

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyšetřování vlastností mladého betonu s přidavkem drcené pryže



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

K210 – Experimentální centrum

**Vyšetřování vlastností mladého betonu s přídavkem drcené
pryže**

**Investigation of early-age properties of the crumb rubber
concrete**

Bakalářská práce

Studijní program : Bakalářský

Studijní obor : Stavitelství

Autor : Martin Lukáš

Vedoucí práce : Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.

Akademický rok : 2017/2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lukáš	Jméno: Martin	Osobní číslo: 396676
Zadávací katedra: K 210 - Experimentální centrum		
Studijní program: R - Stavitelství		
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vyšetřování vlastností mladého betonu s přídavkem drcené pryže	
Název bakalářské práce anglicky: Investigation of early-age properties of the crumb rubber concrete	
Pokyny pro vypracování: Prozkoumání současného stavu poznání v oblasti betonů s přídavkem drcené pryže. Návrh experimentálního programu pro splnění cílů bakalářské práce, výroba vzorků pro experimentální ověření. Provedení experimentů, vyhodnocení a popsání základních mechanických vlastností. Závěr a shrnutí výsledků, popřípadě návrh na další bádání v dané oblasti. Seznam doporučené literatury: Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, Kunal Bisht, P.V. Ramana, 2017. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete, Osama Youssf et al., 2016. Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 3.10.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 5.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

3.10.2017	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu zdrojů.

Praha, 14. ledna 2018

Martin Lukáš

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce. Zároveň děkuji ostatním pracovníkům Experimentálního centra za ochotu a pomoc při zpracování experimentální části této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vyšetřováním základních vlastností mladé betonové směsi s přídavkem drcené pryže, jejíž hlavní použití bude v podobě stříkaného betonu v podzemních stavbách. Zároveň se věnuje využití pryžového odpadu a výrobě gumové drti. Na základě experimentálního programu byly navrženy a vyrobeny betonové vzorky s přídavkem drcené pryže různých frakcí a různého procentuálního zastoupení z celkového objemu směsi, na nichž pak byly zkoumány základní vlastnosti, zejména pevnost v tlaku. Výsledkem práce je porovnání vlastností s referenčním betonem a vyhodnocení výhod a nevýhod.

Klíčová slova : Pryž, gumový granulát, beton, stříkaný beton, betonová směs, vlastnosti, pevnost v tlaku, nárůst pevnosti

Abstract

The bachelor thesis deals with investigation of basic properties of a young concrete mixture with the addition of crumb rubber, whose main use will be in the form of shotcrete in underground constructions. At the same time it deals with the use of rubber waste and the production of rubber pulp. Based on the experimental program, concrete samples were designed and produced with the addition of crumb rubber of various fractions and a different percentage of the total volume of the mixture, on which basic properties, in particular compressive strength, were examined. The result of the work is the comparison of the properties with the reference concrete and the evaluation of the advantages and disadvantages.

Key words : Rubber, rubber granulate, concrete, sprayed concrete, concrete mix, properties, compressive strength, strength increase

Obsah

1.	Úvod.....	9
1.1	Motivace práce.....	9
1.2	Cíle práce.....	9
1.3	Rozsah práce	10
2.	Pryžový odpad.....	11
3.	Gumový granulát	12
3.1	Výroba gumového granulátu	12
3.2	Použití gumového granulátu	13
4.	Stříkaný beton.....	14
4.1	Historie	14
4.2	Současnost	15
4.3	Požadavky na mladý stříkaný beton.....	15
5.	Složky betonové směsi s drcenou pryží	17
5.1	Cement	17
5.2	Kamenivo.....	17
5.3	Voda	17
5.4	Příspěvky.....	18
5.5	Příměsi.....	18
5.6	Drcená pryž	18
5.7	Sorfix.....	19
6.	Vlastnosti betonové směsi s drcenou pryží	20
6.1	Zpracovatelnost.....	20
6.2	Hustota	20
6.3	Pevnost v tlaku	21
6.4	Pevnost v ohybu	21
6.5	Dynamické vlastnosti	21
6.6	Požární odolnost	22
6.7	Zmrazovací cykly	22

7.	Povrchové úpravy pryže.....	24
7.1	Mechanická úprava pryže	24
7.2	Voda	24
7.3	Hydroxid sodný (NaOH).....	25
7.4	Silany	25
7.5	Kyseliny.....	26
8.	Experimentální část	27
8.1	Návrh a složení směsí	27
8.2	Výroba vzorků	34
8.3	Zkoušení vzorků.....	35
8.3.1	Pevnosti v tlaku po 24 hodinách.....	35
8.3.2	Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin	37
8.4	Výsledky měření	38
8.4.1	Pevnost v tlaku po 24 hodinách.....	38
8.4.2	Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin	41
8.5	Vyhodnocení výsledků	42
8.5.1	Pevnost v tlaku po 24 hodinách.....	42
8.5.2	Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin	45
9.	Závěr	47
10.	Seznam zdrojů.....	48

Seznam obrázků

Obr. 1: Nelegální skládka pneumatik	11
Obr. 2: Složení pneumatiky	12
Obr. 3: Gumový granulát	13
Obr. 4: Ruční nanášení stříkané betonové směsi	14
Obr. 5: Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory [MPa]	16
Obr. 6: Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku	16
Obr. 7: Složky navržené betonové směsi	34
Obr. 8: Formy naplněné betonovou směsí	35
Obr. 9: Odbedněné betonové vzorky	36
Obr. 10: Zkouška pevnosti v tlaku.....	36
Obr. 11: Penetrometr	37

Seznam grafů

Graf 1: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 0 - 0,8 mm.....	42
Graf 2: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 3 mm.....	43
Graf 3: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 4 mm.....	43
Graf 4: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 4 mm.....	44
Graf 5: Shrnutí tlakových pevností všech použitých frakcí drcené pryže	44
Graf 6: Nárůst tlakových pevností (pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %)	45
Graf 7: Nárůst tlakových pevností (pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %; SORFIX).....	46

1. Úvod

1.1 Motivace práce

V dnešní době lidskou populaci nezajímá pouze kvalita a cena stavebních materiálů. Ve společnosti se klade stále větší důraz na smýšlení, jak nakládat s odpady, aby měly co nejmenší ekologický dopad, abychom minimalizovali škody a aby byla zajištěna co nejlepší kvalita životního prostředí i pro další generace. Proto je potřeba přemýšlet o využití průmyslového odpadu, který by mohl nahradit tradiční složky v betonových směsích. Již několik odborníků začalo zkoumáním betonu s přídavkem drcené pryže. Hlavním důvodem k tomuto badání určitě nebyl jen zvyšující se počet opotřebovaných pneumatik, které akorát zapříčiňují velký počet skládek a tím ničení krajinného rázu našeho okolí, ale i vidina nových směsí, které by v budoucnu, po důkladném probádání dané problematiky, mohly svými vlastnosti nahradit či překonat obyčejné betonové směsi. Oblast betonů s přídavkem drcené pryže je i dnes poměrně mladá a proto je stále v tomto oboru dál co objevovat a zkoumat.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je seznámení s obecným problémem pryžového odpadu, jeho recyklací a následným využitím v podobě gumového granulátu. Hlavním cílem předkládané práce je využití drcené pryže v mladém betonu, použitého v podobě stříkaného betonu v podzemních stavbách. Dále pak popis vlastností vyrobené směsi a snaha zachytit pozitivní i negativní vlivy na kvalitu betonové směsi s použitím gumového granulátu. Nedílnou součástí je experimentální program, kterým bude možné ověřit, jaký vliv má drcená pryž na vlastnosti betonové směsi. Zkoumána bude zejména pevnost v tlaku. Výsledkem bádání v rámci experimentálního programu je pak nalezení ideálního obsahu drcené pryže v betonové směsi, aby byly zajištěny nejlepší možné vlastnosti materiálu.

1.3 Rozsah práce

Práce se rozděluje na dva celky. První část je spíše teoretická a zaměřuje se na rešerši odborné literatury. Nejdříve se práce věnuje problému pryžového odpadu a s tím související výrobě gumového granulátu, který se následně aplikuje do betonových směsí v různém procentuálním zastoupení. Následuje část věnována obecnému popisu stříkaného betonu. Dále jsou popisovány základní vlastnosti betonových směsí s přídavkem drcené pryže a povrchové úpravy pryžových částic.

Druhá část předkládané práce je věnována experimentálnímu programu, ve kterém je popsán návrh, složení a výroba zkušebních vzorků, ve kterých bylo použito různých frakcí drcené pryže v různém procentuálním zastoupení. Dále tato část obsahuje informace o zkoušení vyrobených vzorků.

Závěr se pak věnuje pojednání o výsledcích a vyhodnocení této práce.

