smyslem praktické části a v podstatě práce samotné je nalezení kompozitní matrice, která navazuje na výsledky bakalářské práce, kde byla s ohledem na minimální tlakovou pevnost zdicího prvku vybrána „základní“ matrice, sloužící pro rozšíření experimentu a samotné modifikace směsi. Důvodem modifikace je plánovaná další úprava a to již zmíněné vylehčení, proto pro větší tlakovou pevnost vzorků z důvodu budoucího vylehčení a experimentálního zjištění chování chemických přísad ve směsi s recyklovaným betonem byly použity běžně na trhu dostupné přísady do betonů. Nalezená výsledná matrice má sloužit jako základní složka tvořící obalový „cementový“ tmel případného kameniva pro výrobu betonové tvárnice.

V praktické části budou popsány jednotlivé kroky experimentu, opodstatnění úvah, zpracování a prezentace výsledků. Na začátku experimentu byla navržena koncepce a plán experimentálních zkoušek, prováděných na vyrobených vzorcích.

Experiment byl rozdělen celkem do tří fází výroby vzorků a zjišťování vlivu přísad:

1. fáze – orientační zjištění funkčnosti přísad,
2. fáze – průzkumné ověření dob tuhnutí přísad,
3. fáze – hlavní část výroby vzorků s vybranými přísadami na základě předchozích zjištění.

4.1 Použité materiály, výroba vzorků a stanovení rozlivů

Použité materiály

Na výrobu a návrh kompozitních směsí pro všechny fáze experimentu byl použit cement, superplastifikační přísady či urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, jemně mletý recyklovaný beton a voda. Níže postupně definované materiály byly dle návrhu směsí a jednotlivých fází vhodně použity pro výrobu vzorků, která bude detailně popsána vždy v každé fázi.

Cement – CEM I 42,5 R

Jedná se o portlandský cement ze závodu Radotín, od výrobce Českomoravský cement, a. s. Cement obsahuje portlandský slínek z 95 až 100 %, doplňující složky představují 0 až 5 %. Veškeré technické informace jsou zobrazeny v následujících tabulkách (Tab. 3 a Tab. 4).

**Tab. 3: Mechanické a fyzikální vlastnosti cementu CEM I 42,5 R,
převzato z technického listu výrobce.**

<i>Parametr</i>		<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Metoda/ poznámka</i>
<i>Mechanické vlastnosti</i>			
pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16	EN 196-1
	2 dny	30	EN 196-1
	7 dní	49	EN 196-1
	28 dní	60	EN 196-1
pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1
	2 dny	6	EN 196-1
	7 dní	8	EN 196-1
	28 dní	9	EN 196-1
<i>Fyzikální vlastnosti</i>			
počátek tuhnutí [min]		185	EN 196-3
konec tuhnutí [min]		258	EN 196-3
měrný povrch [m ² /kg]		361	EN 196-1, Le Chatelier
Měrná hmotnost [kg/m ³]		3080	EN 196-6
hydratační teplo [J/g]	7 dní	320	EN 196-8

Tab. 4: Chemické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R, převzato z technického listu výrobce.

<i>Parametr</i>		<i>Průměrná hodnota</i>	<i>Metoda/ poznámka</i>
<i>Chemické vlastnosti</i>			
Obsah [%]	CaO	64,9	EN 196-2
	SiO ₂	19,8	EN 196-2
	Al ₂ O ₃	4,2	EN 196-2
	Fe ₂ O ₃	2,6	EN 196-2
	MgO	1,8	EN 196-2
	SO ₃	3,0	EN 196-2
	Cl ⁻	0,052	EN 196-2
	K ₂ O	3,01	EN 196-2
	Na ₂ O	0,16	EN 196-2
Na ₂ O ekvivalent [%]		0,6	EN 196-2
Nerozpustný zbytek [%]		1,2	EN 196-2
Ztráta žíháním [%]		3,1	EN 196-2

Jemně mletý recyklovaný beton

Jemně mletý recyklovaný beton pocházel z betonových odvodňovacích žlabů silnic či železnic, které byly rozemlety na frakci 0/63 mm. Z této frakce byla vyseparována frakce 0/16 mm, která byla upravena pomocí vysokorychlostního mletí firmou Lavaris s.r.o. Výsledná velikost zrn byla < 0,25 mm. Jemnost finálně zpracovaného recyklátu připraveného k použití se blížila jemnosti cementu, který má měrný povrch 361 m²/kg.

Přísady do betonu

Přísady do betonu jsou zastoupeny přísadami ze tří skupin a to superplastifikátory (ozn. P), urychlovači tuhnutí a tvrdnutí (ozn. U) a poslední skupinou je kombinace urychlovače a plastifikátoru (UP). Jedná se o běžně dostupné komerční výrobky s bezproblémovým získáním na trhu chemických přísad do betonů v ČR. Použité přísady v mém experimentu jsou vypsány v tabulce (Tab. 5), kde je uvedeno, na jaké bázi jsou přísady založeny a také jejich běžné dávkování. Označení přísady písmenem P znamená, že jde o superplastifikátor, v případě označení U se jedná o urychlovač tuhnutí a tvrdnutí a UP je kombinací, čili urychlovač

a plastifikátor. Údaje o běžném dávkování jsou převzaty z technických listů výrobce. Jedná se o doporučené (obvyklé) dávkování vztaženo na hmotnost cementu. Otázkou zůstává, zda se přísady použité ve směsích s recyklovaným betonem, budou chovat stejně jako v případě směsí pouze s cementem.

Tab. 5: Přehled použitých komerčních běžně dostupných přísad do betonu.

Ozn.	Na bázi	Běžné dávkování [hm. % z cementu]	Hustota [kg/m ³]	pH [-]
P1	Polykarboxylátů	0,4 – 1,3	1080 ± 20	6,0 ± 1,0
P2	Modifikovaných polykarboxylátů	0,8	1055 ± 10	7,5 ± 2,0
P3	Modifikovaných polykarboxylátů	1,0	1060 ± 10	6,5 ± 2,0
U1	Bezchloridová kapalina	1,0 – 3,0	1450 ± 30	7,5 ± 2,0
U2	Rozpustných min. solí a organických látek	1,5	1300 ± 10	9,5 ± 1,0
U3	Bezchloridová kapalina	1,5	1450 ± 10	6,0 ± 1,0
UP	Výrobce neudává	0,7 – 1,5	1250 ± 30	8,0 – 11,5

Přísada P1 je silně vodoredukující/plastifikační přísada s maximálním obsahem chloridů do 0,1 % hm. Superplastifikátor P2 je zvláště určen pro betony vyžadující velmi vysoké počáteční i konečné pevnosti. Jeho použití je u těžké prefabrikace, vysokopevnostních betonů, předpjatých betonů atd. Přísada označena P3 je vysoce účinný superplastifikátor na nejnovější bázi modifikovaných polykarboxylátů a je zejména určen pro betony s požadavky na vysoké krátkodobé i konečné pevnosti v tlaku. Urychlovač U1 nezhoršuje zpracovatelnost čerstvé směsi, mírně snižuje dávku záměsové vody. Zvyšuje počáteční i konečné pevnosti betonu. Přísada U2 je složena z rozpustných minerálních solí a organických látek, jejichž kombinovaný vliv působí na urychlování tuhnutí a tvrdnutí betonu. Posledním použitým urychlovačem je přísada U3, která neobsahuje chloridy usnadňující počáteční hydrataci cementu. Označení pro přísadu UP znamená, že se jedná o sloučení urychlovače a plastifikátoru v jednom, ovšem nejedná se o kombinaci předchozích přísad. V tomto případě mluvíme o běžně dostupném již hotovém

výrobku. Přísada UP snižuje spotřebu vody, dodává plasticitu, zlepšuje zpracovatelnost a urychluje tuhnutí. Bohužel výrobce neposkytuje údaje na jaké bázi je přísada založena. Všechny přísady použité v experimentu mají obsah chloridů do 0,1 % hm.

Stanovení rozlivů

Konzistence navržených směsí byla stanovována zkušební metodou – zkouška rozlitím čerstvé směsi. Podstatou zkoušky rozlitím je stanovení konzistence čerstvé cementové malty změřením průměru „koláče“ rozlité směsi umístěné na předepsané desce střešovacího stolku. Zkouška čerstvé směsi byla provedena na vzorcích ve formě komolého kužele o $\varnothing 100 \pm 0,5$ mm spodní podstavy, $\varnothing 70 \pm 0,5$ mm horní podstavy a výšce $60 \pm 0,5$ mm. Kužel z korozivzdorné oceli byl umístěn na středu desky mechanického střešovacího stolku. Před samotným rozmícháním a plněním formy cementovou maltou byla deska střešovacího stolku a forma očištěna a natřena minerálním olejem o nízké viskozitě. Forma na střešacím stolku byla za přidržování rukou plněna ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla hutněna 10 údery dusadlem z nenasákavého materiálu délky 200 mm, o $\varnothing 40$ mm a hmotnosti 250 ± 15 g. Po naplnění byla forma zarovnána a odstraněna přebytečná směs. Přibližně po 15 sekundách od zarovnání horní hrany formy s čerstvou směsí byla forma zdvižena svisle vzhůru. Po zdvihnutí formy dojde k rozlití směsi pomocí střešovacího stolku 10 a následně dalšími 10 rázy, přičemž se zaznamenají na sebe kolmé rozměry „koláče“ vždy po sérii 10 rázů. Výsledek měření je aritmetickým průměrem z hodnot rozlivu po 10 a 20 rázech s přesností na 1 mm. Zkouška se provádí na dvou vzorcích pro každou směs. Liší-li se jednotlivé hodnoty rozlití dvou zkušebních vzorků o více jak 10 %, zkouška se opakuje (ČSN EN 1015-3), (Hrůza 2016).

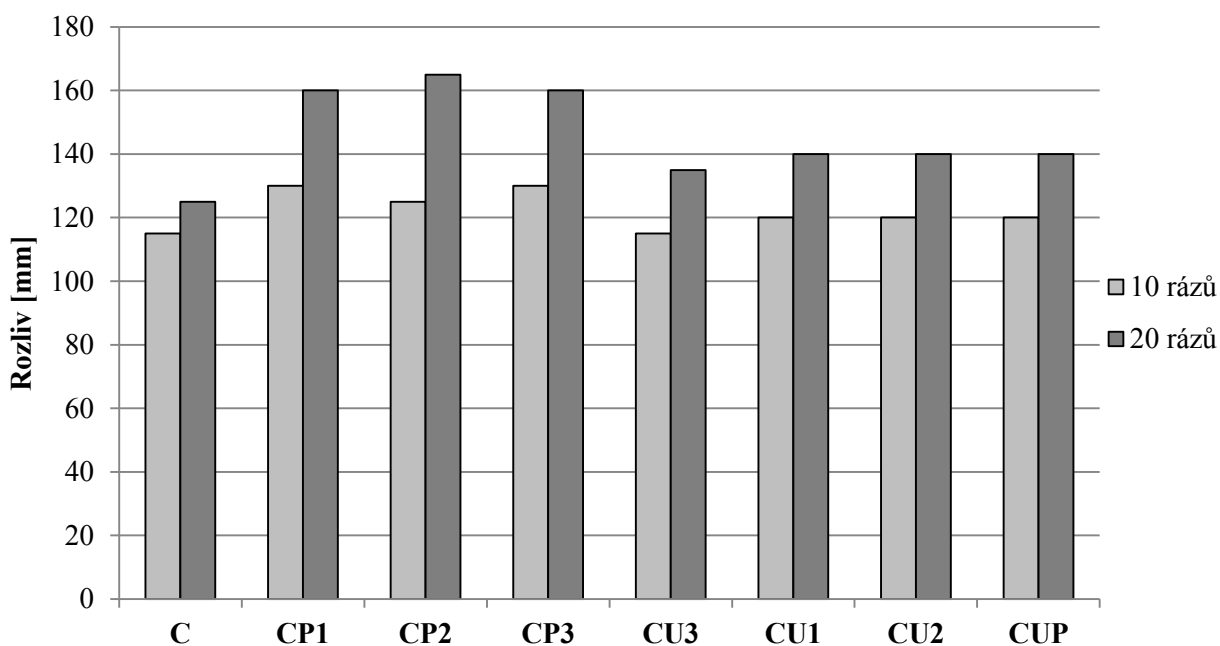
Výroba vzorků 1. fáze

Směs pro výrobu vzorků 1. fáze se skládala z cementu, vody a chemických přísad. Jednalo se tedy o výrobu čistých cementových trámčů o rozměru $20 \times 20 \times 100$ mm, na kterých byl zjišťován vliv a míra účinnosti samotných chemických běžně dostupných přísad do cementových (betonových) směsí. Šlo o prvotní experiment, který měl poodhalit účinnost použitých chemických přísad. Z každé sady byly vyrobeny 3 vzorky. Referenční sada označena C byla pouze z cementu a vody bez přídavku přísady. Ostatní sady (CP1, CP2, CP3, CU1, CU2, CU3, CUP) se lišily druhem a typem použité přísady. V sadách s označením CP jsou použity superplastifikační přísady v běžném dávkování předepsaného výrobcem (Tab. 6). Všechny směsi byly vyrobeny se shodným vodním součinitelem $v/c = 0,29$, který byl vypočítán ze suché směsi. Přidané příměsi svým množstvím nikterak nenahrazovaly záměsovou vodu.

Tab. 6: Přehled složení směsí v 1. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.

Sada	Hmotnost cementu [g]	v/c [-]	Hmotnost vody [g]	Označení přísady	Dávkování [hm. % z cementu]
C	1000	0,29	290	-	-
CP1	1000	0,29	290	P1	0,8
CP2	1000	0,29	290	P2	0,8
CP3	1000	0,29	290	P3	1,0
CU1	1000	0,29	290	U1	2,0
CU2	1000	0,29	290	U2	1,5
CU3	1000	0,29	290	U3	1,5
CUP	1000	0,29	290	UP	1,2

Směsi byly míchány ručně a ukládány do předem připravených forem. Vzorky byly odbědněny po 24 h a dále byly uskladněny v laboratorním prostředí o teplotě 21 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %. Rozhodujícím faktorem pro návrh směsí v 1. fázi byl stejný vodní součinitel, který byl nastaven podle referenční směsi s ohledem na přijatelnou zpracovatelnost. Výsledkem jsou rozlivy, které se pohybují v rozmezí cca 120 – 140 mm po 20 rázech (Obr. 19). Vyčnívají pouze směsi se superplastifikátory (CP1, CP2, CP3), jejichž hodnoty rozlivu po 20 rázech jsou 160 mm. Je to způsobeno ztekucujícími účinky, které jsou pro plastifikátory typickým znakem, kdy za stejného vodního součinitele dojde ke „ztekucení“ směsi.



Obr. 21: Rozliv směsí v 1. fázi po 10 a 20 rázech.