2. Pryžový odpad

V dnešní společnosti narůstá množství opotřebovaných pneumatik. Důvodem je rostoucí počet motorových vozidel. Některé odhady hovoří až o 10 milionech použitých pneumatik za rok. Tento údaj platí pouze pro Českou republiku. V celosvětovém měřítku se za rok nashromáždí až 1 miliarda opotřebovaných pneumatik. Přestože pneumatiky v celkovém objemu odpadů netvoří až tak velké zastoupení, jsou díky svému složení a chemické stabilitě velkou zátěží pro životní prostředí. Proto se nabízí otázka, co s tímto odpadem dělat. Od roku 2002 bylo u nás zakázáno skladování pneumatik na smetištích či skládkách. Přesto i tak můžeme po celé republice nalézt spousta nelegálních skládek pneumatik. Velkým nebezpečím těchto skládek je hrozba požáru a praktické nemožnosti hašení. Zároveň jsou zde velké nároky na objem skládky a problém představuje i pomalá biodegradace. Taktéž spalování pneumatik bylo v roce 2010 kvůli emisním limitům velmi omezeno. [1, 3]



Obr. 1: Nelegální skládka pneumatik [12]

Přístup k tomuto problému se nejen u nás za poslední dobu velice změnil. Vyřazené pneumatiky nejsou považovány za nechtěný odpad, ale společnost je vnímá spíše jako materiálový a energetický zdroj. Předpokladem pro snižování nelegálních skládek pneumatik je dobře vybudovaná síť oficiálních sběrných míst, ze které pak pneumatiky směřují k dalšímu zpracování a recyklaci. Financování sběru vyřazených pneumatik je mnohdy zahrnuto v pořizovací ceně pneumatiky. [1]

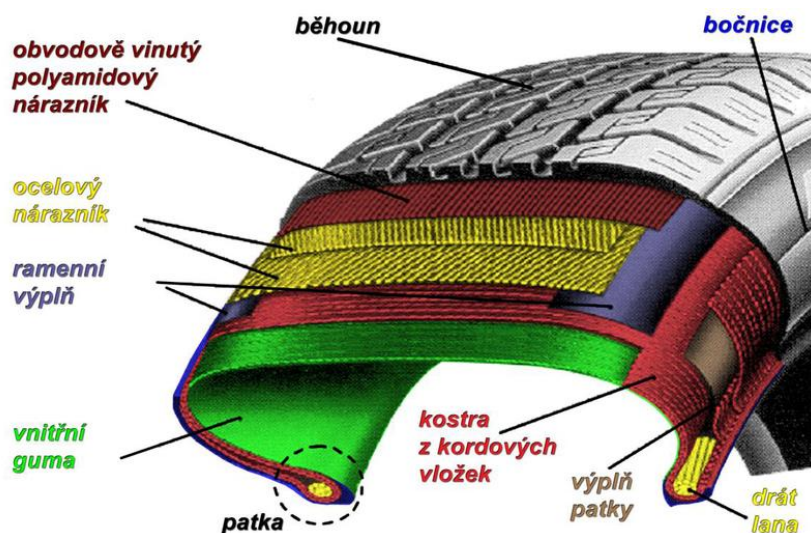
3. Gumový granulát

3.1 Výroba gumového granulátu

Gumový granulát má množství specifických termomechanických a fyzikálně-chemických vlastností. Jeho objemová hmotnost je velmi nízká a je trvanlivý. Jeho využití nalezneme v širokém spektru výrobků.

Při výrobě granulátu rozlišujeme dva základní postupy – mechanické drcení a kryogenní proces drcení.

Častější metodou je mechanické drcení. Magnetické separátory oddělí ocelové součásti pneumatiky. Patní lana z větších pneumatik (traktory, nákladní automobily) je potřeba ještě před procesem drcení odstranit. Mohli by mít negativní vliv na životnost nožů a zároveň celé drtící linky. Drcení je opakováno na různých drtících do té doby, než je získána požadovaná frakce gumového granulátu. [2]



Obr. 2: Složení pneumatiky [13]

Kryogenní proces je založen na zmrazení částečně rozdrčených pneumatik na velmi nízkou teplotu, která způsobí rozpad materiálu na velmi drobné částice. Ocelové součásti a lana se odstraňují podobným způsobem jako u mechanického drcení. Získání granulátu je rychlejší než u předchozí metody, zároveň je i čistější získání drobné frakce. Nevýhodou jsou pak náklady na chladičový proces, kde se využívá tekutý dusík.

Produktem obou metod drcení je gumový granulát různé velikosti, gumový prášek, podrcený textil, posekané kordové vložky a částice gumy spojené s textilem. V některých odvětvích je kladen důraz na čistotu gumového granulátu. Proto se tyto

nežádoucí částice odstraňují nejčastěji na vibračních sítích s odsáváním textilních vláken. U frakce 3 – 5 mm je vhodná elektrostatická separace, u níž je ale problémem cena technologie a náročnost na obsluhu. Existují i další způsoby oddělování nežádoucích částic z gumového granulátu, avšak nejsou tak hojně používány. [2]



Obr. 3: Gumový granulát [14]

3.2 Použití gumového granulátu

Automobilový průmysl používá drcenou pryž na výrobu nárazníků, jako plnivo do nových pneumatik, na výrobu podlahových koberečků, těsnících pásek do okének, třecích částí brzd, apod. Jemná gumová drť může být využita jako filtrační medium při biofiltraci prchavých látek z ovzduší. Také lze využít drcenou pryž v oblasti zemědělství jako tepelnou izolaci pro kořenový systém rostlin, materiál omezující růst plevelu, atd. Ve sportovním odvětví jsou typickým příkladem využití gumového granulátu hřiště s umělou trávou.

Ve stavebnictví se drcená pryž používá zatím jen okrajově a největšího využití můžeme nalézt v dopravních stavbách v podobě protihlukových bariér, gumových rohoží pro zpevněné parkovací plochy a v neposlední řadě i pro zpevnění železničních přejezdů, které zabezpečují plynulý přejezd vozidel. Gumový granulát slouží též jako přísada do asfaltových (gumoasfalt) a betonových směsí (gumobeton). Právě betonové směsi s přídavkem drcené pryže se věnují další části této práce. [2]

4. Stříkaný beton

4.1 Historie

Do povědomí se pojem stříkaný beton dostal již počátkem 20. století. První zařízení pro aplikaci suchého stříkaného betonu bylo sestrojeno roku 1907 ve Spojených státech amerických. Firma Cement – Gun Company získala patent na anglický název „Gunité“, nebo-li stříkaná malta. Složení tehdy používané směsi obsahovalo mimo jiné jemné kamenivo a vysoký podíl cementu. V dnešní době se výraz „stříkaný beton“ používá pro směs, která obsahuje cement a kamenivo a je nanášena nástřikem.

Rozlišujeme dvě základní technologie pro nanášení stříkaných betonů :

Mokrý způsob nástřiku (mokrý cesta) - suchá betonová směs se smísí s vodou před umístěním do čerpadla, dále se pak ve stavu mokré směsi dopravuje hadicemi do trysky. Urychlovací přísada je dávkována zvlášť

Suchý způsob nástřiku (suchá cesta) - způsob, kdy se voda do betonové směsi dostává až v komoře před tryskou. Velmi často je součástí vody i urychlující přísada.



Obr. 4: Ruční nanášení stříkané betonové směsi [15]

Z počátku vývoje byla používána pouze suchá cesta. Technologie mokrého způsobu nástřiku si našla své uplatnění až po 2. světové válce. Ačkoli dříve se využívalo více suchého procesu, postupem času převažuje spíše mokrý způsob nástřiku, který zastupuje zhruba 70 % veškerého objemu prováděných stříkaných betonů. Zároveň se

upouští od ručního nanášení stříkané betonové směsi a využívá se nástřiku směsi pomocí manipulátoru. [4]

4.2 Současnost

Stříkaný beton zastává funkci hlavního materiálu primárního ostění při ražbách tunelů pomocí NRTM (Nová rakouská tunelovací metoda – nerazí se celý profil tunelové trouby v kuse, ale postupuje se po částech). Nastříkaná betonová vrstva, která obsahuje další výztužné prvky, je nezbytná pro zajištění stability nevystrojeného výrubu. Pro tento účel je velice důležité kvalitní složení betonové směsi. V některých případech je stříkaný beton využíván jako konstrukční materiál definitivního ostění. Tento materiál ale nenachází opodstatnění pouze v podzemních stavbách, ale je používán např. pro zajištění stability svahů, stěn, sanace, apod.

Postupem času se změnila i kvalita technického vybavení pro nanášení betonové směsi. Zároveň se začalo používat i kvalitnějších materiálů pro danou směs. Díky tomu je dnes možné vyrábět a nanášet stříkané betony, jejichž výsledná pevnost v tlaku může přesahovat až 80 MPa. Během vývoje se zjistilo, že stříkaný beton splňuje požadavky kladené na monolitický beton a i díky tomu může být používán na výsledné konstrukce s dlouhou životností. [4]

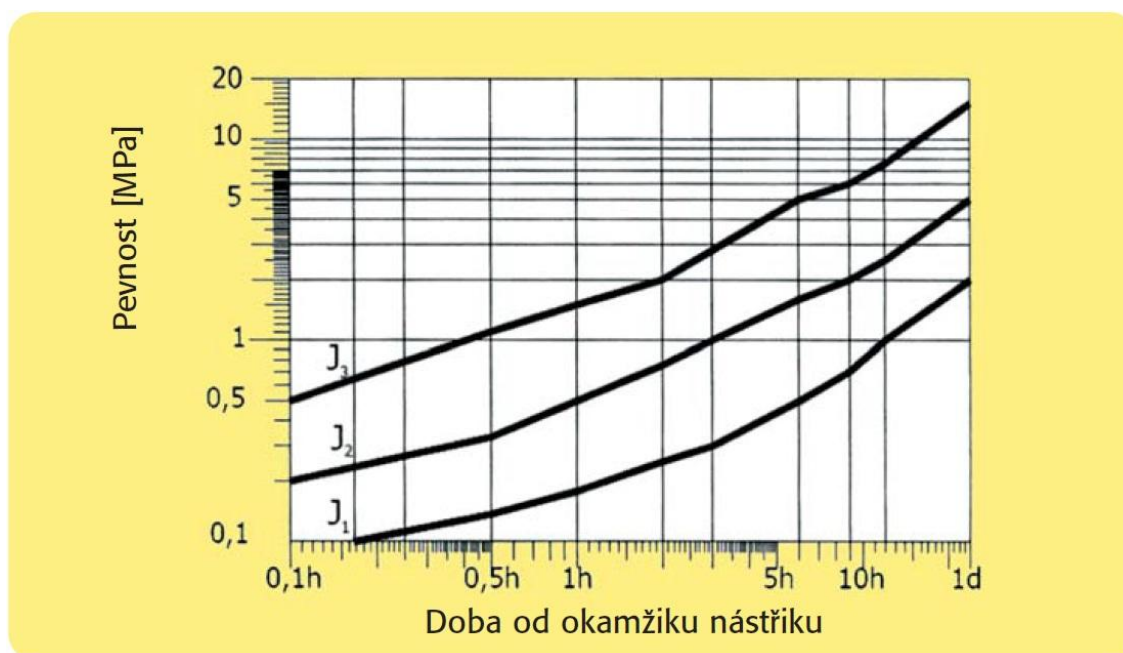
4.3 Požadavky na mladý stříkaný beton

Mladý stříkaný beton znamená beton do 24 hodin stáří od kontaktu pojiva s vodou. Z hlediska požadavků na pevnost a kvalitu rozdělujeme mladý beton do třech oborů – J1; J2; J3. Nárůst pevnosti v prvních minutách je velice důležitý z hlediska stability nanášené vrstvy na připravený podklad. Toto se děje zejména při nanášení velkých tloušťek vrstvy nebo při nanášení stříkaného betonu na převislé konce. Na druhou stranu i rychlý nárůst pevnosti není úplně ideálním řešením. Pokud beton hned po nanesení ztuhne, hrubší částice z dalšího proudu se již nemohou dobře uložit a tím se neudrží na povrchu. Rychlý nárůst pevnosti v prvních minutách je výhodou v prostředí, kde proudí větší množství vody nebo tam, kde se nevyskytuje stabilní podklad. Zároveň je ale nutno počítat s vyšším spadáváním nanášené vrstvy. Nárůst pevnosti do 1 MPa se měří penetrační jehlou. Vyšší pevnosti se pak v laboratorním

prostředí zjišťují na zkušebních tělesech za pomoci lisu. V praxi se většinou prokazuje nárůst pevnosti od 6 minut do 6 hodin a poté pevnost po 24 hodinách. Pevnosti po 9 a 12 hodinách se prokazují jen ve zvláštních případech, např. u mělkých tunelů při bezprostředním zatížení nadloží.

Obory	Doba po nástřiku									
	6 min.	10 min.	30 min.	1 hod.	2 hod.	3 hod.	6 hod.	9 hod.	12 hod.	24 hod.
J1	0,10	0,14	0,18	0,25	0,30	0,50	0,70	1,00	2,00	
J2	0,20	0,25	0,33	0,50	0,75	1,00	1,60	2,00	2,50	5,00
J3	0,50	0,75	1,10	1,50	2,00	2,80	5,00	6,00	7,50	15,00

Obr. 5: Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory [MPa] [4]



Obr. 6: Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku [4]

Stříkaný beton oboru J1 je vhodný pro nanášení směsi v tenkých vrstvách na suchý podklad a bez zvláštních statických požadavků na nárůst pevnosti v prvních hodinách po nástřiku.

Stříkaný beton oboru J2 se hodí tam, kde je požadováno rychlé nanesení v silných vrstvách, při přítocích podzemní vody a při následném působení dalších pracovních kroků (kotevní vrty, zahánění pažin, jehlování, atd.).

Stříkaný betonu oboru J3 má využití pouze ve výjimečných případech, např. v silně porušené hornině či při silném přítoku podzemní vody. [4]

5. Složky betonové směsi s drcenou pryží

5.1 Cement

Ve stříkaném betonu slouží cement jako pojivo. Na výslednou kvalitu betonové směsi má především vliv typ a množství cementu. U nás jsou do stříkaných betonů nejčastěji používány portlandské cementy vyšších pevností, např. CEM II 42,5 R. Dávkování cementu je obvykle voleno mezi 370 až 450 kg/m³. [4]

5.2 Kamenivo

Kamenivo slouží v betonové směsi jako plnivo. I zde je pro výslednou pevnost a trvanlivost betonové směsi důležitá kvalita použitého kameniva. Při návrhu receptury je potřeba vycházet z dostupného kameniva, které podléhá minimálním dopravním nákladům. V souvislosti s kamenivem rozlišujeme dva výrazy. Pokud je použito kamenivo s velikostí zrn do 4 mm, pak se směs označuje jako „stříkaná malta“. Kamenivo se zrny většími než 4 mm pro směs označovanou jako „stříkaný beton“. Ve výsledné kvalitě navržené směsi hraje nemalou roli i dodržení optimální křivky zrnitosti, ve které má hlavní význam obsah a vlastnosti jemných frakcí. Problémem pro stříkaný beton je kamenivo větších frakcí, proto by směs neměla obsahovat více jak 10 % zrn větších než 8 mm. Velká zrna odpadávají při stříkání na tvrdé plochy, poškozují již nanesenou předchozí vrstvu, způsobují deformace či vibrace výztuže a také jsou nebezpečná pro přítomné pracovníky. Obecně by zrna pro stříkaný konstrukční beton neměla překročit velikost 10 – 12 mm. [4]

5.3 Voda

Dalším důležitým faktorem pro výslednou kvalitu je poměr vody a cementu dané betonové směsi. Pokud je dávkování příliš nízké, hrozí nadměrná prašnost. Naopak pokud je dávkování příliš vysoké, nanášená směs špatně drží na podkladu a hrozí její stékání. V případě správného dávkování je zajištěno jen velmi malé kolísání vodního součinitele (poměr vody a cementu), jehož hodnota není vyšší než 0,5. Množství vody lze korigovat přidáním některé přísady zajišťující lepší zpracovatelnost čerstvého betonu. [4]

5.4 Přísady

Urychlovače : V případě stříkaných betonů jsou přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí ve většině případů nezbytné. Zkracují dobu tuhnutí a tvrdnutí, což znamená rychlejší nárůst počáteční pevnosti. Vzhledem k této skutečnosti lze aplikovat vrstvy v tloušťkách větších než 10 cm a jednotlivé vrstvy mohou být na sebe nanášeny v kratším intervalu. Rychlý nárůst počáteční pevnosti je v podzemních stavbách nutnou podmínkou pro bezpečnou ražbu. Více používané jsou urychlovače nealkalické, které oproti alkalickým urychlovačům nevykazují žádné hygienické, ekologické ani technologické nebezpečí a zároveň mají minimální vliv na snížení výsledné pevnosti betonové směsi. Urychlující přísady musí být sladěny s použitým typem cementu – ověření snášenlivosti. Dávkování urychlovačů může být v práškové nebo tekuté formě. Tekutá forma má navíc tu výhodu, že při jejím použití nevzniká dráždivý prach. [4]

Plastifikátory : V betonové směsi mají vodoredukující účinky. Při jejich použití je snížen objem vody zhruba o 10 % a je nahrazen plastifikační přísadou, která zaručí lepší přilnutí cementu k plnivu a zároveň i lepší zpracovatelnost. Zároveň ale není ovlivněna výsledná pevnost betonové směsi. [5]

5.5 Příměsi

Mikrosilika : Stále častěji používanou příměsí do stříkaných betonu je mikrosilika. Tato látka obsahuje velký podíl SiO_2 , díky němuž jsou vyplněny póry v betonu. Použitím této příměsi se zlepšují vlastnosti betonové směsi. Jedná se hlavně o vyšší pevnost a hutnost. Zároveň se zvyšuje lepivost a při optimálním použití mikrosiliky dochází ke snížení spádu až o 50 %. Dávkování může být ve formě suspenze nebo prášku. Ideální dávka pevných složek mikrosiliky se pohybuje v rozmezí 2 až 8 % hmotnosti cementu. V experimentální části této práce mikrosilika použita nebyla. [4]

5.6 Drcená pryž

Gumová drť slouží ve stříkaných betonech jako plnivo, které z části nahrazuje kamenivo. Velký vliv na výsledné vlastnosti má zvolená frakce a množství gumového granulátu. Ovlivněna je pak zpracovatelnost a výsledná pevnost směsi. Problém také

představuje špatná přilnavost k cementu. Toto lze ale řešit modifikací gumové drti v podobě plastifikátorů do betonové směsi. Modifikace gumové drti je závislá na velikosti granulátu a hlavně na modifikátoru, který by měl být zvolen tak, aby zajistil co nejlepší vaznost gummy na cement. Podrobnější vlastnosti betonu s přídavkem drcené pryže budou popsány v další kapitole. [8]