Výroba vzorků 2. fáze

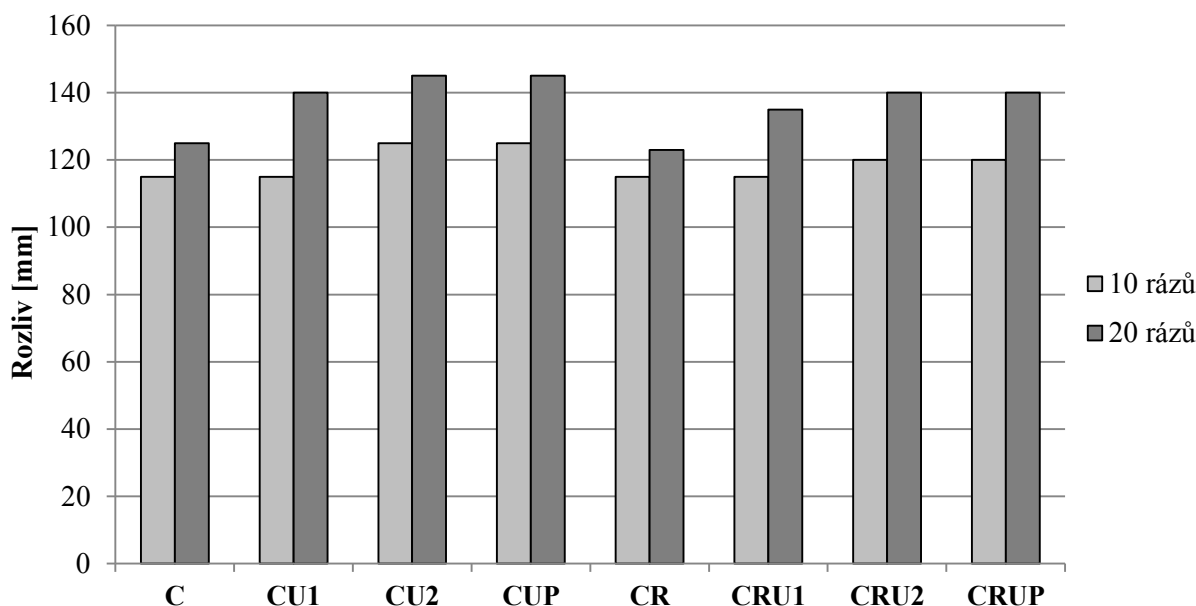
Na základě výsledků tlakových zkoušek vzorků z 1. fáze bylo dále pracováno s urychlovači U1, U2 a urychlovačem a plastifikátorem UP. Nyní již byly vyrobeny také směsi s jemně mletým recyklovaným betonem, aby bylo možné pozorovat případné odlišné chování recyklátu na chemické přísady než u čistého cementu. Byly vyrobeny opět malé vzorky o rozměru $20 \times 20 \times 100$ mm, na kterých byla zjišťována doba tuhnutí směsi. Jelikož hlavním úkolem bylo nalezení co nejkratší doby, kdy je možné vzorky vyjmout z forem, proto od každé sady postačilo vyrobit pouze 2 vzorky. Přestože na množství vyráběných vzorků by postačilo vyrobit menší množství směsi, tak z důvodu zkoušky směsi rozlitím kužele bylo dávkováno vždy celkem 1000 g suché směsi. Směsi byly připravovány ručním mícháním při dvou vodních součinitelích (Tab. 7). Vzorky bylo možné po 5 hodinách od výroby „odformovat“ a běžně s nimi manipulovat. Vodní součinitel pro směsi „cementové“ (bez recyklátu) byl $v/c = 0,29$ a pro směsi s přidaným recyklátem (40 hm. %) byl zvýšen na $v/c = 0,33$ z důvodu vyšších požadavků jemně mletého recyklátu na záměsovou vodu a pro zachování shodných rozlivů referenčních směsí. Míra dávkování všech přísad byla 1,5 hm. % z důvodu porovnání účinků zejména u směsí obsahujících recyklovaný beton, neboť kombinace chemických přísad s tímto materiálem představuje neprozkoumanou oblast.

Tab. 7: Přehled složení směsí ve 2. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.

Sada	Hmotnost cementu [g]	Hmotnost recyklátu [g]	v/c [-]	Hmotnost vody [g]
C	1000	0	0,29	290
CU1	1000	0	0,29	290
CU2	1000	0	0,29	290
CUP	1000	0	0,29	290
CR	600	400	0,33	330
CRU1	600	400	0,33	330
CRU2	600	400	0,33	330
CRUP	600	400	0,33	330

Při výrobě vzorků byly nejprve měřeny rozlivy směsí (Obr. 22), kde byl kladen důraz na sjednocení rozlivů referenčních směsí s recyklovaným betonem a bez něj. Při nalezení ideálního vodního součinitele pro směsi s recyklátem byla jeho hodnota zachována pro ostatní

sady. Sjednocující rozliv referenčních směsí (C a CR) byl 115 mm po 10 rázech a 125 mm po 20 rázech. Rozlivy ostatních sad byly větší z důvodu přidání přísad, jenž některé více či méně zpracovatelnost ovlivňují. Z grafu (Obr. 22) můžeme pozorovat shodné rozlivy (cca 140 mm po 20 rázech) sad obsahující přidání přísady.



Obr. 22: Rozlivy směsí ve 2. fázi.

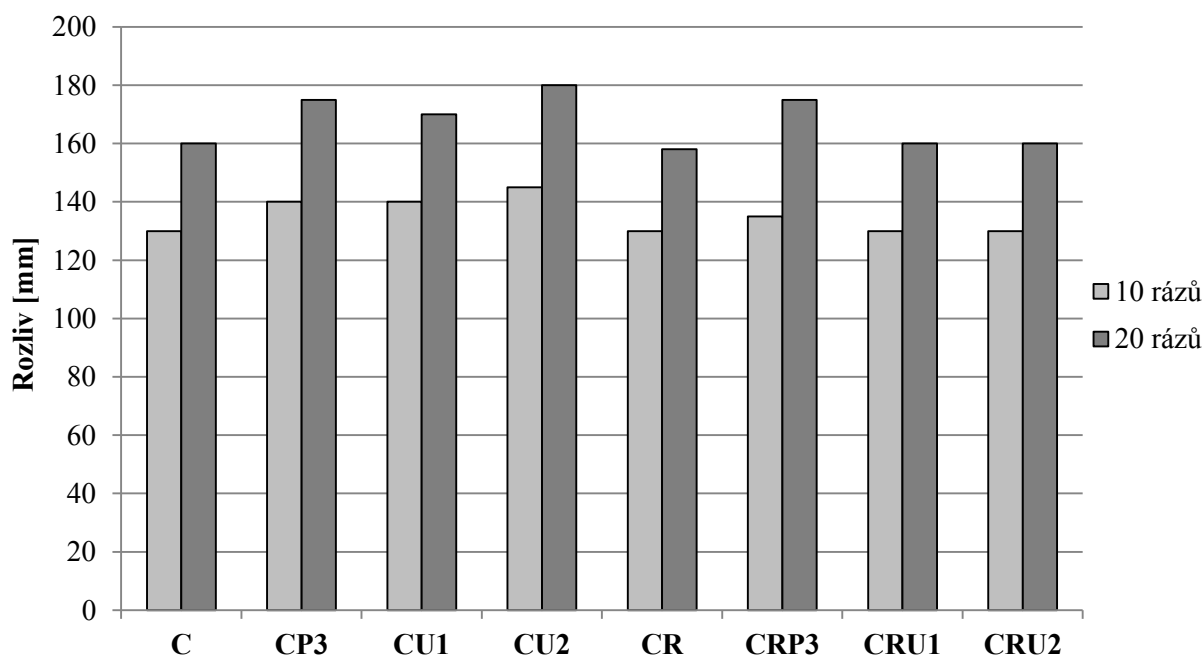
Výroba vzorků 3. fáze

Vzorky v této fázi představovaly hlavní část experimentu. Pro výrobu byly zvoleny vzorky o tvaru kvádrů a rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Při návrhu a výběru směsí jsem se na základě předchozích zjištění rozhodl pro výrobu směsí se superplastifikátorem P3 a urychlovači tuhnutí U1 a U2. Vyráběny tedy byly 4 sady bez recyklovaného betonu a 4 sady vzorků s přidáním recyklovaným betonem (Tab. 8), z čehož každá sada obsahovala 6 vzorků. Před výrobou každé směsi jsem si vždy odvážil jednotlivé komponenty směsi. U varianty směsí s recyklovaným betonem byl recyklát předem smíchán v poměru 40:60 s cementem. Tímto byla vytvořena suchá směs připravená pro smíchání s vodou. Nejprve byla v míchací nádobě smíchána suchá směs (cement nebo cement s recyklátem) s částí vody, čímž byla vytvořena zavlhlá směs, do které byly přidávány přísady a poté zbytek záměsové vody. Pro správnou „aktivaci“ přísad bylo zapotřebí směs déle ručním mícháním připravovat. Tímto způsobem byla vytvořena homogenní směs, která byla podrobena zkoušce rozlitím a následně ukládána a hutněna do forem. Po 24 h jsem vzorky „odformoval“ a nechal tvrdnout po dobu 28 dní v laboratorním prostředí při teplotě 21 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %. Vzorky z navržených směsí byly vyrobeny za účelem podrobení destruktivnímu a nedestruktivnímu testování mechanických vlastností.

Tab. 8: Přehled složení směsí ve 3. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.

Sada	Hmotnost cementu [g]	Hmotnost recyklátu [g]	v/c [-]	Hmotnost vody [g]	Dávkování přísady [hm. % z cementu]
C	1000	0	0,29	290	0,0
CP3	1000	0	0,21	213	1,0
CU1	1000	0	0,29	290	1,5
CU2	1000	0	0,29	290	1,5
CR	600	400	0,31	310	0,0
CRP3	600	400	0,25	250	1,0
CRU1	600	400	0,30	300	1,5
CRU2	600	400	0,30	300	1,5

Po vytvoření správné homogenní cementové pasty jsem testoval směsi zkouškou rozlitím kužele na zpracovatelnost (Obr. 23). Cílem při výrobě bylo docílit sjednocených rozlivů směsí s a bez recyklovaného betonu, tedy u referenčních směsí dvojice C a CR, poté v případě superplastifikátoru směsí CP3 a CRP3. U směsí s použitými urychlovači U1 a U2 byl nastaven stejný vodní součinitel pro směsi „cementové“ $v/c = 0,29$ a směsí s jemně mletým recyklovaným betonem $v/c = 0,30$. Pro přítomnost recyklátu ve směších CRU1 a CRU2 se nepodařilo směsi úplně ideálně vyladit, aby se rozlivy shodovaly. Směsi CU1 a CU2 překročily hranici 160 mm (20 rázů), kdežto směsi CRU1 a CRU2 měly přesně 160 mm po 20 rázech.

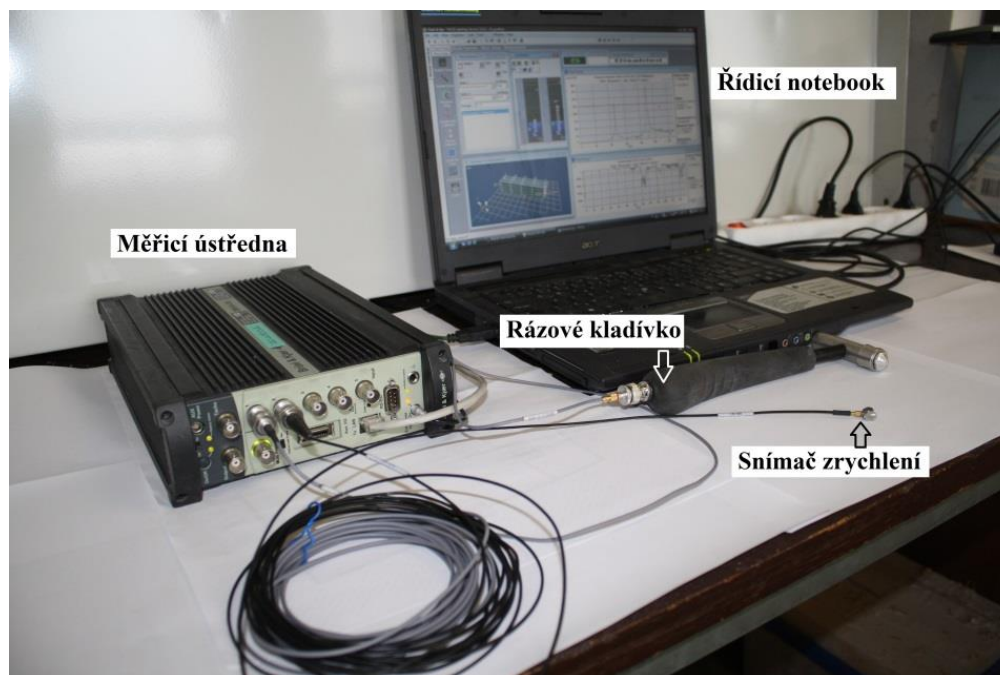


Obr. 23: Rozlivy směsí ve 3. fázi.

4.2 Způsoby stanovení mechanických vlastností vzorků

Rezonanční metoda

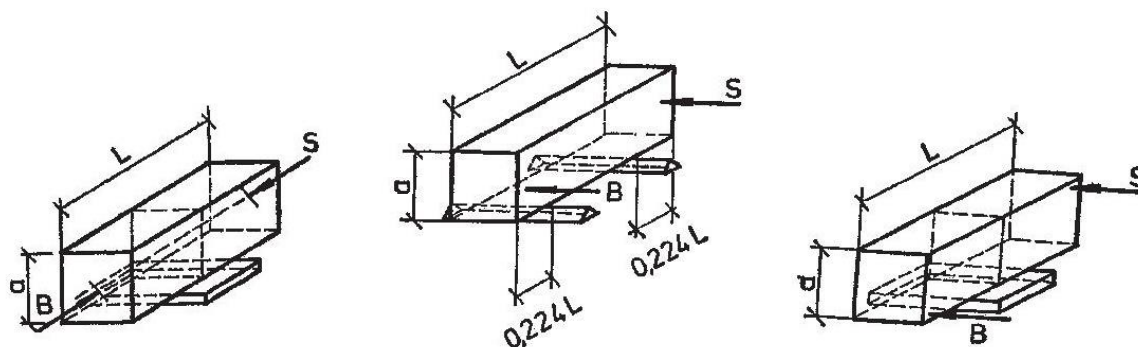
Pro měření dynamického modulu pružnosti vzorků byla použita rezonanční metoda. Jedná se o metodu nedestruktivního charakteru, což je spolu s rychlostí měření její výhodou. Metoda je založena na výpočtu dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku na základě naměřených základních rezonančních frekvencí podélného, příčného (ohybového) a krouživého (torzního) kmitání. Rezonanční frekvence byly měřeny v laboratoři pomocí měřicí sestavy Brüel&Kjær, která se skládala ze snímače zrychlení Brüel&Kjær typ 4519-003, rázového kladívka Brüel&Kjær typ 8206, měřicí ústředny Brüel&Kjær Fron-end 3560B-120 a řídicího notebooku (Obr. 24).