5.7 Sorfix

Sorfix je komerční název pro bezslínkové hydraulické pojivo, v našem případě nahrazující část objemu cementu. „Vzniká smíšením fluidního popílku ze spalování uhlí s mletým vápencem, který obsahuje kromě hlinitokřemičité látky také nejméně 2 % hmotn. volného CaO a nejméně 2 % hmotn. CaSO_4 , nebo jeho směsi s látkami vybranými ze skupiny tvořené křemičitým úletovým popílkem a Ca(OH)_2 , se záměsovou vodou obsahující plastifikátor pro zlepšení reologických vlastností v koncentraci 0,2 až 3 % hmotn., vztaženo na hmotnost fluidního popílku spočívá podle vynálezu v tom, že se fluidní popílek ze spalování uhlí s mletým vápencem umele na měrný povrch 350 až 650 m^2/kg . Záměsová voda se mísí s umletým fluidním popílkem nebo s jeho směsí v hmotnostním poměru 0,2 až 0,65.“ [11]

V rámci rozsáhlých experimentů bylo zjištěno, že mletí fluidního popílku se projevuje na zlepšení vlastností pojiva. Pro dobrou zpracovatelnost kaší je potřeba nižšího vodního součinitele než u nemletého fluidního popílku. Toto se projeví hlavně zvýšením pevnosti směsí hned po zatvrdnutí. Taktéž se zkracuje doba míchání kaší. Směsi obsahující mletý fluidní popílek dosahují vysokých pevností při tvrdnutí i v rozmezí teplot 15 až 25°C. Vzhledem k tomuto není potřeba hydrotermálních procesů pro zvýšení počátečních pevností.

Zároveň je nutné dodat, že pro zpracování mletého fluidního popílku je nutné použití plastifikátorů (sulfonový melamin, polymery fosfonátů, polymery polykarboxylátů). [11]

6. Vlastnosti betonové směsi s drcenou pryží

Vlastnosti betonových směsí s přidavkem drcené pryže ovlivňuje několik faktorů, ke kterým řadíme množství použitého granulátu, velikost zrn drcené pryže, modifikaci gumy, velikost zrn ostatního plniva, použité pojivo, apod. Přídavek drcené pryže do betonové směsi nepochybně mění některé fyzikální a chemické vlastnosti dané směsi. Již několik odborníků se vlastnostem gumobetonu věnovalo, avšak poznatků k tomuto tématu není zatím mnoho a navíc nejsou dlouhodobě ověřeny.

6.1 Zpracovatelnost

Gupta a kol. [6] provedli studii, při které nahrazovali malé frakce plniva betonové směsi drcenou pryží jemné frakce (0,15 – 1,9 mm). Nahrazení části plniva zkoumali od 0 % - 20 % v krocích po 5 %. Došli k závěru, že se zvyšujícím obsahem drcené pryže klesá i zpracovatelnost směsi. Tento fakt potvrzuje i další studie, kterou provedli Oikonomou a Marida [6]. Ti uvádějí, že v případě zvýšení obsahu gumového granulátu v betonu o více jak 15 %, dochází k výraznému snížení zpracovatelnosti směsi. Zpracovatelnost ovšem záleží i na velikosti frakce přidávané pryže. Potvrzuje se fakt, že čím jemnější gumový granulát, tím hůře se směs zpracovává. [6]

6.2 Hustota

Se zvyšujícím obsahem gumové drti se snižuje i objemová hmotnost betonu. Důvodem je hlavně nižší objemová hmotnost drcené pryže oproti kamenivu. Dalším důvodem snižující se objemové hmotnosti je horší vaznost gumy na cementovou kaši. Díky tomu vzniká ve směsi větší množství pórů než když je použito pouze kamenivo jako plnivo. K. Bischt a P.V.Ramana [6] provedli studii, ve které bylo zjištěno, že při nahrazení kameniva 5,5 % drcené pryže klesne objemová hmotnost zhruba o 10 % oproti betonu bez gumové drti. Podobný pokles objemové hmotnosti popisuje i Pelisser a kol., který při použití 5 % gumového granulátu udává snížení hustoty o 13 %. Tento údaj ale také závisí na konkrétní receptuře betonové směsi. [6]

6.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku patří mezi nejvíce sledované vlastnosti gumobetonu. Bohužel právě se zvyšováním obsahu gumové drti v betonu pevnost v tlaku klesá. Proto je třeba tento druh betonu využívat pouze tam, kde nejsou extrémní požadavky na tlakovou únosnost materiálu konstrukce.

Ve studii, kterou provedli K. Bischt a P.V.Ramana [6] bylo potvrzeno, že se zvyšujícím obsahem drcené pryže klesá pevnost v tlaku. V jejich situaci se jednalo o nahrazení části plniva 4 % a 5,5 % drcenou pryží. V prvním případě došlo ve srovnání s obyčejným betonem k poklesu pevnosti v tlaku zhruba o 4 %, v případě druhém se jednalo o pokles zhruba 18 %. Pokles síly je způsoben nedostatkem adheze mezi pryží a cementovou kaší. Zároveň i díky většímu množství pórů obsažených ve směsi. Tyto dvě skutečnosti zapříčiňují rychlejší prasknutí betonu a tím menší únosnost. [6]

6.4 Pevnost v ohybu

V předchozí studii byla zkoumána též pevnost v ohybu. Bohužel i u této vlastnosti dochází ke snižující se tendenci s rostoucím obsahem drcené pryže. Při obsahu 4 % gumové drti ve směsi se působící síla snížila o 3 %, v případě obsahu 5,5 % drcené pryže došlo ke snížení síly o 17 %. Vliv na ohybovou pevnost má i velikost gumových částic, které se do betonu přidávají. Hladká struktura pryže vede k většímu šíření trhlin při zatěžování a tím ke snižující se ohybové pevnosti. [6]

6.5 Dynamické vlastnosti

Experiment, který provedli W. H. Waddell a L. R. Evans [8], zkoumal dynamické vlastnosti na směsích, které obsahovaly 3,5 % a 5 % gumových částic. Hodnoty pak byly porovnány s hodnotami referenčního betonu. Bylo zjištěno, že přidáním drcené pryže do betonu se zvýší dynamický modul pružnosti a zvyšuje se disipační energie. Z tohoto důvodu je gumobeton velice vhodným materiálem pro vstřebávání nárazů. [8]

6.6 Požární odolnost

F. Hernandez – Olivares a G. Barluenga [9] provedli experiment, který měl ukázat, jak se bude chovat vysokopevnostní beton s přidavkem gumových vláken při zatížení vysokou teplotou. Problémem vysokopevnostního betonu při požáru jsou vystřelující úlomky. Toto je většinou způsobeno hlavně únikem par a nepropustností již zmiňovaného betonu. Bylo zkoumáno, zda tomuto problému dokážou zabránit gumová vlákna o délce 85 – 215 mm, která by měla otevřít póry v betonu a tím zajistit průchod páry ven z konstrukce. Podíl gumových vláken v jednotlivých směsích byl stanoven na 3%, 5% a 8%. Toto procentuální zastoupení by mělo ve vzorcích zajistit dostatečný průchod páry ven z konstrukce a zároveň minimálně snížit pevnost.

Chování betonu bylo zkoumáno na kvádrech o rozměrech 200 mm x 300 mm x 50 mm. Tyto vzorky byly zatěžovány teplotou 1000°C. Výsledky byly porovnány s chováním vysokopevnostního betonu neobsahujícího gumová vlákna.

V rámci tohoto experimentu bylo zjištěno, že u vzorků s obsahem pryžových vláken nedochází k vystřelování úlomky a zároveň se snižuje průhyb.

Použití gumových vláken do vysokopevnostního betonu je výhodné, protože při použití 3% pryže klesá pevnost jen minimálně, ale požární odolnost se zvyšuje. [9]

6.7 Zmrazovací cykly

Velký vliv na životnost a trvanlivost stavby má i odolnost proti mrazu. Mezi odborníky neexistuje jednotný názor, jak k porušení konstrukcí při působení mrazu dochází. Základní teorií může být fakt, že k narušení struktury konstrukce dochází z důvodu zvětšení objemu vody při změně skupenství na led. Nárůst tohoto objemu činí zhruba 10 %. [10]

V minulosti byla provedena studie, která měla zajistit větší životnost staveb vystaveným zmrazovacím cyklům, aby byla minimálně snížena jejich pevnost. Tento typ zatěžování je typický pro náš druh podnebí, jelikož se zde cykly střídají a bývají tak častou příčinou narušení konstrukcí.

Pro zkoušku byly vytvořeny tři směsi – prostý beton, beton s gumovou drtí omytou ve vodě a beton s drcenou pryží neomytou ve vodě. Dávka gumových částic byla 0,6 %, nebyly tedy použity jako nahrazení kameniva, ale jako přísada. Zkoumána

byla pevnost v tlaku jak před zmrazovacím cyklem, tak i po něm. Z výsledků bylo patrné, že beton s gumovými částicemi neomytými ve vodě utrpěl menší ztrátu pevnosti než beton prostý. Ještě lépe dopadl beton s gumovými částicemi omytými ve vodě. Ten vykazoval pevnost o něco vyšší. Důvod je takový, že při omytí gumy vodou se sníží její hydrofobní vlastnosti a tím lépe přilne k cementové pastě. Některé vzorky obyčejného betonu byly zmrazovacími cykly natolik porušeny, že je nebylo možné podrobit tlakové zkoušce.