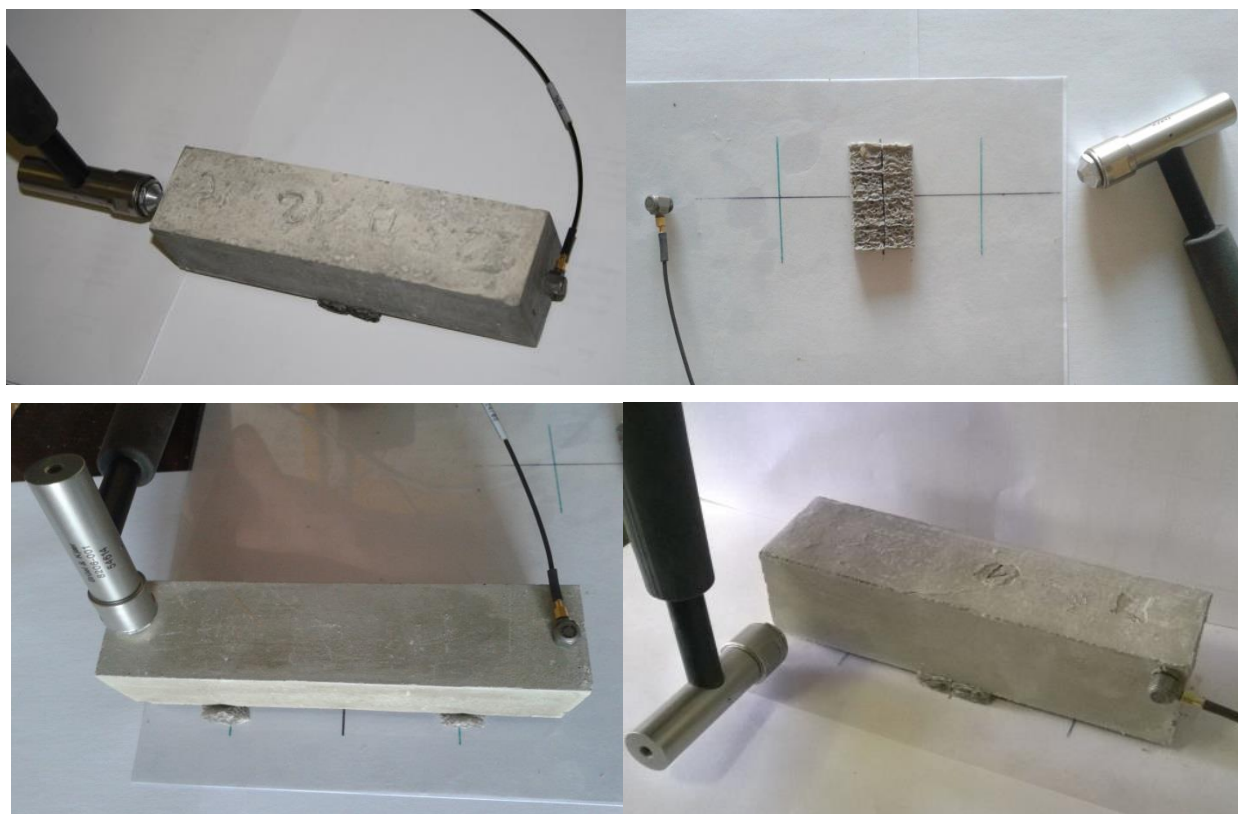
Obr. 24: Měřicí sestava Brüel&Kjær (Hrůza 2016).

Zkušební těleso bylo uloženo na podpory o dostatečně nízké tuhosti tak, aby podpory byly umístěny v uzlových bodech prvního tvaru vlastního kmitání příslušného k danému způsobu kmitání – podélné, příčné nebo krouživé (Obr. 25 a Obr. 26). Snímač odezvy (S) byl umístěn do kmitny příslušného prvního tvaru vlastního kmitání a kmitání bylo vybuzeáno úderem rázového kladívka (B – budič). Oba signály, odezva i buzení, byly zaznamenány pomocí měřicí ústředny a s použitím rychlé Fourierovy transformace převedeny do frekvenční oblasti. Následně byla pomocí softwaru PULSE LabShop verze 14.0.1 vypočítána přenosová funkce jako podíl

odezvy k budící síle ve frekvenční oblasti. Na základě rezonančních špiček v přenosové funkci byla určena základní rezonanční frekvence daného kmitání. Ze změřené rezonanční frekvence, hmotnosti a rozměrů vzorku byl stanoven dynamický modul pružnosti, modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo (ASTM E1876-01 2006), (Hrůza 2016).



Obr. 25: Měření základních vlastních frekvencí z podélného (vlevo), příčného (uprostřed) a kroutivého (vpravo) kmitání, B – budič (rázové kladívko), S – snímač, a – výška vzorku a L – délka vzorku (ČSN 73 1372 2012).



Obr. 26: Měření základních vlastních frekvencí v laboratoři z podélného (horní řada), příčného (vlevo dole) a kroutivého (vpravo dole) kmitání (Hrůza 2016).

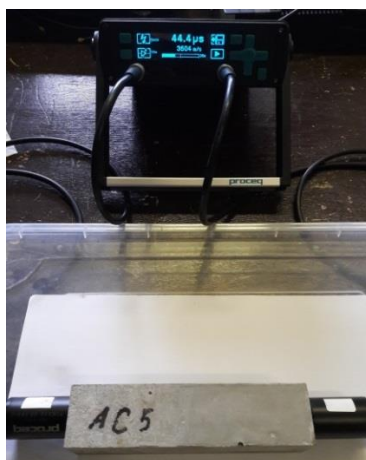
Ultrazvuková impulsová metoda

Ultrazvuková impulsová metoda pro měření dynamického modulu pružnosti byla použita jako doplňující. Metoda byla použita pouze při stáří vzorků 28 dnů a naměřené hodnoty sloužily k porovnání výsledků z měření rezonanční metodou. Zmíněná metoda je založena na principu měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zkoumaným vzorkem (materiálem), a protože se ultrazvukový impuls šíří každým materiálem jinou rychlostí, záleží na jeho složení a vlastnostech obecně. Impuls je vyvolán elektroakustickým budičem, který je osazen na ploše zkoušeného vzorku. Když projde impuls dráhou o známé délce (délka vzorku), impuls je vibrační přeměněn na elektrický signál snímačem a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu (Dvorský 2012).

Postup měření spočíval v uvedení řídicí jednotky do provozu, kalibraci přístroje a následném samotném měření, kdy byly sondy za pomoci vazebního gelu přitlačovány po dobu měření na povrch vzorku (Obr. 27). Získáván byl čas průchodu, který byl pomocí uvedených vztahů (3) a (4) a parametrů vzorků přepočítán na dynamický modul pružnosti. Vztah (3) uvádí výpočet dynamického modulu pružnosti E [MPa] pro podélné kmitání, kde ρ je objemová hmotnost vzorku [kg/m^3], v^2 je kvadrát rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [km/s] a k je součinitel rozměrnosti pro 3D prostředí [-], který je vypočítán dle vztahu (4), kde ν je Poissonovo číslo daného materiálu. Měření bylo prováděno dvakrát na každém vzorku a hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou jejich průměrem.

$$E = \frac{\rho v^2}{k^2} \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

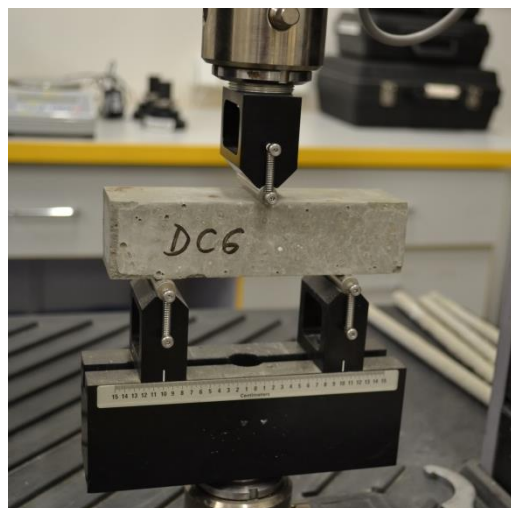
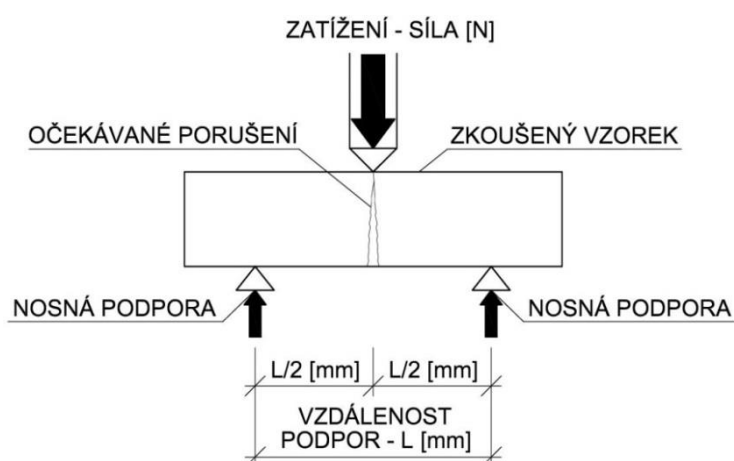


Obr. 27: Provádění měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou v laboratoři.

Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu představuje největší napětí v průřezu vzorku vyvolaného ohybovým momentem v okamžiku těsně před porušením vzorku. Pevnost v tahu za ohybu vzorků cementových malt byla zkoušena destruktivní metodou – třibodovým ohybem, jejíž princip a postup je zjednodušeně uveden v následujících řádcích.

Zkouška se provádí na trámcích předepsaných rozměrů, které se umístí na dvě nosné podpory o stanovené vzdálenosti a jsou bodově zatěžovány konstantní rychlostí silou uprostřed rozpětí nosných podpor (Obr. 28). V průběhu zkoušky je zaznamenáván čas, velikost síly a míra přetvoření. Zkouška daného vzorku končila křehkým lomem pod působíštěm síly lisu. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu se provádí výpočtem podílu ohybového momentu způsobeného silou a průřezovým modulem obdélníkového průřezu.

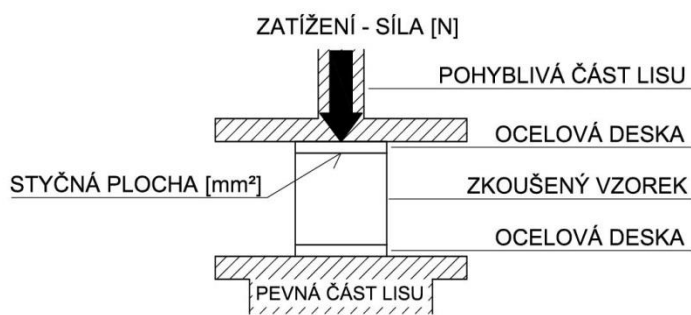


Obr. 28: Schéma zkoušky třibodového ohybu (vlevo). Laboratorní testování (vpravo).

Pevnost v tahu za ohybu při experimentu byla stanovena na vzorcích stáří 28 dní o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Pro testování pevnosti v tahu za ohybu byl použit přístroj MTS Criterion model 43 o maximální možné zatěžovací síle 30 kN s nastavenou rychlostí zatěžování lisu 0,1 mm/s. Vzdálenost nosných podpor (L) zkoušených trámů byla 100 mm. Výsledná hodnota pevnosti v tahu za ohybu dané jedné sady je aritmetickým průměrem z 6 měření. Při zkoušce dochází k přelomení vzorku přibližně v jeho polovině, viz Obr. 28. Zlomené části (poloviny) jsou použity pro zkoušku pevnosti v tlaku, která ve výčtu zkoumaných mechanických vlastností následuje v další podkapitole (Hrůza 2016).

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je jednou ze zásadních vlastností materiálu pro návrh stavebních konstrukcí. I v mém případě jde o důležité parametry, se kterými budu později pracovat při vhodném výběru dané cementové malty s konkrétními požadovanými vlastnostmi pro matici směsi zdicí tvarovky. Pevnost v tlaku byla zkoušena destruktivní metodou spočívající ve vyvolání maximálního tlakového napětí, kterému daný materiál odolává až do jeho rozdrčení. Jednoosé napětí v tlaku je vyvoláno působením zatížení (síly) pomocí lisu přes plochu ocelových desek 40 × 40 mm na zkoušený vzorek (Obr. 29). Pevnost v tlaku je vypočítána jako podíl dosažené maximální zatěžovací síly před porušením vzorku a styčné plochy vzorku s ocelovou roznášecí deskou. Jednotkou pevnosti v tlaku je N/mm^2 (MPa).



Obr. 29: Schéma zkoušky pevnosti v tlaku (Hrůza 2016).

Pevnost v tlaku byla stanovena na rozlomených vzorcích (polovinách) z testu pevnosti v tahu za ohybu. Testované vzorky byly staré 28 dní o rozměrech 40 × 40 × ~ 80 mm (cca polovina z původních vzorků). Pro testování pevnosti v tlaku byl použit měřicí přístroj EV 40 s maximální silou 400 kN. Rychlost zatěžování byla oproti předešlé zkoušce trojnásobná (0,3 mm/s). Vzorky byly zatěžovány kolmo na delší rozměr, viz Obr 30. Měření bylo provedeno vždy na 11 vzorcích od každé sady. Výsledná pevnost v tlaku je jejich aritmetickým průměrem.



Obr. 30: Zkouška pevnosti v tlaku přístrojem EV 40.

4.3 Výsledky a diskuse

V následující kapitole budou prezentovány veškeré výsledky a zjištěné vlastnosti vzorků po jednotlivých fázích experimentu. Dílčí výsledky a kroky v daných fázích budou komentovány a objektivně v diskusi zhodnoceny. Z každé fáze jsou vyvozeny závěry pro tu následující.

4.3.1 1. Fáze - orientační zjištění funkčnosti přísad

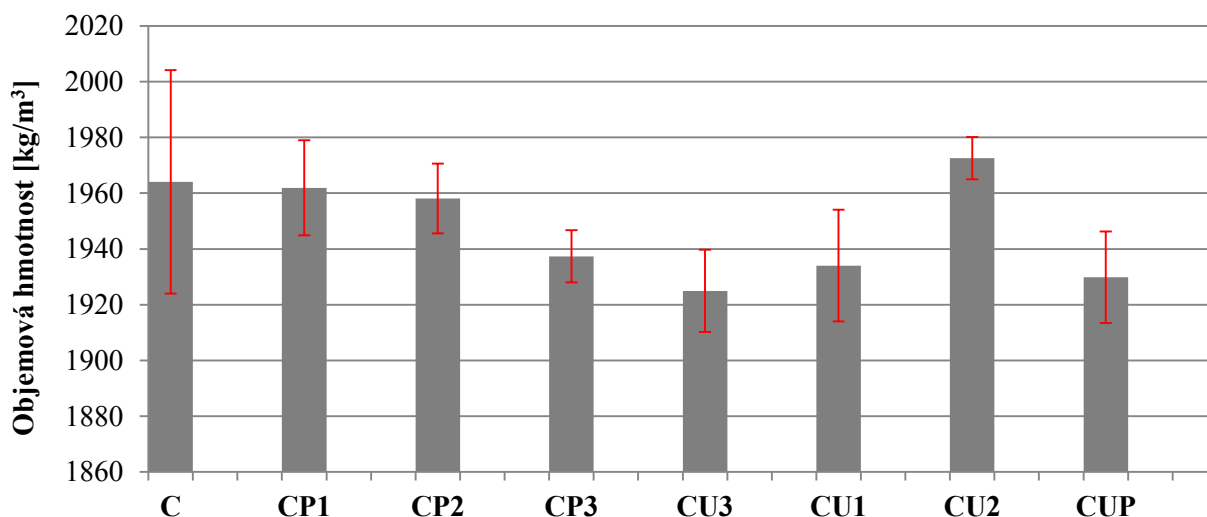
V první fázi byl zkoumán účinek plastifikačních přísad na tlakovou pevnost cementových past. Úkolem bylo zjistit tlakové pevnosti vyrobených vzorků a na základě naměřených hodnot vyloučit přísady, které měly horší vliv na výši tlakové pevnosti. S přísadami, jejichž vzorky vykazovaly nejvyšší tlakové pevnosti, bylo dále pokračováno v experimentu. Při výběru přísad pro pokračování v experimentu byl mimo tlakovou pevnost kladen ohled také na jednotlivé skupiny, čili superplastifikátory a urychlovače. Z těchto skupin poté byly již vybrány přísady nejlépe ovlivňující tlakovou pevnost. Jde o inženýrský přístup, který pomůže omezit množství vyráběných vzorků ve 3. fázi, jejichž množství by při výrobě 6 vzorků na sadu bylo extrémně velké a také neekonomické. Vzorky byly destruktivně testovány ve stáří 18 dní na základě podložených výsledků z předchozích experimentů (Hrůza 2016), kdy bylo zjištěno, že největší nárůst tlakových pevností je do 14 dní stáří, proto jsem se i z časového důvodu rozhodl pro testování v 18. dnu od výroby.