Přidáním gumové drti do betonové směsi bylo zjištěno, že dochází k vyšší odolnosti betonu před zmrazovacími a rozmrazovacími cykly. [8]

7. Povrchové úpravy pryže

Problém v oblasti gumobetonů je zhoršování jejich důležitých mechanických vlastností. Jedná se především o tlakovou a ohybovou pevnost. Hlavním důvodem jsou rozdílné moduly pružnosti gumových částic (cca 1 MPa) a referenčního betonu (cca 20000 MPa). Zrna drcené pryže pak působí v betonu jako póry a proto výsledné vlastnosti gumobetonu nabývají menších hodnot než beton bez přídavku gumových částic. Dalším důvodem je špatná vaznost gumových částic na cementovou kaši. Tím vzniká v betonové směsi ještě větší množství nevyžádaných pórů, které pak dále zhoršují výslednou pevnost materiálu. Konstrukce není schopna odolávat takové síle, jako konstrukce bez přídavku gumové drtě, bez pórů. Důvodem špatného spolupůsobení pryže s cementovou pastou jsou její hydrofobní vlastnosti. Způsobů, jak tyto možnosti omezit, je nespočet. První možností je úprava betonové směsi jako celku (mikrosilika, speciální plastifikátory, plnivo, atd.) Pokud ovšem chceme zachovat původní složení betonové směsi, je vhodnější zvolit druhou možnost, při které se ošetřuje pouze drcená pryž. [9]

7.1 Mechanická úprava pryže

Nejobyčejnější způsob je povrchová úprava gumových částic, při které se zdrsní povrch zrn pryže, aby se dosáhlo lepšího spolupůsobení s cementovou pastou. Toto vzniká již v procesu výroby při mechanickém získávání gumového granulátu. V případě kryogenního procesu je povrch zrn hladký a dodatečné zdrsnění získaných zrn by bylo technologicky velmi náročné. [9]

7.2 Voda

Hydrofobní vlastnosti gumových částí můžeme snížit omýváním vodou nebo přímo naložením drcené pryže do vodní lázně. Ještě lepšího účinku dosáhneme v kombinaci s mechanickou úpravou, např. kartáčem. Guma díky tomu sníží své povrchové napětí a tím bude zajištěno lepší spolupůsobení. Před samotným přidáním gumových částic do betonové směsi musí být pryž vysušená, aby nebyla změněna navržená receptura a aby došlo k dobrému navázání cementu na gumová zrna. [9]

7.3 Hydroxid sodný (NaOH)

V rámci experimentu, který provedli Osama Youssf, Julie E. Mills a Reza Hassanli [7], bylo zkoumáno, jaký vliv na výslednou pevnost má ošetření gumových částic hydroxidem sodným (NaOH). Pro tyto účely byly vyrobeny vzorky, které obsahovaly gumové částice neošetřené NaOH, dále vzorky obsahující částice, které byly ponořeny v hydroxidu sodném 0,5; 1 a 2 hodiny. Zároveň byla vyrobena směs bez obsahu drcené pryže.

Zkoumána pak byla tlaková pevnost po 7 a 28 dnech stáří. Výsledky ukazují, že pevnost v tlaku směsi, neobsahující částice ošetřené NaOH, poklesla oproti obyčejnému betonu o 30 % a 33 % u 7 a 28 dnů stáří. Nejúčinnějším řešením se ukázala směs, která obsahovala pryž naloženou v hydroxidu sodném 0,5 hodiny. Tato směs dokázala s porovnáním směsi s neošetřenými částicemi navýšit svou pevnost v tlaku o zhruba 15 % a 17 % u 7 a 28 dnů stáří. Nicméně oproti obyčejnému betonu vykazovala pevnost menší zhruba o pětinu. Směsi obsahující gumovou drť naloženou v NaOH 1 a 2 hodiny vykazovaly nižší pevnosti než směs obsahující částice naložené v hydroxidu sodném 0,5 hodiny.

Bylo zjištěno, že nejideálnějším řešením je naložení částic do hydroxidu sodného na 0,5 hodiny. Roztok povrch gumových zrn naruší, vytvoří hrubší strukturu. Tím je dosaženo větší vaznosti mezi cementovou pastou a gumovými částicemi a tím se i zvýší tlaková pevnost. Naložení drcené pryže do NaOH na delší dobu zapříčiňuje větší proniknutí roztoku do struktury zrn, tím je snížení jejich tuhost a zároveň tuhost výsledného betonu jako celku, což se podepíše i na snížení tlakové pevnosti. [7]

7.4 Silany

Silan (SiH_4) je chemická sloučenina podobná metanu, kde uhlík je nahrazen křemíkem. Tato látka má schopnost vázat se na skupinu OH, která se nachází na povrchu betonu a tím je zajištěno lepší spolupůsobení betonu s pryží.

Na univerzitě v Tennessee byli provedeny zkoušky betonu s přídavkem drcené pryže, kde pro zajištění lepší vaznosti gummy na cementovou kaši, byly použity již zmiňované silany.

Sloučeniny silanu se rozmíchají v etylalkoholu v poměru 1:1, dále se přidají gumová zrna a celý roztok se zahřívá na 80°C po dobu 30 minut. Poté se zchladí na pokojovou teplotu. Dále je nutné takto vzniklou směs propláchnout alkoholem a sušit 12 hodin na teplotu 110°C. Pryžová zrna se pak obalí v cementu. Po hydrataci se pak vytvoří kolem gumového zrna betonová krusta, jejíž spojení je zajištěno právě pomocí silanových sloučenin.

Pro experiment byly vyrobeny směsi bez obsahu gumových částic (referenční beton), s obsahem 15% a 30% gumových částic ošetřených silanovými sloučeninami a s obsahem 15% a 30% neošetřených gumových částic.

Výsledky ukázaly, že ošetření pryže silanovými sloučeninami zlepšilo pevnost v tlaku celé betonové směsi. Vzorky s obsahem 15% ošetřených gumových částic vykazovaly pevnost v tlaku po 28 dnech pouze o 10% nižší v porovnání s referenčním betonem, zatímco vzorky s obsahem 15% neošetřených gumových částic měly pevnost v tlaku nižší až o 30%. [9]

7.5 Kyseliny

J. E. Mark a B. Erman [9] popisují chování gumových částic po ošetření kyselinou sírovou. Povrch pryžových částic je vysoce hydrofobní díky stearanu zinečnatému, který se na povrchu nachází. Při působení kyseliny sírové se změní na kyselinu stearovou. Tato kyselina se dále neutralizuje hydroxidem sodným (NaOH) a nakonec se gumové částice propláchnou destilovanou vodou. Díky tomuto procesu se minimalizují hydrofobní vlastnosti povrchu gumových částic a tím je dosaženo lepší vaznosti pryže na cementovou kaši.

Ovšem použití kyseliny sírové v betonu je velmi rizikové a mělo by být podloženo dlouhodobými výzkumy, kterých v dnešní době zatím není mnoho. Proto je tato technologie relativně omezena. [9]

8. Experimentální část

V rámci experimentální části této práce byly vyšetřovány vlastnosti mladé betonové směsi s přídavkem drcené pryže, která bude použita jako stříkaný beton pro primární ostění v podzemních stavbách. Největší důraz byl v tomto případě kladen na pevnost v tlaku po 24 hodinách od betonáže, což bylo hlavní náplní mé výzkumné činnosti. Na pracovišti ČVUT bylo vyrobeno více než 180 vzorků různých betonových směsí, na kterých bylo zkoumáno, jaký vliv bude mít přídavek drcené pryže na výslednou pevnost v tlaku. Pro tyto účely byla použita pryž čtyř různých frakcí (0 - 0,8 mm; 1 - 3 mm; 1 - 4 mm; 3 - 6 mm), kterou bylo v jednotlivých vzorcích nahrazováno kamenivo v krocích 2,5 %; 5 %; 7,5 %; 10 % a 12,5 % hm. kameniva. Výsledné hodnoty byly pak porovnávány s hodnotami pevnosti v tlaku obyčejného betonu bez přídavku drcené pryže (referenční beton). Zároveň byly během experimentální činnosti vybrány vzorky s přídavkem gumových částic frakce 1 - 4 mm s nahrazením 5 % hm. kameniva, na kterých byl zkoumán nárůst pevnosti v průběhu 24 hodin. Naměřené hodnoty pak byly porovnávány s jednotlivými obory nárůstu pevnosti pro mladé stříkané betony.

8.1 Návrh a složení směsí

Pro měření pevnosti v tlaku po 24 hodinách byly jednotlivé betonové směsi navrženy tak, aby z nich bylo možno vyrobit 7 až 8 vzorků. Zkoumání nárůstu pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin bylo uskutečněno na dvou betonových směsích, kde z každé směsi bylo vyrobeno 14 vzorků.

Drcená pryžová zrna byla použita ve čtyřech různých frakcích jako plnivo částečně nahrazující kamenivo. Frakce 0 - 0,8 mm (aktivovaný pryžový prach) byla dodána firmou Lavaris. Frakce 1 - 3 mm a 1 - 4 mm pochází od firmy Bonus spol. s.r.o. Poslední použitá frakce 3 - 6 mm byla vyrobena v Maďarsku ve firmě Green Tyre Zrt.