Po 1. fázi, kdy máme zúžen výběr přísad, následuje 2. fáze, ve které byly zjišťovány doby tuhnutí jednotlivých směsí. Jelikož jedním z cílů experimentu bylo nalezení směsi, která umožní během řádu prvních několika hodin „odbednění“ vzorků z forem. Krátká doba tuhnutí byla požadována z důvodu rychlého „odbednění“ kvůli docílení rychlé „otáčkovosti“ forem případné výroby betonových tvarovek. Ve druhé fázi byly vyrobeny a testovány vzorky na zmíněné tuhnutí směsi ve formách. Vzorky byly dále podrobeny nedestruktivní zkoušce dynamického modulu pružnosti s ohledem na velikost vzorků pouze z podélného kmitání. Míra tuhnutí směsi v čase byla zjišťována provizorní metodou na principu Vicatova přístroje. Podstata zkoušky spočívala v měření hloubky vnoření jehly během 1 minuty.

Důvodem 3. fáze byla výroba hlavních vzorků, kde byla zhodnocena a využita práce z předchozích fází. Na základě zjištěných dob tuhnutí, orientačních tlakových pevností a objemových hmotností byly vybrány celkem 3 z původních 7 přísad, se kterými jsem ve svém experimentu pokračoval. Ve 3. fázi pak pomocí nedestruktivního a destruktivního testování budou zjištěny mechanické vlastnosti vzorků s nahrazením cementu recyklovaným betonem a pro porovnání i vzorků čistě cementových bez recyklátu.

Objemová hmotnost

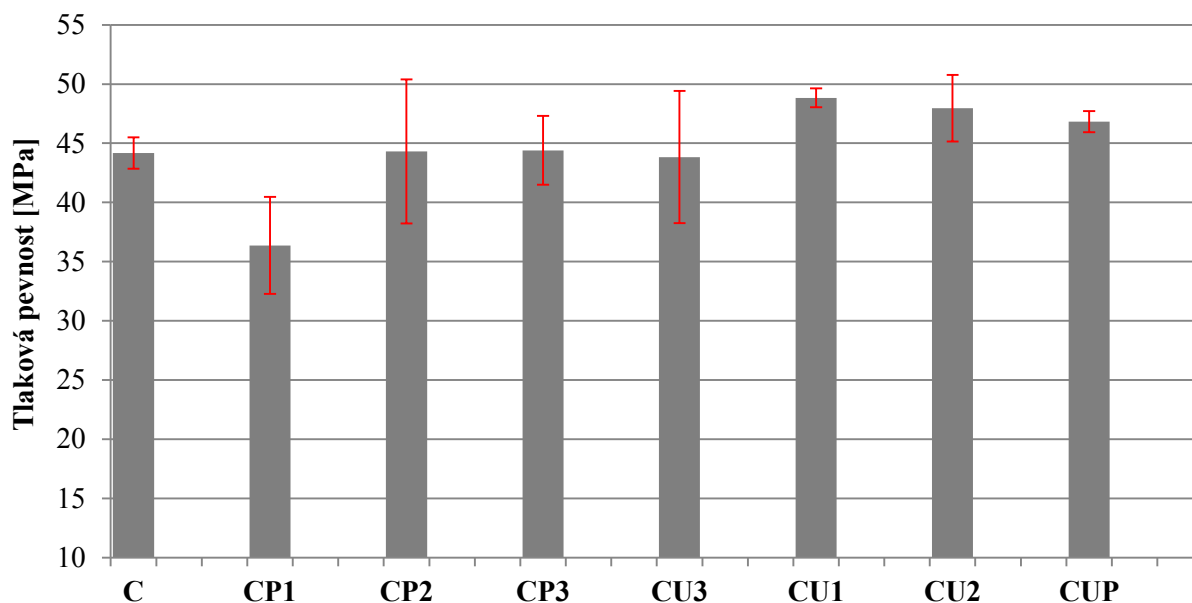
Objemová hmotnost vzorků byla vypočítána z rozměrů a hmotností vzorků ve stáří 18 dní a je závislá na velikosti vodního součinitele v/c . Dávkování přísad bylo rozdílné podle předepsaného běžného množství dávkování dle technických listů výrobců jednotlivých přísad. Z grafu (Obr. 31) lze pozorovat, že díky „umělému“ zvýšení vodního součinitele přidáním přísady dochází k poklesu objemových hmotností. Výjimkou je pouze urychlovač U2, jehož směs po vytvrnutí dosáhla větší objemové hmotnosti než referenční sada. Ovšem při pohledu na hodnoty objemových hmotností zjistíme, že rozdíly mezi jednotlivými sadami nejsou nikterak propastné, poněvadž rozsah všech směsí činí pouze cca 50 kg/m^3 . Výsledky každé sady jsou aritmetickým průměrem z 3 hodnot (vzorků). Můžeme se domnívat, že do jisté míry je objemová hmotnost ovlivněna i velikostí vzorku a horšího ukládání a hutnění směsi do forem.



Obr. 31: Objemová hmotnost vzorků v 1. fázi (stáří 18 dní), směrodatné odchylky.

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla destruktivně testována ve stáří vzorků 18 dní a to z důvodu dalšího malého nárůstu tlakové pevnosti v čase (Hrůza 2016). Výsledné hodnoty každé sady jsou aritmetickým průměrem z 3 dílčích hodnot. Výsledky pevností vzorků v tlaku (Obr. 32) ukazují, že nejlepší vliv na tlakovou pevnost cementových past mají urychlovače tuhnutí a tvrdnutí (U1 a U2) a pak urychlovač a plastifikátor (UP). Ze superplastifikátorů si lépe vedly shodně přísady P2 a P3, které dosáhly pevností v tlaku skoro 45 MPa, což není mnoho, protože této hodnoty dosáhly také vzorky referenční, ovšem zde můžeme vidět i poměrně velký rozptyl hodnot, o kterém vypovídají směrodatné odchylky. Zmíněné nejlépe „postavené“ přísady pro urychlení tuhnutí a tvrdnutí (U1 a U2) měly pevnost v tlaku $48 \pm 2,8$ MPa. Při celkovém pohledu na graf vidíme, že dokonce „kontraproduktivně“ se projevila superplastifikační přísada P1. Zbylé vzorky byly srovnatelné s referenčními pouze v případě přísad U1, U2 a UP došlo k naměření tlakových pevností vyšších než referenčních a to nad 45 MPa. Souhrnný trend všech hodnot ukazuje, že vliv na tlakovou pevnost v 18 dnech stáří mají pouze přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí. Nižší hodnoty vzorků se superplastifikátory může mít za následek i doba testování, neboť nabývání tlakové pevnosti směsí se superplastifikátory je pomalejší než v případě urychlovačů. Nyní se domnívám, že při stáří 28 dní by hodnoty sad s přísadami P1, P2 a P3 byly vyšší než referenční.



Obr. 32: Tlaková pevnost vzorků 1. fáze (stáří 18 dní), směrodatné odchylky.

4.3.2 2. Fáze - průzkumné ověření dob tuhnutí přísad

Ve druhé fázi byly zjišťovány doby tuhnutí směsí s vybranými přísadami na základě výsledků z první fáze. Pro pokračování byly vybrány urychlovače U1 a U2 a urychlovač a plastifikátor UP. V této fázi již byly vyrobeny směsi s jemně mletým recyklovaným betonem, aby bylo možné pozorovat případné odlišné chování recyklátu na chemické přísady než u čistého cementu. Měření dob tuhnutí probíhalo pouze provizorní pomocnou „metodou“ při výrobě vzorků, jelikož z kapacitních důvodů nebylo možné použít Vicatův přístroj. V hodinových intervalech od aktivace suché směsi vodou byla měřena hloubka ponoření jehly o váze 4,5 gramu po dobu 60 sekund. Jehla nebyla zatlačována žádnou vnější silou, pouze svojí gravitací kolmo k povrchu směsi. Špička a dřík jehly byly opatřeny ryskami vzdálenými od sebe 1 mm. Po uplynutí doby měření byla z jehly pomocí rysek a nastavením posuvného měřítka odečtena hloubka ponoření s přesností na 0,1 mm.

Z naměřených hodnot (Tab. 9) můžeme pozorovat, že nejkratší dobu tuhnutí měly směsi s urychlovačem U1 a směs s urychlovačem a plastifikátorem UP. Nicméně všechny vzorky bylo možné nejdéle po 5 hodinách od uložení do forem „odformovat“. Vzorky už se nejevily plasticky a byly tvarově stálé. Jejich povrch byl náchylný na hrubší vrypy ostrým předmětem.

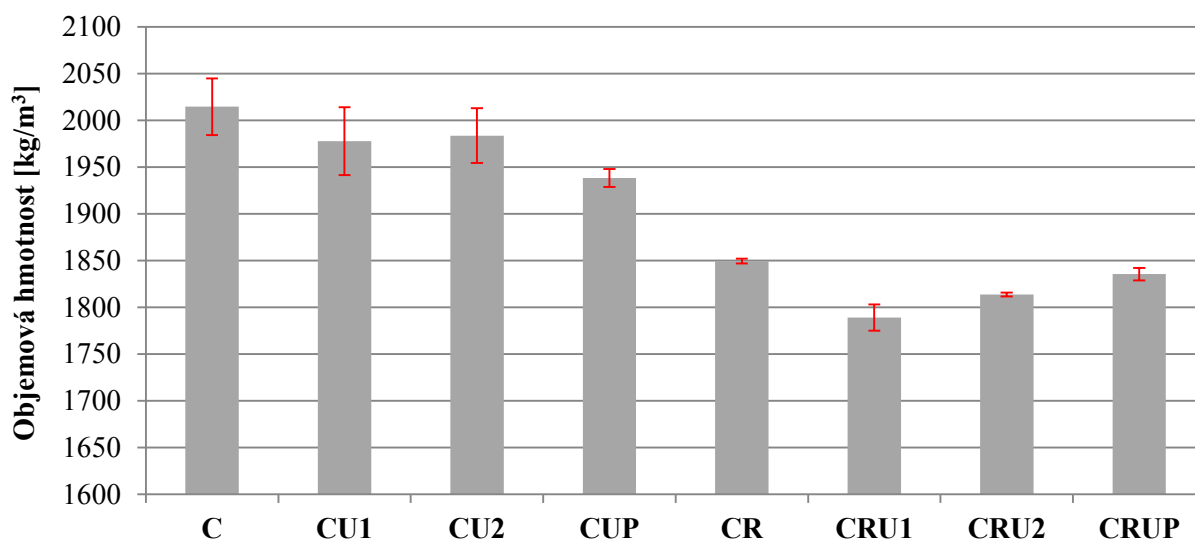
Tab. 9: Přehled hloubek vnoření jehly v závislosti na době tuhnutí směsí. Uvedeno v [mm].

Sada	Po 1 hodině	Po 2 hodinách	Po 3 hodinách	Po 4 hodinách	Po 5 hodinách
C	18,0	6,0	3,0	1,5	0,0
CU1	8,0	2,0	0,3	0,0	0,0
CU2	12,0	4,0	2,0	0,3	0,0
CUP	10,0	4,0	2,0	0,3	0,0
CR	5,0	3,0	1,0	0,3	0,0
CRU1	4,0	2,0	1,0	0,3	0,0
CRU2	7,0	4,0	2,5	0,8	0,0
CRUP	7,0	4,0	2,0	0,8	0,0

Objemová hmotnost a dynamický modul pružnosti

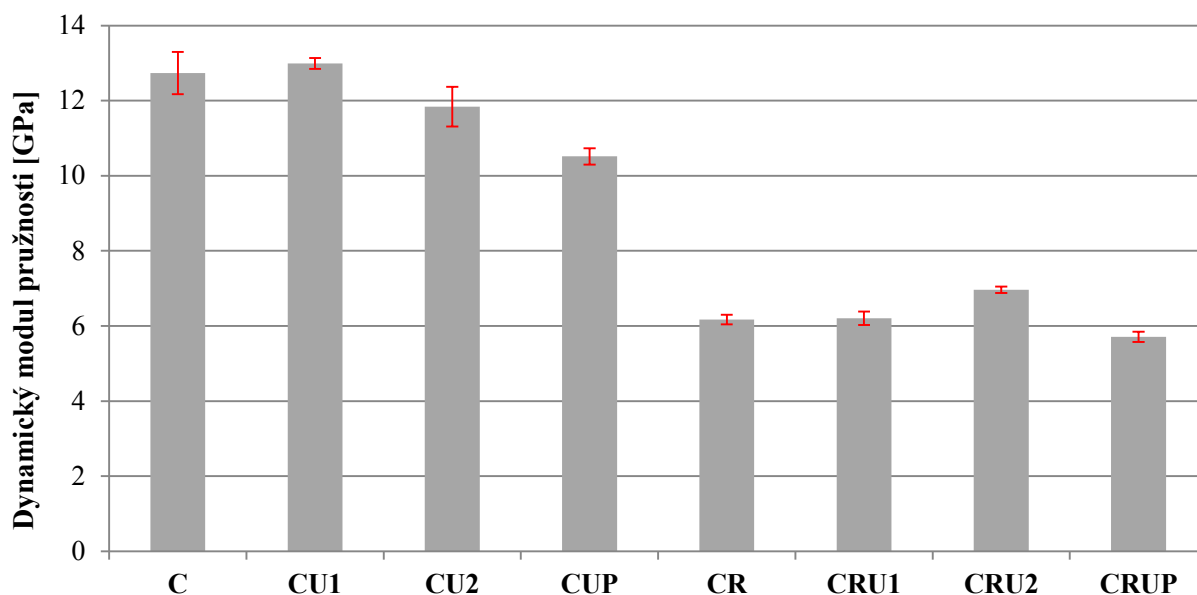
Vzhledem k postačujícímu počtu 2 vzorků na sadu z důvodu orientačního zjišťování dob tuhnutí nejsou hodnoty objemové hmotnosti a dynamického modulu pružnosti úplně vypovídající a správné, jelikož chyba měření v takovémto počtu může být značná, ovšem pro předběžné měření v souvislosti s následující hlavní (3. fází) dostačující.