Jako pojivo byl ve směsi použit portlandský směsný cement CEM II 42,5 R. Kamenivo frakce 0 - 2 mm; 0 - 4 mm; 4 - 8 mm bylo použito jako plnivo. Jako superplastifikační přísada byl použit výrobek Master Glenium Sky. Master Roc SA 167 byl použit jako přípravek zajišťující urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi. Pro zkoumání nárůstu pevnosti v průběhu 24 hodin bylo v jedné směsi pojivo částečně

nahrazeno bezslínkovým hydraulickým pojivem - Sorfixem, pro zajištění větší počáteční pevnosti betonové směsi.

Pro experiment byly použity tyto konkrétní betonové směsi:

Směsi pro zkoumání pevnosti v tlaku po 24 h

Referenční beton

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	22,2	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg

Pryž frakce 0 - 0,8 mm; 2,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	19,7	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 0 - 0,8	0,44	kg

Pryž frakce 0 - 0,8 mm; 5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	17,3	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 0 - 0,8	0,88	kg

Pryž frakce 0 - 0,8 mm; 7,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	14,8	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 0 - 0,8	1,33	kg

Pryž frakce 0 - 0,8 mm; 10 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	12,4	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 0 - 0,8	1,77	kg

Pryž frakce 0 - 0,8 mm; 12,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	9,9	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 0 - 0,8	2,21	kg

Pryž frakce 1 - 3 mm; 2,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	19,7	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 -3	0,64	kg

Pryž frakce 1 - 3 mm; 5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	17,3	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 3	1,29	kg

Pryž frakce 1 - 3 mm; 7,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	14,8	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 3	1,93	kg

Pryž frakce 1 - 3 mm; 10 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	12,4	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 3	2,57	kg

Pryž frakce 1 - 3 mm; 12,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	9,9	kg
Kamenivo frakce 4 -8	12,5	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 3	3,22	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 2,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	21,0	kg
Kamenivo frakce 4 -8	11,4	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 4	0,74	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	19,7	kg
Kamenivo frakce 4 -8	10,3	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 4	1,48	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 7,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	18,5	kg
Kamenivo frakce 4 -8	9,2	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 4	2,22	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 10 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	17,3	kg
Kamenivo frakce 4 -8	8,0	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 4	2,96	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 12,5 %

CEM II 42,5 R	13,5	kg
Voda	6,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	13,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	16,1	kg
Kamenivo frakce 4 -8	6,9	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,108	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,27	kg
Pryž 1 - 4	3,70	kg

Pryž frakce 3 - 6 mm; 2,5 %

CEM II 42,5 R	11,25	kg
Voda	5,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	11,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	17,8	kg
Kamenivo frakce 4 -8	9,2	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,09	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,225	kg
Pryž 3 - 6	0,66	kg

Pryž frakce 3 - 6 mm; 5 %

CEM II 42,5 R	11,25	kg
Voda	5,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	11,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	17,1	kg
Kamenivo frakce 4 -8	7,9	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,09	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,225	kg
Pryž 3 - 6	1,32	kg

Pryž frakce 3 - 6 mm; 7,5 %

CEM II 42,5 R	11,25	kg
Voda	5,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	11,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	16,5	kg
Kamenivo frakce 4 -8	6,7	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,09	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,225	kg
Pryž 3 - 6	1,98	kg

Pryž frakce 3 - 6 mm; 10 %

CEM II 42,5 R	11,25	kg
Voda	5,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	11,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	15,8	kg
Kamenivo frakce 4 -8	5,4	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,09	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,225	kg
Pryž 3 - 6	2,64	kg

Pryž frakce 3 - 6 mm; 12,5 %

CEM II 42,5 R	11,25	kg
Voda	5,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	11,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	15,1	kg
Kamenivo frakce 4 -8	4,2	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,09	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,225	kg
Pryž 3 - 6	3,30	kg

Směsi pro zkoumání nárůstu pevnosti v tlaku v průběhu 24 h**Pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %**

CEM II 42,5 R	22,5	kg
Voda	10,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	22,5	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	28,8	kg
Kamenivo frakce 4 -8	20,9	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,18	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,48	kg
Pryž 1 - 4	2,47	kg

Pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %

CEM II 42,5 R	16,2	kg
Voda	9,0	kg
Kamenivo frakce 0 - 2	20,3	kg
Kamenivo frakce 0 - 4	25,9	kg
Kamenivo frakce 4 -8	18,8	kg
HRWR (Master Glenium Sky)	0,162	kg
AFA (MasterRoc SA 167)	0,405	kg
Pryž 1 - 4	2,22	kg
Sorfix	4,05	kg

8.2 Výroba vzorků

Při výrobě vzorků bylo nutné dodržet přesný technologický postup. Nejdříve se do míchačky vložily všechny suché složky (pojivo, plnivo, drcená pryž), které bylo potřeba nechat homogenizovat. Následně se do míchačky přidala větší část záměsové vody spolu se superplastifikátorem a směs se nechala opět homogenizovat. Před koncem míchání se do směsi přidal urychlovač tuhnutí a tvrdnutí a dolil se zbytek záměsové vody. Superplastifikátor a urychlovač tuhnutí se do míchačky aplikovali tak, že se vlévaly do proudu dávkované záměsové vody, aby se aktivovaly.



Obr. 7: Složky navrhované betonové směsi

Směs bylo nutné v průběhu automatického míchání promíchat i ručně, protože zejména zrna menších frakcí drcené pryže byly k sobě slepeny a tím pádem nedocházelo k jejich rovnoměrnému promíchání s ostatními složkami betonové směsi.

Po dokončení míchacího procesu, byla betonová směs nalita do bednění v podobě krychle o délce strany 150 mm. V případě zjišťování nárůstu pevnosti během 24 hodin byly ještě použity rozebíratelné formy o délce strany 150 mm, aby bylo možné odbednit relativně čerstvý beton a došlo při tom k co nejmenšímu poškození vzorku. Formy byly uloženy na vibrační stůl, kde byly naplněny zhruba do poloviny svého objemu a následně došlo k hutnění směsi. Poté byla směs doplněna do celého objemu formy. Takto naplněné krychle byly opět vibrovány, tentokrát už do konečné podoby.



Obr. 8: Formy naplněné betonovou směsí

8.3 Zkoušení vzorků

8.3.1 Pevnosti v tlaku po 24 hodinách

Vyrobená betonová směs uložená do bednění zrála 24 hodin. Po uplynutí tohoto času byly vzorky odbedněny za pomoci stlačeného vzduchu. Následně byl každý vyrobený vzorek zvážen a změřen za účelem zjištění objemové hmotnosti betonu s přídavkem drcené pryže. Betonové krychle byly poté podrobeny zatěžování na lisu, aby se zjistila jejich tlaková pevnost. Při zatěžování zkušebních těles bylo nutné dbát na skutečnost, že zatěžovací síla musí vždy působit kolmo na směr hutnění.



Obr. 9: Odbedněné betonové vzorky



Obr. 10: Zkouška pevnosti v tlaku

8.3.2 Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin

Pro zkoumání vývoje pevnosti byla vybrána směs s přídavkem drcené pryže frakce 1 - 4 mm s nahrazením 5 % hmot. kameniva. Směs byla vyrobena a následně nalita do plastových a dále do rozebíratelných forem. Měření probíhalo ve stanovených časových intervalech stanovených dle požadavků na pevnost v tlaku pro mladý stříkaný beton (viz. [Obr. 5]). Vzhledem ke skutečnosti, že čerstvý betonový vzorek lze odbednit až po několika hodinách, docházelo k prvním měřením pomocí penetrometru, kterým se zjišťuje odpor proti zatlačení, jež je udáván v jednotkách „psi“. Ze 14 kusů vzorků bylo náhodně vybráno 5 krychlí, na kterých byl měřen právě odpor proti zatlačení. Použitý penetrometr dokázal měřit hodnoty v rozmezí 0 až 700 psi.



Obr. 11: Penetrometr

Krychle, které postupem času dosáhly takové pevnosti, pro kterou nebylo možné použití penetrometru, byly odbedněny a podstoupeny jednoosé tlakové zkoušce na lisu. Z tohoto důvodu byl pro měření nejdůležitější okamžik, kdy bylo možné měření odporu proti zatlačení na jedné krychli a zároveň bylo možné jiný betonový vzorek odbednit (zejména z rozebíratelné formy) a zatížit na lisu. Díky tomuto bylo zjištěno, jaké hodnotě odporu proti zatlačení [psi] odpovídá konkrétní hodnota tlakové pevnosti [MPa].