Trend objemových hmotností (Obr. 33) ukazuje pokles u směsí s přidáním jemně mletým recyklovaným betonem. Je to zapříčiněno nižší objemovou hmotností samotného recyklátu, ale především zvýšeným vodním součinitelem, a tak je matrice více porézní. Pokles hodnot sad CRU1 a CRU2 v porovnání s CRUP a CR připisují ještě o kousek zvětšenému vodnímu součiniteli díky přidávanému určitému množství přísady.



Obr. 33: Objemové hmotnosti vzorků ve 2. fázi (stáří 24 h), směrodatné odchylky.

Dynamický modul pružnosti byl vypočítán pouze z měření podélných frekvencí, protože frekvence příčné nebylo možné vzhledem k malým rozměrům vzorků naměřit. Podíváme-li se na grafické znázornění dynamického modulu pružnosti (Obr. 34), můžeme pozorovat totožný trend jako v případě objemových hmotností, a to opět viditelný propad o přibližných 4 až 6 GPa. Například hodnoty vzorků s recyklovaným betonem jsou v porovnání s výsledky z 3. fáze přibližně o 25 až 40 % nižší. Domnívám se, že je to dáno velikostí vzorků (20 × 20 × 100 mm), na kterých se samotné měření provádí obtížně a dochází zde k poměrnému zkeslení. Negativně se v tomto případě projeví i přidané přísady, jelikož dynamický modul pružnosti téměř neovlivnily, přestože bylo očekáváno, že alespoň směsi s urychlovači (U1 a U2) budou mít hodnoty oproti referenčním směsím zvýšené.



Obr. 34: Dynamický modul pružnosti z podélného měření (stáří 24 h), směrodatné odchylky.

Ve druhé fázi bylo zjištěno, že nejkratší dobu tuhnutí mají směsi s urychlovači tuhnutí, což potvrdilo předpoklady a účel přísad pro rychlé „odbednění“. Negativní zjištění se dostavilo při měření modulu pružnosti, kdy přidané přísady napomáhající zvyšovat počáteční i konečné pevnosti zůstaly poněkud za očekáváním a to i v případě čistě „cementových“ směsí, kde jsem zlepšení očekával. Východiskem pro 3. fázi a závěrem této fáze, je výběr urychlovačů U1 a U2 pro výrobu „velkých“ vzorků. Výsledky urychlovače a plastifikátoru také nebyly neuspokojivé, ale rozhodl jsem na základě tlakových pevností z 1. fáze tuto přísadu nahradit jedním zástupcem z řad superplastifikátorů (P3).

4.3.3 3. Fáze - hlavní část výroby vzorků s vybranými přísadami

Smrštění

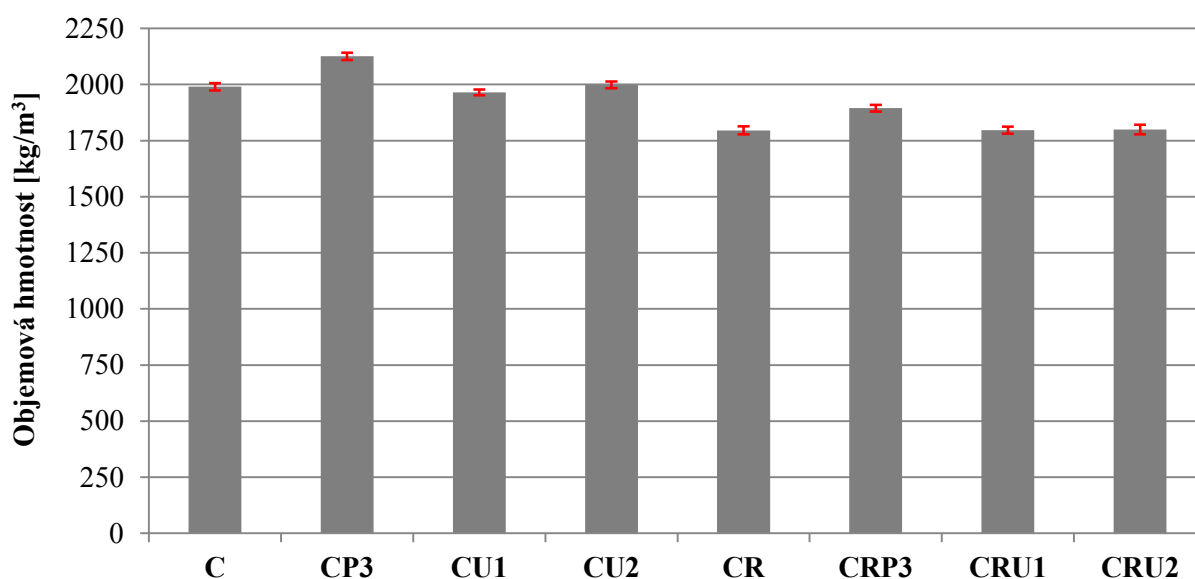
Při „odformování“ vzorků, které proběhlo cca po prvních 24 hodinách tuhnutí a tvrdnutí kompozitních směsí bylo zjišťováno smrštění jednotlivých vzorků. Měření se provádělo digitálním posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm. Výsledné hodnoty vznikly vyhodnocením aritmetického průměru jednotlivých délek sady vzorků a délky formy daného vzorku. Smrštění vzorků jsem dál monitoroval během doby tvrdnutí 28 dní.

Vzorky s recyklovaným betonem se po prvním dni smrštily o cca 0,1 % délky vzorku, v době stáří vzorků 28 dní se smrštění dostalo na hodnoty 0,20 až 0,35 % délky vzorku. Jediné referenční cementové vzorky se dokonce po celou dobu tvrdnutí délkově roztahovaly.

Během prvních 24 hodin to bylo přibližně o 0,25 % délky, poté se roztažnost zmenšila na cca 0,20 % délky. Zbytek cementových vzorků s přísadami se po většinu 28 dní smršťoval v rozmezí od 0,05 do 0,20 % délky. Zmínit musím také délku vzorků, která byla 160 mm.

Objemová hmotnost

Objemové hmotnosti kompozitních materiálu při stáří 28 dní (Obr. 35) se pohybují v rozmezí 1750 až 2125 kg/m³. Hodnoty vzorků jsou ovlivněny především přidáním recyklovaného betonu, kdy je možné pozorovat odskok oproti hodnotám směsí čistě s cementem. Největších hodnot dosáhly sady se superplastifikátorem P3 (CP3 – 2125 kg/m³, CRP3 – 1900 kg/m³), jejichž matrice je nejméně pórovitá a nejvíce kompaktní. Je to nejspíše způsobeno plastifikačními účinky, kdy přísada díky ztekucujícím účinkům směs prakticky sama hutní a nedochází hutněním k „zanášení“ vzduchu do směsi, čímž je omezen vznik nežádoucích technologických pórů.

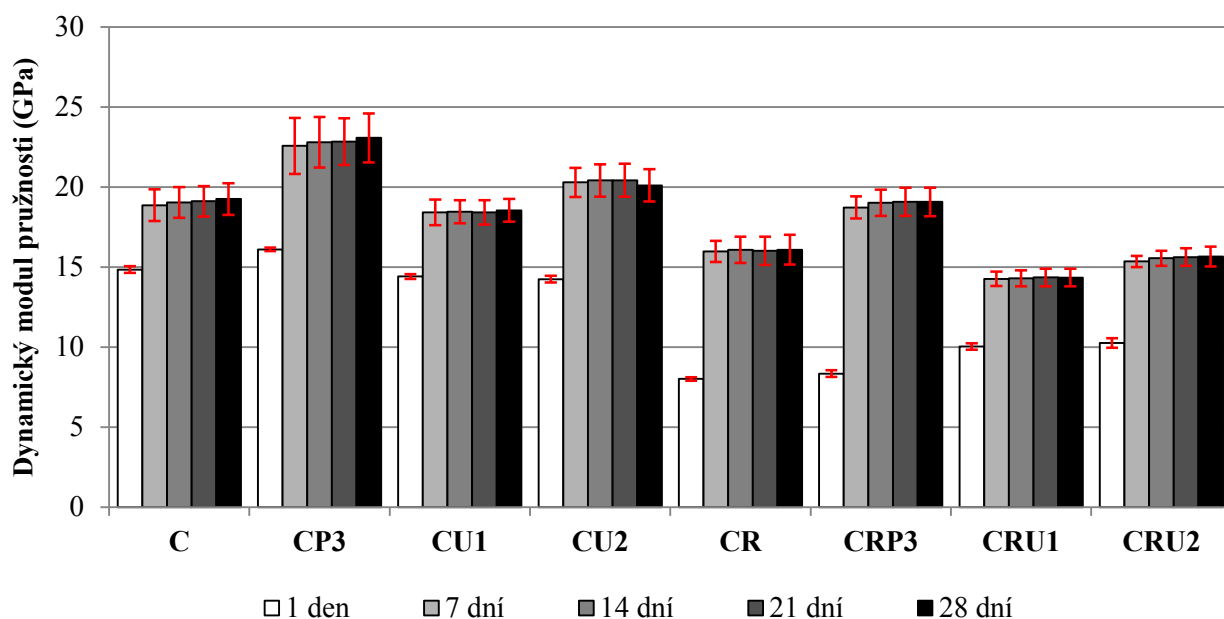


Obr. 35: Objemová hmotnost vzorků (28 dní), směrodatné odchylky.

Dynamický modul pružnosti

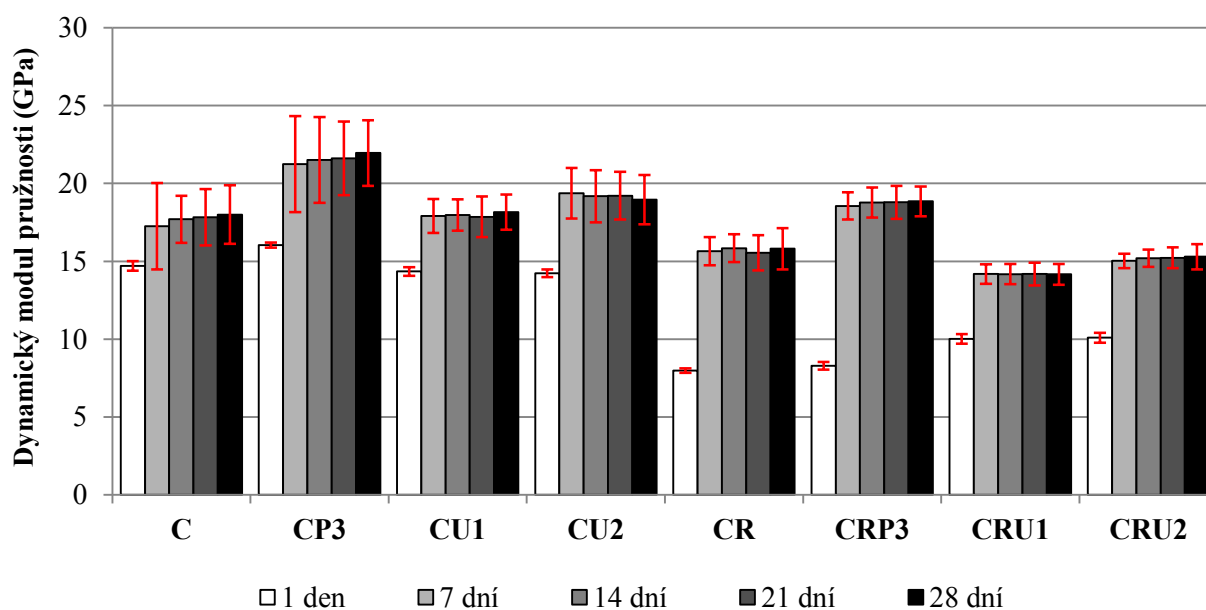
Během zrání vzorků $40 \times 40 \times 160$ mm na vzduchu byl průběžně po 7 dnech sledován vývoj dynamického modulu pružnosti (E_{dyn}) po dobu 28 dní. Hodnoty každé sady jsou vypočítány aritmetickým průměrem ze všech 6 vzorků v sadě stejně jako výpočet směrodatné odchylky. U vzorků bylo vždy prováděno kontrolní měření a vážení. Vyhodnocení bylo prováděno na základě naměřených frekvencí z podélného kmitání (Obr. 36). Pro ověření správnosti výsledků byly vyhodnoceny také hodnoty dynamického modulu pružnosti z příčného kmitání (Obr. 37). Hodnoty těchto grafů (Obr. 36 a Obr. 37) jsou téměř totožné, takže můžeme prohlásit měření za správně provedené.

Při sledování vývoje dynamického modulu pružnosti E_{dyn} (Obr. 36 a Obr. 37) je zřetelné, že maximální nárůst E_{dyn} je v průběhu prvních 7 dní. V době mezi 7 a 28 dny už nedochází k výrazným změnám E_{dyn} . Největších hodnot E_{dyn} dosahují vzorky se superplastifikátorem P3 a to jak v případě bez recyklovaného betonu (CP3 23,0 GPa), tak v případě směsi s náhradou cementu 40 hm. % recyklátu (CRP3 19,0 GPa). Rozdíl mezi sadami CP3 a CRP3 činí tedy 4,0 GPa. Pokles hodnot přibližně o 4 GPa je znatelný napříč všemi dvojicemi sad s danou přísadou a bez či s recyklovaným betonem. Můžeme prohlásit, že 40 hm. % recyklátu způsobí pokles dynamického modulu pružnosti ve 28 dnech o cca 4 GPa, jenž je způsoben menší soudržností matrice.



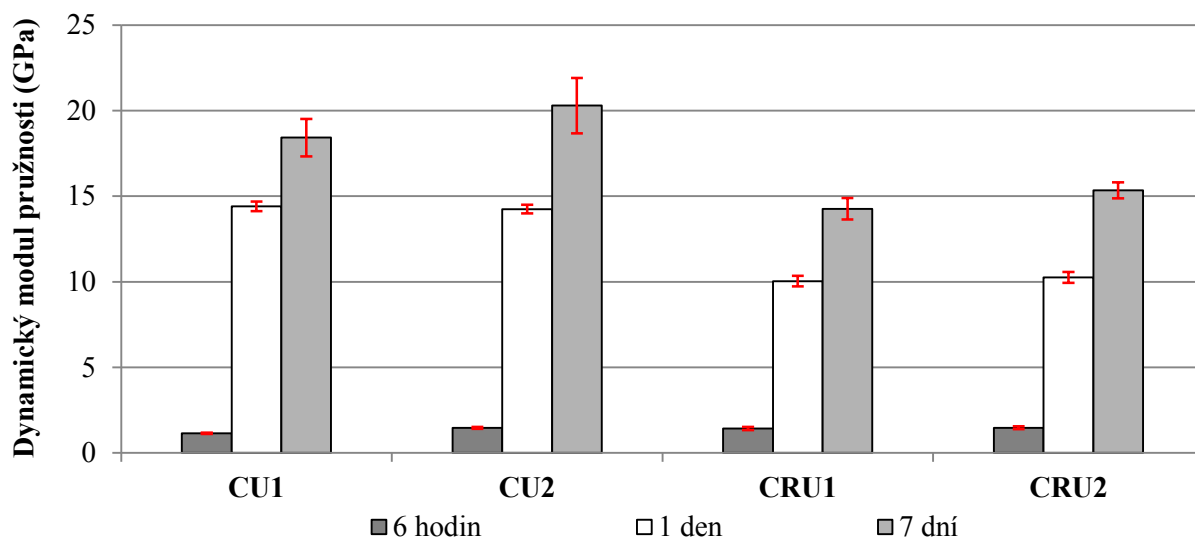
Obr. 36: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z podélného kmitání, směrodatné odchylky.

Poněkud za očekáváním dopadly vzorky s použitím urychlovačů tuhnutí a tvrdnutí (CU1, CU2, CRU1, CRU2) jejichž hodnoty E_{dyn} jsou skoro pouze nepatrně vyšší nebo dokonce nižší než E_{dyn} referenčních sad (C, CR). Jelikož se jedná o přísady způsobující počáteční nárůsty pevnosti, tak si můžeme všimnout, že ve stáří 7 dní měly vzorky s recyklátem hodnoty vyšší než referenční směs. Poté ale následoval pomalejší vývin směsí s přísadami a výsledkem je negativní výsledek, protože směs s přísadou nedosáhne v některých případech (CU1, CRU1) ani hodnot referenčních (C, CR).

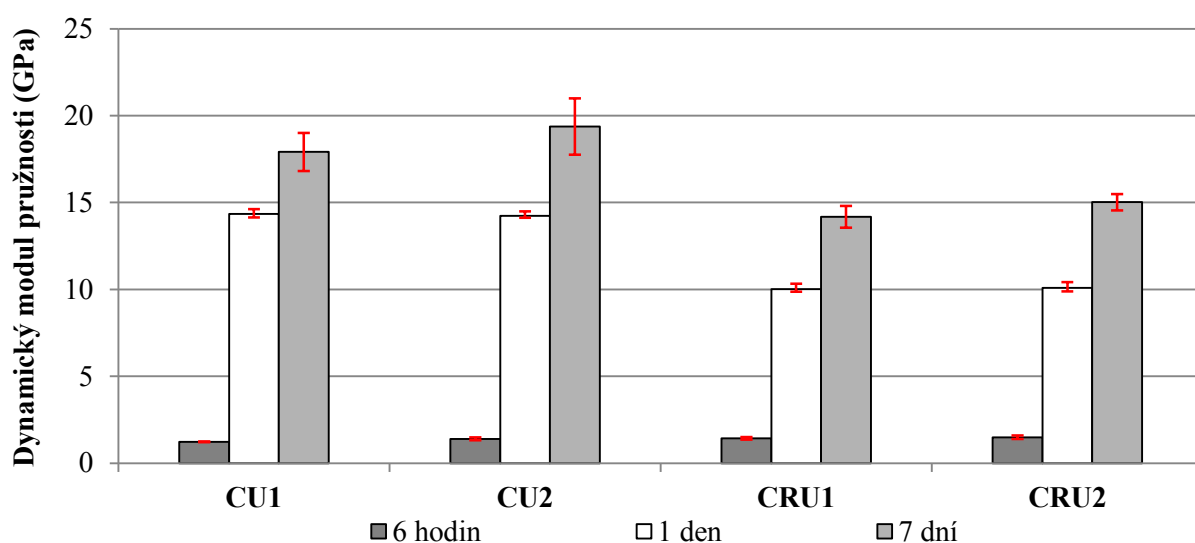


Obr. 37: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z příčného kmitání, směrodatné odchylky.

Pro detailnější rozbor nárůstu dynamického modulu pružnosti E_{dyn} v čase bylo provedeno měření u vzorků s urychlovači tuhnutí a tvrdnutí hned po vyjmutí z formy tj. po 6 hodinách. Graf naměřených hodnot (Obr. 38 a Obr. 39) ukazuje, že největší nárůst probíhá v prvních 24 hodinách tvrdnutí. Stejně jako v případě dlouhodobého vývoje E_{dyn} bylo pro kontrolu a ověření správnosti výsledků provedeno také měření z příčného kmitání (Obr. 39). Téměř shodné hodnoty vypovídají o správném provedení měření.



Obr. 38: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z podélného kmitání, směrodatné odchylky.

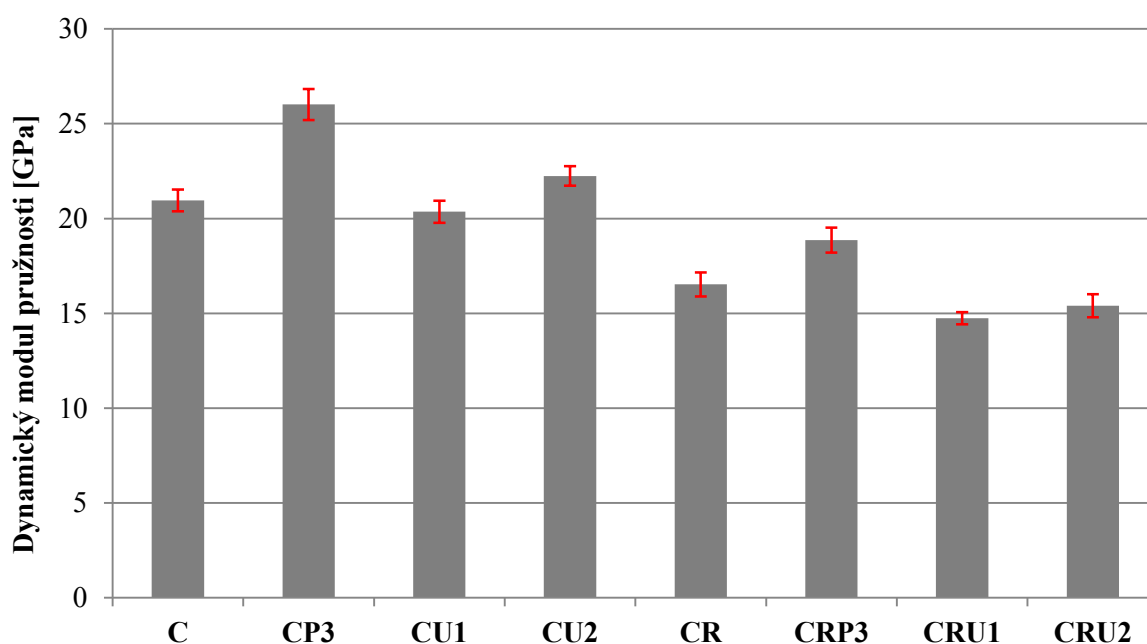


Obr. 39: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z příčného kmitání, směrodatné odchylky.

Modul pružnosti měřený impulsní ultrazvukovou metodou

Impulsní ultrazvuková metoda pro nedestruktivní měření modulu pružnosti byla použita pouze jako určité ověření výsledků při stáří 28 dní z rezonanční metody, neboť tato metoda obecně je daleko méně přesná než rezonanční.

Pohled na prezentované výsledky (Obr. 40) potvrzuje, že nejlépe fungující přísadou je plastifikátor P3 a to jak u směsí bez recyklovaného betonu, tak s ním. Odchytky oproti měření rezonanční metodou jsou patrné, jejich velikost se pohybuje do cca 1,0 GPa čili přibližně 5 %.

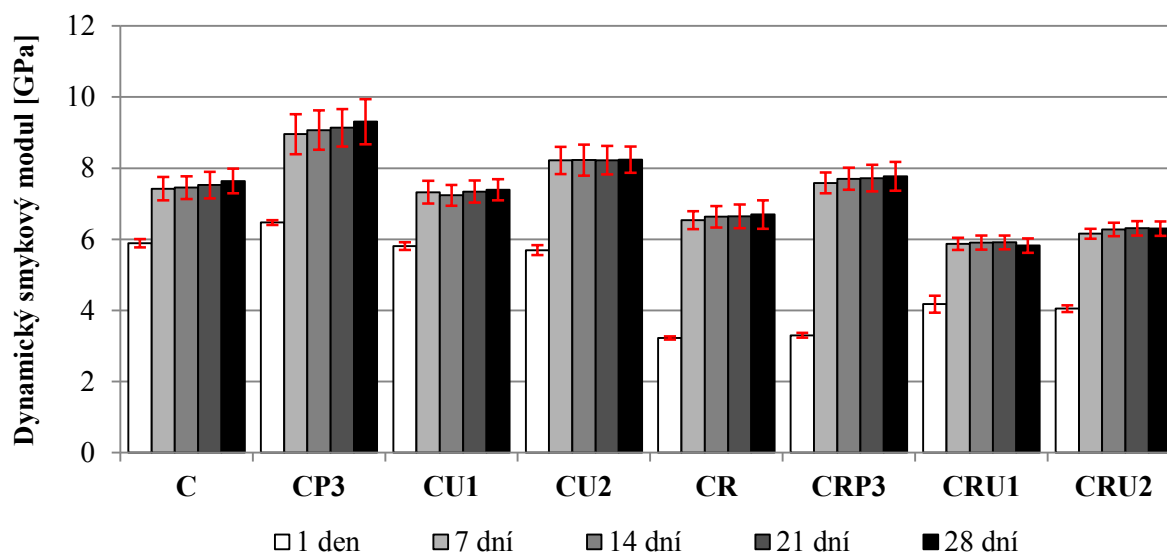


Obr. 40: Dynamický modul pružnosti měřený ultrazvukovou impulsní metodou (28 dní), směrodatné odchytky.

Dynamický smykový modul

Pro zjištění dynamického smykového modulu G_{dyn} bylo využito měření základní vlastní frekvence z krouživého kmitání. Hodnoty každé sady jsou stejně jako v předešlém případě aritmetickým průměrem z 6 vzorků na sadu. Totéž platí i o směrodatné odchylce.

Dynamický smykový modul je také ovlivněn nahrazením cementu recyklovaným betonem. V každé ze dvou skupin se nejlépe projeví vzorky se superplastifikátorem P3, které svými hodnotami (CP3 – 9,3 GPa, CRP3 – 7,7 GPa) převyšují hodnoty G_{dyn} referenční směsi. Prokazatelného rozdílu u všech směsí (Obr. 41) si můžeme všimnout mezi 1. dnem a 7 dny stáří, kdy směs nejrychleji nabývá pevnosti. S přibývajícím časem od 7 dní dále už je nárůst smykového modulu pouze pozvolný, prakticky zanedbatelný. Negativní vliv na dynamický smykový modul mají především urychlovače tuhnutí U1 a U2, zejména u směsí s jemně mletým recyklovaným betonem (CRU1, CRU2).

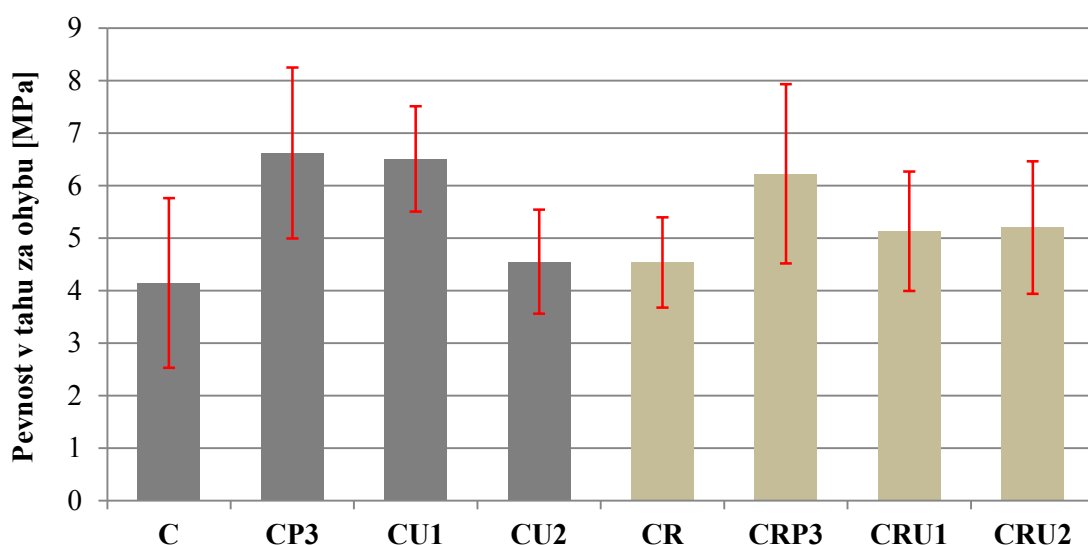


Obr. 41: Dynamický smykový modul G_{dyn} (28 dní), směrodatné odchylky.

Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu probíhaly ve stáří vzorků 28 dní a na všech 48 trámcích, které byly za pomoci tříbodového ohybu lámány. Zlomené poloviny (Obr. 43) vzorků byly použity na zkoušení pevnosti v tlaku. Výsledky obsahují soubor 6 průměrovaných hodnot z každé sady vzorků. Z prezentovaných výsledků (Obr. 42) můžeme konstatovat, že přidané přísady pozitivně ovlivňují ohybové pevnosti vzorků. Zaměříme-li se na směs bez přidaného recyklátu, tak zde jde patrný o hodně větší nárůst ohybových pevností, než u vzorků s přidaným jemně mletým recyklovaným betonem. Největších pevností dosahují vzorky s plastifikátorem P3 a to jak u vzorků bez recyklátu (6,6 GPa), tak i vzorků s recyklátem (6,2 GPa). Při pohledu na graf jako celek nevidíme prakticky žádný výrazný trend. Vidíme vyčnívající směsi CP3 a CRP3, poté ještě poměrně velkou pevnost směsi CU1 s urychlovačem tuhnutí a bez recyklátu (6,5 GPa). Chceme-li se zaměřit na vliv samotného přidaného jemně mletého recyklovaného betonu, který je v poměru s cementem 40:60 (vztaženo na hmotnostní %), tak zjistíme v případě referenčních směsí (C a CR) a směsí s urychlovačem U2 (CU2 a CRU2), že recyklát způsobuje nárůst pevností vzorků v tahu za ohybu.

Zmínit bych se chtěl také o jisté funkčnosti přísad v souvislosti s recyklovaným betonem, neboť se jedná o neprozkoumanou oblast. U plastifikátoru P3 je vidět, že přítomnost 40 hm. % recyklovaného betonu nemá skoro žádný negativní vliv. V případě urychlovače U1 je pokles pevnosti nejvíce patrný (cca 1,5 GPa). Naopak jde-li o urychlovač tuhnutí U2, který sice z přidaných přísad dosahuje nejmenších pevností, ale jako jediný se pozitivně projevil ve směsi s recyklátem v porovnání se směsí bez jeho přidání. Do jisté míry jsou bohužel výsledky zkesleny poměrně velkými výkyvy ve směrodatných odchylkách.



Obr. 42: Pevnost v tahu za ohybu (28 dní), směrodatné odchylky.