8.4 Výsledky měření

8.4.1 Pevnost v tlaku po 24 hodinách

Referenční beton

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	18,7	18,4	19,6	20,7	18,7	18,7	19,6	18,2	19,1
Obj. hm. [kg/m ³]	2177	2191	2194	2182	2179	2148	2168	2174	2177

Přůž frakce 0 - 0,8 mm; 2,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	16,0	12,7	14,0	13,0	13,8	14,7	15,1	15,1	14,3
Obj. hm. [kg/m ³]	2069	2040	2019	2013	2038	2045	2055	1992	2034

Přůž frakce 0 - 0,8 mm; 5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	14,2	13,8	12,9	13,0	12,9	12,6	13,6	12,9	13,2
Obj. hm. [kg/m ³]	2022	2030	2000	2009	1998	2008	2008	1994	2009

Přůž frakce 0 - 0,8 mm; 7,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	9,6	9,6	9,8	9,5	10,0	9,6	9,2	9,8	9,6
Obj. hm. [kg/m ³]	2004	2020	1996	2000	2015	1995	1995	2025	2006

Přůž frakce 0 - 0,8 mm; 10 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	8,5	8,1	7,9	8,3	7,4	8,0	9,0	8,9	8,3
Obj. hm. [kg/m ³]	1946	1933	1950	1938	1880	1933	1946	1932	1932

Přůž frakce 0 - 0,8 mm; 12,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	8,0	7,6	7,6	7,6	7,3	7,4	8,1	7,8	7,7
Obj. hm. [kg/m ³]	1883	1865	1909	1871	1899	1897	1912	1873	1889

Pryž frakce 1 - 3 mm; 2,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	10,7	12,6	14,0	14,5	13,9	14,0	14,0	13,6	13,4
Obj. hm. [kg/m ³]	2086	2049	2103	2094	2068	2089	2054	2080	2078

Pryž frakce 1 - 3 mm; 5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	11,9	12,1	13,2	13,2	12,4	12,3	11,8	13,1	12,5
Obj. hm. [kg/m ³]	2048	2056	2073	2072	2069	2058	2048	2083	2063

Pryž frakce 1 - 3 mm; 7,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	10,8	11,6	11,4	11,6	11,6	11,5	11,1	11,8	11,4
Obj. hm. [kg/m ³]	2056	2044	2038	2039	2066	2070	2046	2055	2052

Pryž frakce 1 - 3 mm; 10 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	5,8	7,0	6,8	6,9	7,2	6,5	7,0	7,8	6,9
Obj. hm. [kg/m ³]	1875	1876	1898	1874	1876	1860	1881	1882	1878

Pryž frakce 1 - 3 mm; 12,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	6,9	6,7	7,1	7,0	6,5	6,9	6,1	6,4	6,7
Obj. hm. [kg/m ³]	1861	1847	1854	1866	1892	1849	1870	1843	1860

Pryž frakce 1 - 4 mm; 2,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	13,8	17,3	17,1	13,3	17,3	16,4	17,3	16,9	16,2
Obj. hm. [kg/m ³]	2118	2147	2135	2123	2154	2124	2146	2149	2137

Pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	13,8	14,7	13,8	13,4	13,1	13,3	13,6	12,7	13,5
Obj. hm. [kg/m ³]	2078	2084	2092	2090	2100	2099	2103	2079	2090

Přůž frakce 1 - 4 mm; 7,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	14,0	12,8	12,8	12,3	12,6	12,4	13,1	12,4	12,8
Obj. hm. [kg/m ³]	2065	2075	2066	2052	2062	2067	2084	2053	2090

Přůž frakce 1 - 4 mm; 10 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	9,8	10,5	10,2	10,4	10,1	11,2	10,6	9,4	10,3
Obj. hm. [kg/m ³]	1989	2006	1977	1984	1997	2007	1994	1983	1992

Přůž frakce 1 - 4 mm; 12,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	6,9	7,2	7,2	6,9	6,8	7,0	7,1	7,1	7,0
Obj. hm. [kg/m ³]	1948	1968	1963	1956	1947	1977	1974	1948	1960

Přůž frakce 3 - 6 mm; 2,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	15,3	15,6	16,4	15,3	16,0	16,0	17,6	16,0
Obj. hm. [kg/m ³]	2167	2154	2176	2147	2136	2147	2152	2154

Přůž frakce 3 - 6 mm; 5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	14,9	15,6	14,0	15,1	12,7	14,9	14,4	14,5
Obj. hm. [kg/m ³]	2090	2124	2084	2116	2076	2111	2059	2094

Přůž frakce 3 - 6 mm; 7,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	10,4	11,3	9,8	11,3	10,0	11,1	11,1	10,7
Obj. hm. [kg/m ³]	1985	1962	1923	1972	1971	1975	2011	1971

Přůž frakce 3 - 6 mm; 10 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	10,4	9,8	9,3	10,0	9,1	9,8	9,6	9,7
Obj. hm. [kg/m ³]	2042	2012	1961	2016	1984	2023	1980	2003

Přez frakce 3 - 6 mm; 12,5 %

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	Ø
Pevnost v tlaku [MPa]	8,9	8,9	8,7	9,6	8,0	8,4	8,4	8,7
Obj. hm. [kg/m ³]	1985	2007	1952	1983	1990	1950	1954	1974

8.4.2 Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin**Přez frakce 1 - 4 mm; 5 %**

Měřeno v čase	6	10	30	1	2	3	6	9	12	24
	min.	min.	min.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.
Ø Odpor proti zatlačení [PSI]	0	0	0	0	11	45	570	-	-	-
Ø Pevnost v tlaku [MPa]	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1,5	11,8

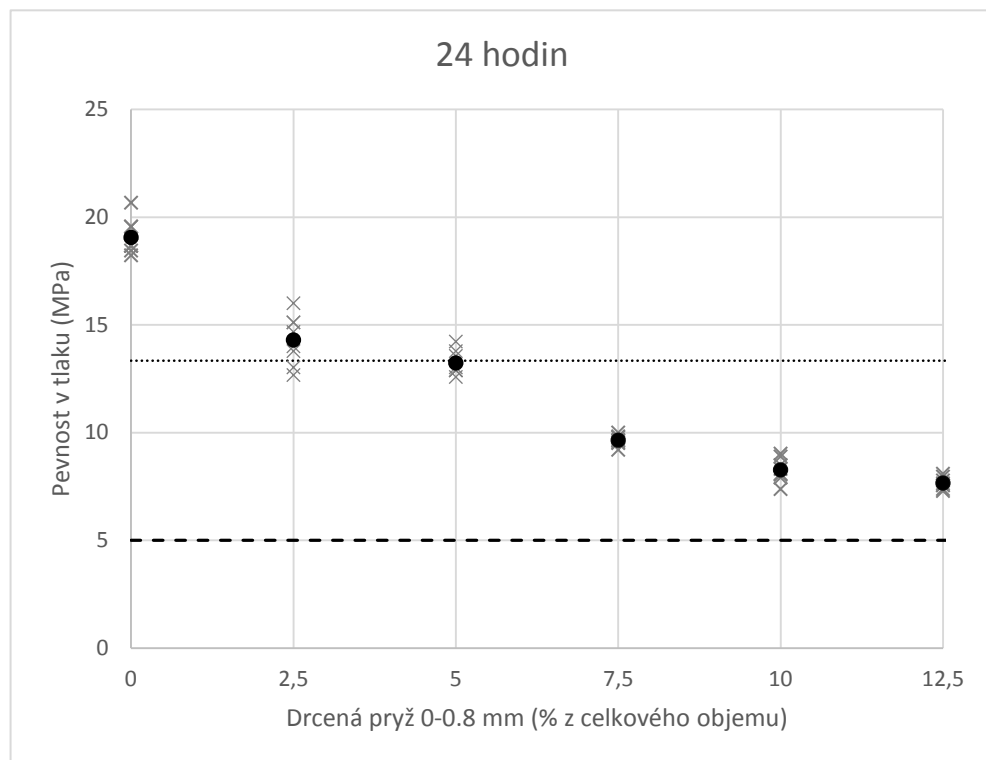
Přez frakce 1 - 4 mm; 5 % + SORFIX

Měřeno v čase	6	10	30	1	2	3	6	9	12	24
	min.	min.	min.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.	hod.
Ø Odpor proti zatlačení [PSI]	0	28	67	132	192	494	-	-	-	-
Ø Pevnost v tlaku [MPa]	-	-	-	-	-	0,1	0,4	1,3	2,8	10,6