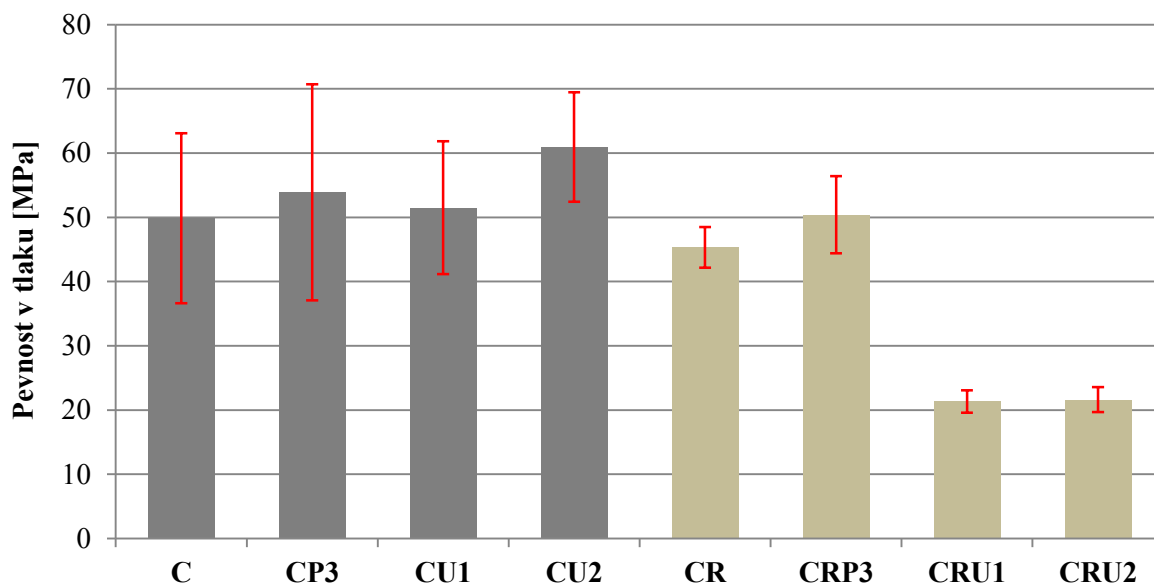


Obr. 43: Vzorky porušené křehkým lomem při tříbodovém ohybu.

Pevnost v tlaku

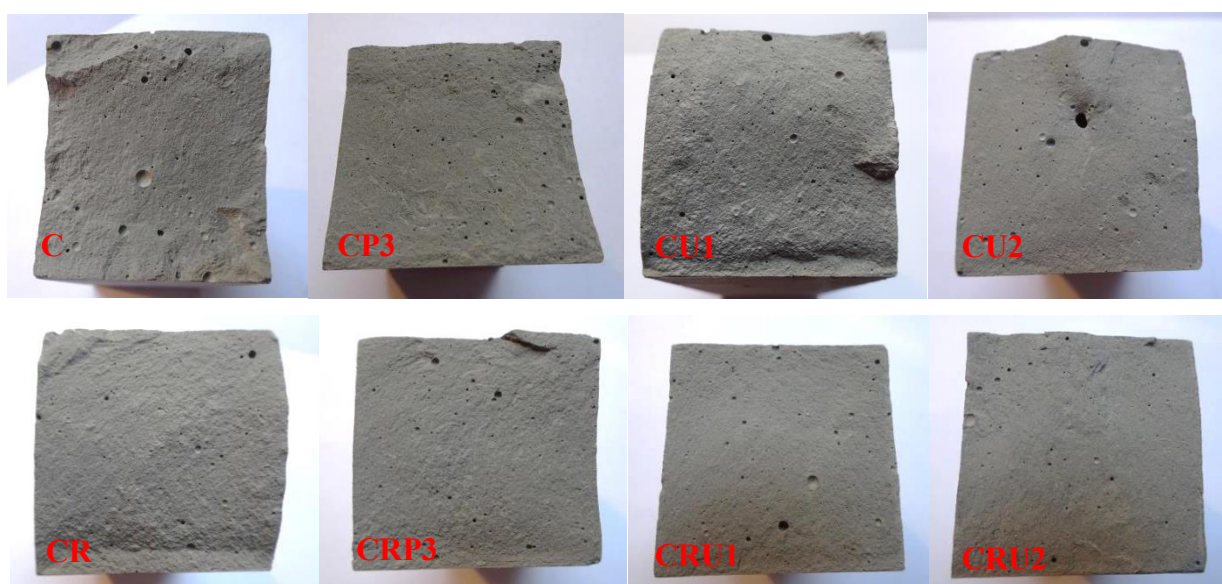
Zkouška pevnosti v tlaku byla prováděna také ve stáří vzorků 28 dní na polovinách z trámců, které nejprve prošly zkouškou pevnosti v tahu za ohybu. Z každé sady bylo testováno 11 vzorků (polovina trámců). Výsledné hodnoty jsou tedy aritmetickým průměrem z 11 údajů. Při prvním pohledu na výsledky zkoušky (Obr. 44) vidíme vyšší hodnoty směsi bez recyklátu a prokazatelný rozdíl u směsi s urychlovači U1 a U2 a to konkrétně mezi směsmi s a bez recyklovaného betonu. Trend těch hodnot může být způsoben nepříznivým vlivem urychlovačů na recyklovaný beton. Jistý podíl na tom má také samotná náhrada cementu recyklátem, což je ale známo z předchozích studií (Hrůza 2016).

Směsi s recyklovaným betonem mají pochopitelně snížené pevnosti v tlaku z důvodu již zmíněné náhrady cementu. Všimnout si ale ovšem můžeme poměrně dobrého výsledku směsi CRP3, která dosáhla srovnatelných pevností, jako cementová referenční směs C. S patřičným nadhledem můžeme říci, že plastifikátor P3 v ohledu na tlakové pevnosti dokáže nahradit chybějících 40 hm % cementu, které nahrazuje odpadní recyklát. Na druhou stranu nejhůře dopadly směsi CRU1 a CRU2, u kterých je použit urychlovač tuhnutí s počátečním nárůstem pevnosti, a tak výsledky v době 28 dní stáří jsou dosti mizivé (cca 20 GPa). Zde se vůbec neprojevil předpokládaný efekt přísady, která by měla zajistit zvýšené pevnosti a „dostihnout“ tak absenci určitého množství cementu.



Obr. 44: Pevnost v tlaku (28 dní), směrodatné odchylky.

Při pohledu na makrofotografie lomových ploch (Obr. 45) z destruktivních zkoušek pevnosti v tahu za ohybu můžeme vidět, že sada CRP3, která mezi vzorky s přidaným recyklovaným betonem dosáhla největších tlakových pevností, má také jemnou a málo pórovitou strukturu matrice. Naopak u sady CRU1 lze pozorovat více pórů, které mají také svůj podíl na nízké pevnosti v tlaku. Vznik pórů můžeme přičítat nedokonalému hutnění a v malé míře u urychlovačů i většímu vodnímu součiniteli, který byl navýšen o přidané přísady, čímž mohlo dojít ke vzniku porézní struktury. Jedná se tedy převážně o technologické póry a v některých případech i póry kapilární vzniklé zvýšeným vodním součinitelem.



Obr. 45: Makrofotografie lomových ploch.

Třetí fáze byla nejhlavnější částí experimentu, která byla ovlivněna výsledky předchozích dvou fází. V první fázi šlo o zjištění a zmapování „funkčnosti“ všech připravených chemických přísad, kterých bylo celkem sedm. Z tohoto souboru přísad jsem na základě tlakových zkoušek na zkušebních těliscích vybral přísady U1, U2 a UP pro pokračování do druhé fáze, kde jsem se zaměřil na jejich rychlost tuhnutí. Zjistil jsem, že nejdříve po 5 hodinách je možné vzorky „odformovat“, ale svou roli hraje i velikost vzorků. Po ukončení druhé fáze jsem se rozhodl pro výrobu hlavních vzorků a ve třetí fázi použít přísady U1, U2 a superplastifikátor P3, který nebyl ovšem testován ve druhé fázi, ale jeho hodnoty tlakových pevností z první části byly prakticky srovnatelné s urychlovači U1 a U2.

Pro třetí část tak byly použity celkem tři přísady, jedna superplastifikační P3 a dva urychlovače tuhnutí a tvrdnutí (U1, U2). Vyrobene „velké“ vzorky byly podrobeny detailnějšímu testování. Z výsledků měření dynamického modulu pružnosti a tlakových zkoušek se ukázalo, že nejvhodnější přísadou pro kompozitní směs se 40 hm. % jemně mletého recyklovaného betonu je superplastifikátor P3, který sice netuhne zdaleka tak rychle jako urychlovače tuhnutí, ale po 7 hodinách je možné vzorky z formy vyjmout a bezpečně s nimi manipulovat, což je stále uspokojivé. Vzorky CRP3 s přísadou P3 měly prokazatelně nejlepší výsledky, ať už se to týká dynamického modulu pružnosti (19,0 GPa), pevnosti v tahu za ohybu (6,2 MPa), pevnosti v tlaku (50,4 GPa) a objemová hmotnost směsi byla 1900 kg/m³. Ruku v ruce s dobrými výsledky v porovnání s ostatními přísadami jde i struktura matrice, která není natolik pórovitá. Vše je především způsobeno nízkým vodním součinitelem ($v/c = 0,25$), který v kombinaci se superplastifikátorem vytvoří dobře zpracovatelnou směs o uspokojivých konečných mechanických vlastnostech vzorků z ní vyrobených. Směs se pak poněkud blíží vysokohodnotným betonům, v tomto případě ovšem bez použití kameniva.

Smyslem třetí fáze a celkově i praktické části bylo nalezení takové matrice, která bude obsahovat recyklovaný beton a zároveň bude vykazovat dobré především tlakové pevnosti. Důvodem získání větších tlakových pevností vzorků oproti experimentu v bakalářské práci je plánované budoucí vylehčení matrice, čímž dojde ke zlepšení např. tepelně technických vlastností, ale zároveň k úbytku nejdůležitějšího parametru – tlakové pevnosti, proto vzorky z navržené kompozitní směsi musí mít jistou tlakovou rezervu. Z toho důvodu byly použity chemické přísady, které dopomohly k větším pevnostem v tlaku u vzorků ze směsi za přítomnosti recyklátu, který sloužil jako mikro plnivo a náhrada cementu.

Rozdíl mezi vzorky vyrobenými pouze z cementu a vzorky z cementu částečně nahrazeného jemně mletým recyklovaným betonem je nejvíce v úbytku tlakové pevnosti a dynamického modulu pružnosti. Je to způsobeno absencí části cementu, kterou sice nahrazuje recyklovaný beton schopný znovu chemicky reagovat, ale pouze v omezené míře. Dochází tak k situaci, kdy je cementu ve směsi méně, ale v mém případě stále dost na to, aby vzorky vykazovaly dobré mechanické vlastnosti. Obsah recyklátu ve směsi také snižuje objemovou hmotnost, protože jeho přítomnost ve směsi zvyšuje vodní součinitel, neboť jemně mletý recyklovaný beton má daleko větší nároky na vodu, a tak směsi s recyklátem mají pórovitější matrici a nižší objemové hmotnosti, což potvrzují i nižší hodnoty pevností v tlaku a modulu pružnosti (Hrůza 2016), (Topič et al. 2017).

Za zmínku také stojí vysvětlení, proč nebylo použito ve směsích kamenivo. Pro vynechání kameniva jsem se rozhodl na základě informací, které říkají, že kamenivo vždy představuje pevnější složku a k porušení dojde v cementovém tmelu (pastě), jenž kamenivo pojí. Problém s pevností kameniva nastává až v případě vysokohodnotných betonů (betony C 70/85 a výše), kdy je za potřebí použití kvalitního, hutného kameniva o vysokých pevnostech v tlaku. Dalším důvodem byla i výroba vzorků, neboť při použití kameniva by bylo zapotřebí vyrábět daleko větší vzorky, na které jsem nebyl kapacitně vybaven, a proto zde byl experiment zaměřen čistě na matrici, která případné kamenivo bude pojít.

Následující tabulka (Tab. 10) ukazuje porovnání mechanických vlastností vzorků z výzkumu Ing. Jaroslava Topiče (JT40) (Topič et al. 2017) a vzorků (BP_JH33 a BP_JH67) z mé bakalářské práce (Hrůza 2016), kde sice nebyla míra nahrazení cementu jemně mletým recyklátem 40 hm. %, ale je zde vidět určité srovnání.

Tab. 10: Porovnání výsledků s podobnými experimenty (stáří vzorků 28 dní).

Ozn.	Obsah recyklátu [hm. % cem.]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	E_{dyn} [GPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
BP_JH33 (Hrůza 2016)	33	1905 ± 11	19,0 ± 0,1	52,4 ± 2	3,5 ± 1,0
BP_JH67 (Hrůza 2016)	67	1787 ± 9	17,0 ± 0,1	17,0 ± 1	1,2 ± 0,2
JT40 (Topič et al. 2017)	40	1709 ± 4	14,4 ± 0,3	38,8 ± 1	2,9 ± 0,3
CRP3	40	1900 ± 15	19,0 ± 0,9	50,4 ± 6	6,2 ± 1,7
C.F-WL (Anastasiou et al. 2014)	50	2303 ± 4	22,7 ± 0,2	18,7 ± 3	2,3 ± 0,2
C.F-WS (Anastasiou et al. 2014)	50	2486 ± 5	22,7 ± 0,3	23,4 ± 3	2,7 ± 0,3
CRSP1.30 (Cartuxo et al. 2015)	30	2417 ± 6	-	61,3 ± 2	-
CRSP1.50 (Cartuxo et al. 2015)	50	2370 ± 6	-	58,5 ± 3	-
C30RSP (Evangelista & de Brito 2010)	30	-	34,2 ± 0,3	57,3 ± 2	3,7 ± 0,4

Podíváme-li se na porovnání s předchozím výzkumem Ing. Jaroslava Topiče (2017), který se zaměřil pouze na vliv jemně mletého recyklátu v kompozitech a jejich mechanické vlastnosti, zjistíme, že sada CRP3 dosáhla díky použití superplastifikační přísady P3 o minimálně 5 MPa vyšších tlakových pevností, což je asi o 11,5 % více než vzorky JT40 o stejném procentu (40 hm. %) nahrazení cementu. Podařilo se experimentálně ověřit vliv přísady P3 na cementovou pastu s jemně mletým recyklovaným betonem. Největší nárůst můžeme vidět u pevnosti v tahu za ohybu, kde byla naměřena skoro dvojnásobná pevnost

(6,2 MPa) oproti vzorkům JT40. Superplastifikátor P3 také způsobil větší objemovou pevnost vzorků, jejichž rozdíl činí necelých 200 kg/m³. Výsledky mechanických vlastností vzorků z bakalářské práce (BP_JH33 a BP_JH67) jsou uvedeny spíše pro orientaci, neboť vzorky s 33 hm. % recyklátu jsou na pevnost v tlaku odolnější než vzorky CRP3 se 40 hm. % recyklátu a plastifikační přísadou. Pokud by v experimentu nebyly použity chemické přísady, museli bychom se spokojit se směsí s 33 % náhrady cementu, neboť vzorky BP_JH33 a CRP3 mají velmi podobné tlakové pevnosti, ovšem vzorky CRP3 obsahují více recyklovaného betonu. Za přispění superplastifikátoru se tímto způsobem povedlo více nahradit cement recyklátem.

Dále ukazují porovnání s podobnými experimenty zahraničních autorů (Anastasiou et al. 2014), (Cartuxo et al. 2015), (Evangelista & de Brito 2010), kde si můžeme všimnout výrazně vyšších objemových hmotností, jenž je způsobeno použitím hrubého i jemného kameniva. Jedná se tedy o plnohodnotné betonové směsi. V tabulce vynechané údaje bohužel nebyly v člancích daných autorů uvedeny. Z výzkumu Anastasiou (2015) uvádím dvě směsi označené C.F-WL a C.F-WS. Jde o směsi, kde je cement CEM I 42,5 N z 50 hm. % nahrazen popílkem, jako kamenivo je použit recyklovaný beton a do směsi byla přidána plastifikační přísada. V případě vzorků C.F-WL bylo jemné kamenivo z recyklovaného betonu nahrazeno 20 hm % drceným vápencem, který byl použit jako jemné kamenivo. Naopak u vzorků C.F-WS bylo jemné kamenivo z recyklovaného betonu nahrazeno 20 hm % strusky, která byla použita jak jako hrubé kamenivo tak jako velmi jemné plnivo. Cartuxo (2015) prováděl experiment na směsích, ze kterých jsem pro porovnání vybral dvě nejvíce podobné. Experiment byl zaměřen podobně jako v mém případě na chování plastifikátoru v betonu vyrobeného z jemně mletého recyklovaného betonu. Jsou to směsi s náhradou přírodního kameniva 30 a 50 hm. % drceným recyklovaným betonem. Směsi obsahují cement, přírodní a recyklované betonové kamenivo a plastifikátor. Evangelista a de Brito (2010) zkoumali stejně jako Cartuxo směsi s náhradou přírodního jemného kameniva (písku) za drcený jemný recyklovaný beton. Vybral jsem směs, kde je přírodní písek z 30 hm. % nahrazen recyklovaným betonovým kamenivem o stejné frakci. Jako pojivo byl použit cement CEM 42,5 R. Do směsi byl také přidáván plastifikátor pro zlepšení zpracovatelnosti při zachování menšího vodního součinitele.

5 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na studium mnou navržených kompozitních směsí s využitím recyklovaného betonu a chemických přísad. V práci je popsán experiment, na jehož konci je jediná směs, která byla na základě provedených zkoušek, úvah a myšlenek vybrána jako nejideálnější. Ohledy byly brány především na možnou budoucí výrobu betonové tvárnice z vybrané směsi. V hlavní (třetí) fázi bylo vyrobeno celkem 8 sad po 6 vzorcích za použití třech chemických přísad (U1, U2, P3) a jemně mletého recyklovaného betonu. Sady pro možnost porovnání a zjištění vlivu recyklátu na přísady vždy tvořily dvojice směsí s/bez recyklátu a se stejnou přísadou.

Bodové vystižení experimentálních závěrů:

- Jemně mletý recyklovaný beton byl použit jako náhrada mikro plniva a částečně cementu.
- Míra nahrazení cementu 40 hm % jemně mletým recyklátem byla určena z nabytých znalostí z předešlých experimentů (Hrůza 2016).
- V první fázi byly zjištěné nejúčinnější přísady U1, U2, UP a P3.
- Vzorky s urychlovači U1, U2 a UP lze po 5 h „odformovat“.
- Vzorky se superplastifikátorem P3 je možno vyjmout z formy po 7 hodinách tuhnutí a tvrdnutí.
- Objemová hmotnost vzorků CRP3 (1900 kg/m^3) je přibližně o 150 kg/m^3 vyšší než u referenčních vzorků CR.
- K nejvyššímu nárůstu dynamického modulu pružnosti směsí dochází v prvních 7 dnech tvrdnutí. Nejvíce pak během 24 h.
- 40 hm. % recyklátu způsobí pokles dynamického modulu pružnosti ve 28 dnech u všech 24 vzorků s recyklovaným betonem o cca 4 GPa.
- Přidáním urychlovačů do směsi dochází k nepatrnému zvýšení vodního součinitele a tyto vzorky se jeví jako pórovitější.

- Sada CRP3 se ukázala jako ze všech nejlepší ve zkouškách pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Jedná se o nejpevnější testovaný kompozit.
- Doslova kontraproduktivním se stalo použití urychlovače U1, který má hodnoty dynamického modulu pružnosti E_{dyn} dokonce nižší než hodnoty referenčních směsí.
- V bakalářské práci byla navržena matrice s recyklovaným betonem splňující tlakovou únosnost zdiva navrženého vzorového objektu.
- Provedena modifikace základní matrice z bakalářské práce pomocí použití chemických přísad pro získání větších tlakových pevností.
- Navržená modifikovaná výsledná směs CRP3 může být použita pro výrobu betonové tvarovky, kterou je možno použít pro zdění obvodového zdiva „vzorového“ objektu.
- Navrženou modifikovanou výslednou maticí (směs CRP3) je možné pro dostatečnou tlakovou pevnost vylehčit např. jejím napěněním.

6 Seznam použité literatury

- Aïtcin, P.-C., 2005. *Vysokohodnotný beton*, CZ překlad., Praha: Informační centrum ČKAIT.
- Ajdukiewicz, A. & Kliszczewicz, A., 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), s.269–279.
- Anastasiou, E., Georgiadis Filikas, K. & Stefanidou, M., 2014. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. *Construction and Building Materials*, 50, s.154–161.
- ASTM E1876-01, 2006. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- Barbudo, A. et al., 2013. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 59, s.93–98.
- Bárta, R., 1961. *Chemie a technologie cementu*, Praha: Nakladatelství Československé Akademie VĚD.
- Bravo, M. et al., 2017. Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 153, s.129–138.
- Cartuxo, F. et al., 2015. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, s.36–47.
- Colleparidi, M., 1998. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), s.103–112.
- Cuenca-Moyano, G.M. et al., 2014. Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. *Construction and Building Materials*, 70, s.71–79.
- ČSN 73 1372, 2012. Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu.
- ČSN EN 1015-3, 2000. Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku).
- ČSN EN 197 –1, 2012. Ed.2, Cement – část 1: Složení specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.
- Dvorský, P., 2012. *Využití ultrazvukové impulsové metody - nástroj pro stanovení pevnosti cementů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- Evangelista, L. & de Brito, J., 2010. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), s.9–14.
- Hlaváč, J., 1981. *Základy technologie silikátů*, Praha: SNTL.
- Hrůza, J., 2016. *Design of masonry elements with use of recycled concrete*, Prague.
- Janowska-Renkas, E., 2015. The influence of the chemical structure of polycarboxylic superplasticizers on their effectiveness in cement pastes. *Procedia Engineering*, 108, s.575–583.
- Jedla, P., 2010. *Přísady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů*, Zlín.
- Jiménez, J.R. et al., 2013. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, s.679–690.

- Jirásek, J. & Vavro, M., 2008. *Nerostné suroviny a jejich využití*, Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- Ledesma, E.F. et al., 2014. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Computers and Chemical Engineering*, 71, s.289–298.
- Matějka, O., 2010. Cement a jeho současné podoby. *Realizace staveb*. Available at: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/cement-ajeho-soucasne-podoby>.
- Matias, D. et al., 2013. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44, s.101–109.
- Můj beton, 2017. Plastifikátory. Available at: <http://www.mujbeton.cz/plastifikatory>.
- Neno, C., Brito, J. De & Veiga, R., 2014. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production 2 . Literature Review 3 . Sequence of Testing. , 17(1), s.168–177.
- Neville, A.M., 2011. *Properties of Concrete, 5.ed*, New Jersey. Available at: <https://igitgeotech.files.wordpress.com/2014/10/properties-of-concrete-by-a-m-neville.pdf>.
- Pavlík, Z., 2013. Přednáška: Beton – vztah mezi strukturou a vlastnostmi (123MAI). Available at: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MI_beton.pdf.
- Pereira, P., Evangelista, L. & De Brito, J., 2012. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), s.722–729.
- Pereira, P., Evangelista, L. & de Brito, J., 2012. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), s.1044–1052.
- Procházka, J., 2015. Přednáška: Trvanlivost betonových konstrukcí. , s.1–37. Available at: http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_2_2015.pdf.
- Starý, J. et al., 2016. *Surovinové zdroje České republiky. Nerostné suroviny (stav 2015)*, Praha: Ministerstvo životního prostředí.
- Stroyres, 2017. Řez blokem betonu. Available at: <http://stroyres.net/beton/tyazhelyiy/klassyi-i-marki.html>.
- Sunnysoft s.r.o., 2017. Historie cementu. *Ebeton*. Available at: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-cementu>.
- Svoboda, L. et al., 2008. *Stavební hmoty*,
- Ščučka, J. & Martinec, P., 2013. *Stavební hmoty I - beton*, Ostrava.
- Šiler, P., 2009. *Studium vlivu chemických modifikujících přísad a příměsí na vlastnosti vysokohodnotných betonů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- Tegel, M., 2001. *Slévárenské formovací směsi s cementovými pojivy*, Praha: Vysoké učení technické v Brně.
- The Concrete Portal, 2017. THE CONCRETE PORTAL. Available at: http://www.theconcreteportal.com/cem_compn.html.
- Topič, J., Prošek, Z. & Plachý, T., 2017. Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste. *Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017)*, 236, s.7.

- Tu, T.-Y., Chen, Y.-Y. & Hwang, C.-L., 2006. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), s.943–950.
- Tůmová, V., 2008. *Pojivové systémy na bázi aluminasilikátů*, Brno: Fakulta strojního inženýrství.
- Veleba, O., 2008. Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu.
- Vetchý, J., 2015. Přísady do betonů a malt I. , s.5. Available at: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-i/>.
- Vinay Kumar, B.M., Ananthan, H. & Balaji, K.V.A., 2017. Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes. *Alexandria Engineering Journal*.
- Zajíček, M., 2008. Chemické přísady do betonu a malt _ . *ASB-portal.cz*. Available at: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/cihly-tvarnice/chemicke-prisady-do-betonu-amalt>.
- Zhao, Z. et al., 2015. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, s.179–186.
- Zongjin, L., 2011. *Advanced Concrete Technology*, New Jersey: John Wiley & Sons.

7 Seznam obrázků

Obr. 1: Zjednodušené schéma výroby cementu (Jirásek & Vavro 2008).	13
Obr. 2: Portlandský slínek v kulovém mlýnu (Matějka 2010).	14
Obr. 3: Cementárny v České Republice.	14
Obr. 4: Krystaly etringitu (C-S-A-H) a portlanditu (C-H) (Pavlík 2013).	17
Obr. 5: Schéma procesu hydratace a vývoj hydratačního tepla, převzato a upraveno (Tegel 2001).	18
Obr. 6: Složení cementů pro obecné použití, (ČSN EN 197 –1 2012).	20
Obr. 7: Makrostruktura betonu, řez betonovou dlaždicí (Stroyres 2017).	21
Obr. 8: SEM snímek cementové matrice při 20 °C, CH – portlandit, CSH) – kalcium silikát hydrát, CSAH – etringit, A – kamenivo, převzato z (Procházka 2015).	22
Obr. 9: Shlukování cementových zrn z důvodu rozdílných elektrostatických nábojů, směs bez plastifikátoru (Zajíček 2008).	28
Obr. 10: Princip působení plastifikátoru např. na bázi sulfonátů (Zajíček 2008).	29
Obr. 11: Schéma lignosulfonátu (Aïtcin 2005).	29
Obr. 12: Závislost vodního součinitele a rozlití čerstvého betonu s/bez superplastifikátoru, převzato a upraveno (Svoboda 2008).	30
Obr. 13: Funkce superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů (Zajíček 2008).	33
Obr. 14: Pevnost malty v tlaku vzhledem k množství recyklovaného kameniva (Neno et al. 2014).	35
Obr. 15: Pevnost malty v tahu za ohybu vzhledem k množství rec. kameniva (Neno et al. 2014).	35
Obr. 16: Elementární analýza EDS výsledků, vlevo směs s vodou nasyceným kamenivem a vpravo směs s kamenivem vysušeným (Zhao et al. 2015).	37
Obr. 17: Pevnost v tahu za ohybu s ohledem na poměr množství jemného recyklovaného a přírodního kameniva (Pereira et al. 2012).	40
Obr. 18: Modul pružnosti ve stáří 28 dní (Pereira, Evangelista & de Brito 2012).	41
Obr. 19: Vizualizace vzorového objektu (Hrůza 2016).	44
Obr. 20: Půdorys (studie) a schématický řez vzorového objektu (Hrůza 2016).	45
Obr. 21: Rozliv směsí v 1. fázi po 10 a 20 rázech.	51
Obr. 22: Rozlivy směsí ve 2. fázi.	53
Obr. 23: Rozlivy směsí ve 3. fázi.	54

Obr. 24: Měřicí sestava Brüel&Kjær (Hrůza 2016).....	55
Obr. 25: Měření základních vlastních frekvencí z podélného (vlevo), příčného (uprostřed) a kroutivého (vpravo) kmitání, B – budič (rázové kladívko), S – snímač, a – výška vzorku	56
Obr. 26: Měření základních vlastních frekvencí v laboratoři z podélného (horní řada), příčného (vlevo dole) a kroutivého (vpravo dole) kmitání (Hrůza 2016).....	56
Obr. 27: Provádění měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou v laboratoři.	57
Obr. 28: Schéma zkoušky třibodového ohybu (vlevo). Laboratorní testování (vpravo).....	58
Obr. 29: Schéma zkoušky pevnosti v tlaku (Hrůza 2016).....	59
Obr. 30: Zkouška pevnosti v tlaku přístrojem EV 40.	59
Obr. 31: Objemová hmotnost vzorků v 1. fázi (stáří 18 dní), směrodatné odchyly.	61
Obr. 32: Tlaková pevnost vzorků 1. fáze (stáří 18 dní), směrodatné odchyly.	62
Obr. 33: Objemové hmotnosti vzorků ve 2. fázi (stáří 24 h), směrodatné odchyly.	64
Obr. 34: Dynamický modul pružnosti z podélného měření (stáří 24 h), směrodatné odchyly. ..	65
Obr. 35: Objemová hmotnost vzorků (28 dní), směrodatné odchyly.....	66
Obr. 36: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z podélného kmitání, směrodatné odchyly.....	67
Obr. 37: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z příčného kmitání, směrodatné odchyly.	68
Obr. 38: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z podélného kmitání, směrodatné odchyly.....	69
Obr. 39: Dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) z příčného kmitání, směrodatné odchyly.	69
Obr. 40: Dynamický modul pružnosti měřený ultrazvukovou impulsní metodou (28 dní), směrodatné odchyly.....	70
Obr. 41: Dynamický smykový modul G_{dyn} (28 dní), směrodatné odchyly.....	71
Obr. 42: Pevnost v tahu za ohybu (28 dní), směrodatné odchyly.	72
Obr. 43: Vzorky porušené křehkým lomem při třibodovém ohybu.	73
Obr. 44: Pevnost v tlaku (28 dní), směrodatné odchyly.....	74
Obr. 45: Makrofotografie lomových ploch.	74

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Hlavní slínkové minerály běžného portlandského cementu (Svoboda 2008).	15
Tab. 2: Klasifikace pórů v hydratované cementové pastě (Pavlík 2013).	23
Tab. 3: Mechanické a fyzikální vlastnosti cementu CEM I 42,5 R,	47
Tab. 4: Chemické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R, převzato z technického listu výrobce	48
Tab. 5: Přehled použitých komerčních běžně dostupných přísad do betonu.	49
Tab. 6: Přehled složení směsí v 1. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.	51
Tab. 7: Přehled složení směsí ve 2. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.	52
Tab. 8: Přehled složení směsí ve 3. fázi, vztaženo na 1000 g suché směsi.	54
Tab. 9: Přehled hloubek vnoření jehly v závislosti na době tuhnutí směsí. Uvedeno v [mm].	63
Tab. 10: Porovnání výsledků s podobnými experimenty (stáří vzorků 28 dní).	77