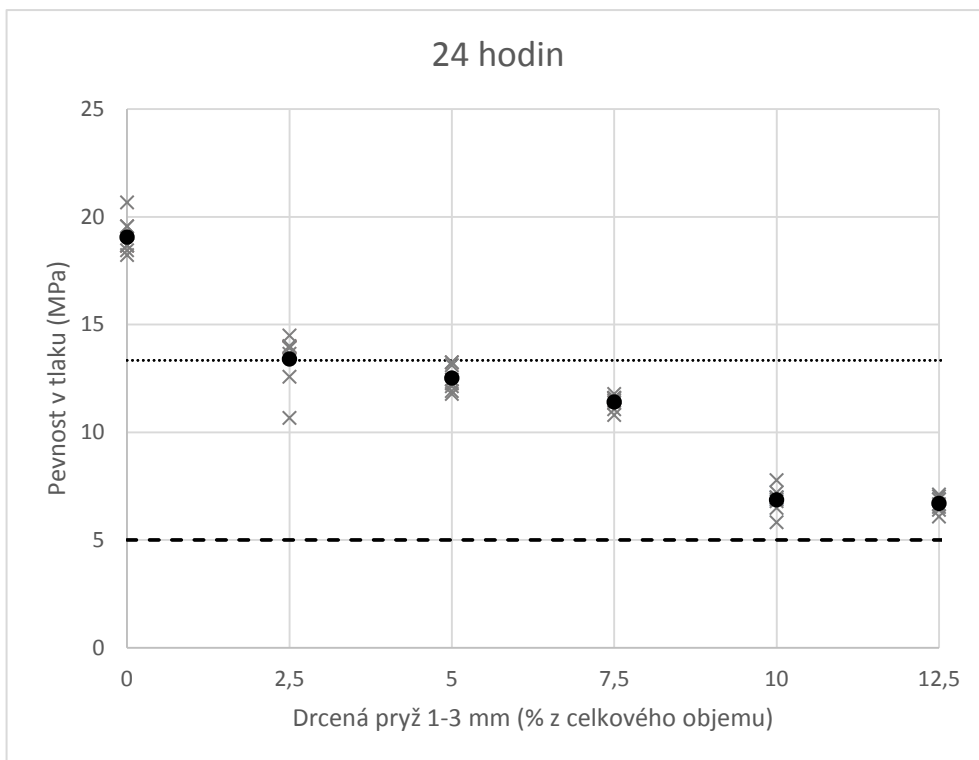
8.5 Vyhodnocení výsledků

8.5.1 Pevnost v tlaku po 24 hodinách

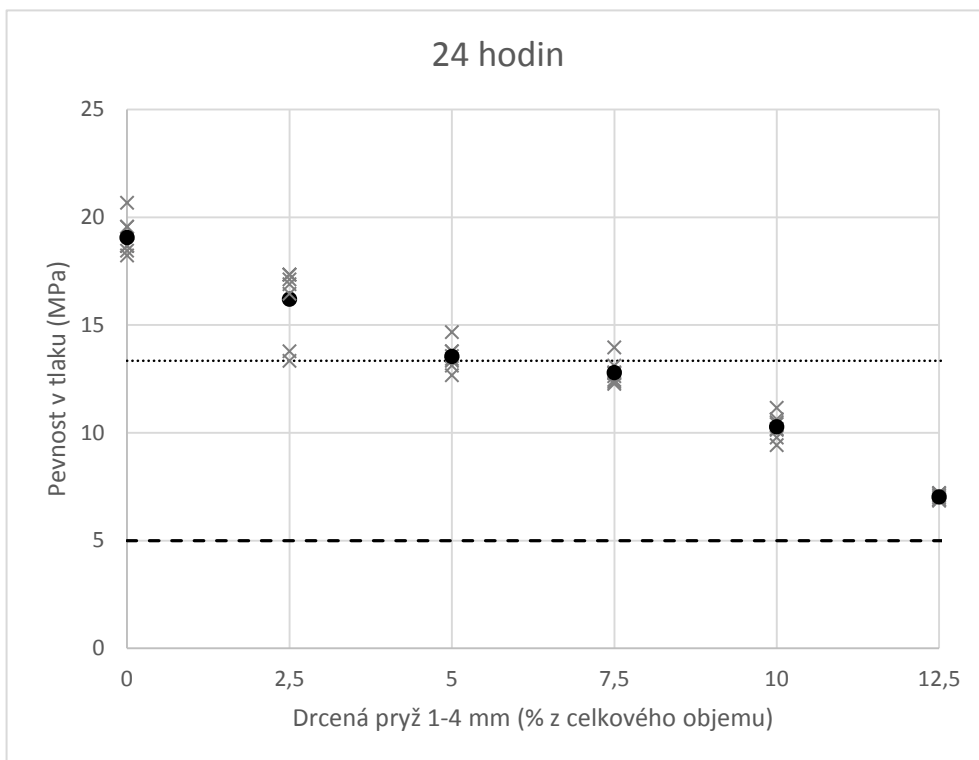
Zkoumané betonové směsi spadají svým využitím do oborové křivky J2 (viz. [Obr.5]). Minimální požadovaná pevnost v tlaku po 24 hodinách je 5 MPa. V rámci experimentálního programu byl také stanoven požadavek, že pro využití stříkaného betonu v podzemních stavbách budou vyhovovat směsi s přidavkem drcené pryže, které po 24 hodinách zrání budou vykazovat alespoň 70 % tlakové pevnosti referenčního betonu. V tomto konkrétním případě budou pro využití stříkaného betonu vyhovující směsi, které budou mít tlakovou pevnost vyšší než 13,3 MPa.



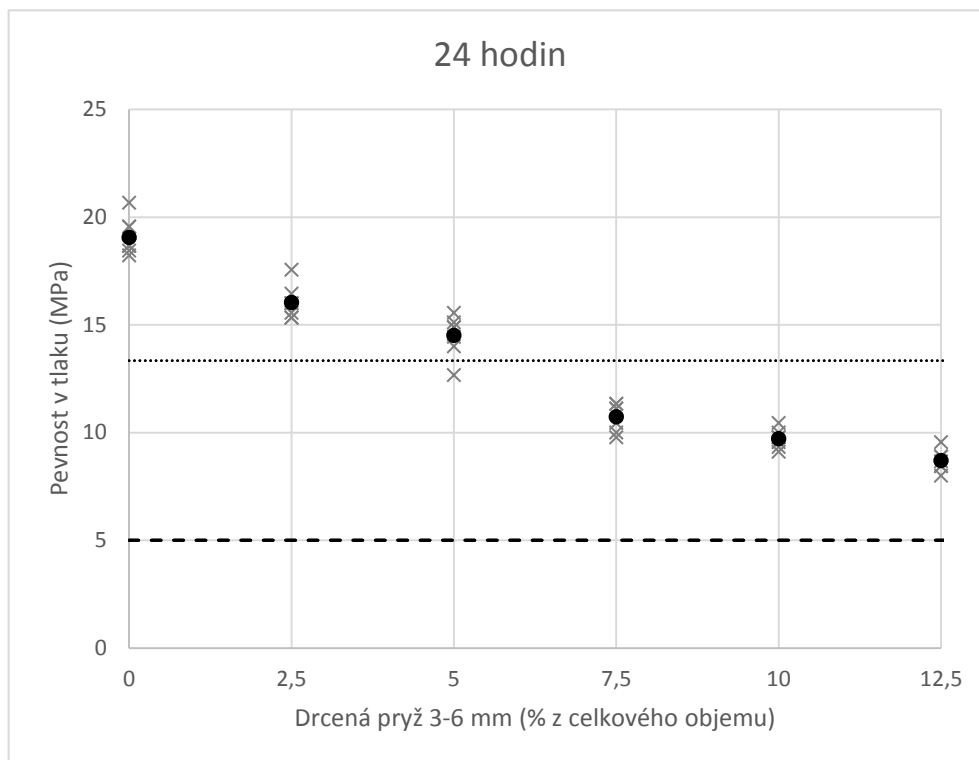
Graf 1: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 0 - 0,8 mm



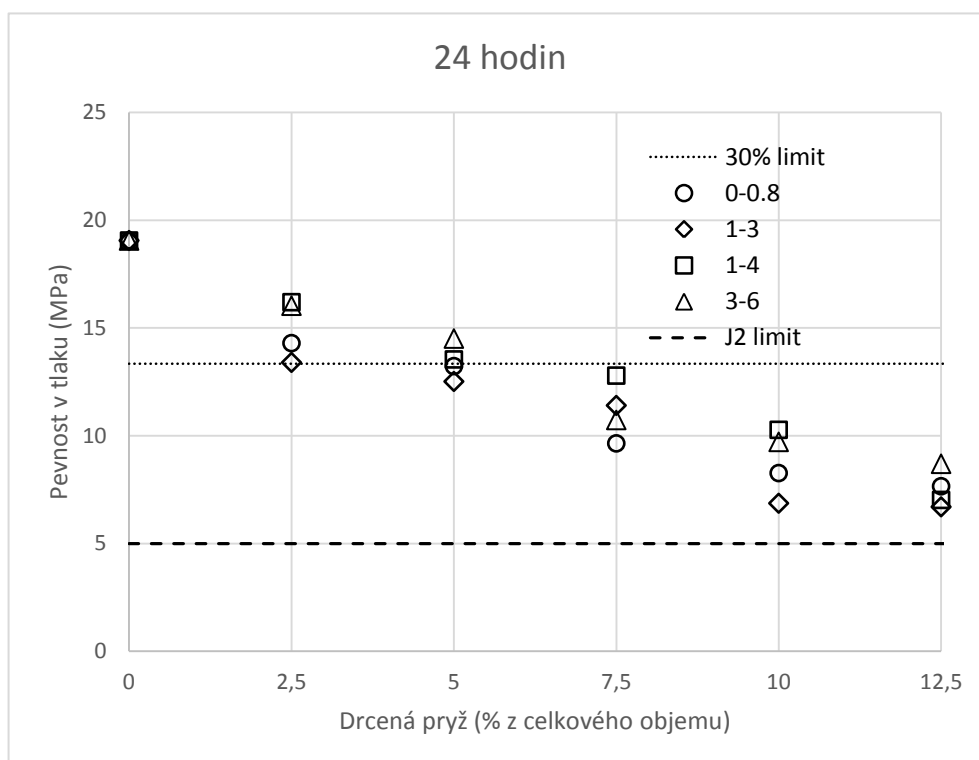
Graf 2: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 3 mm



Graf 3: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 4 mm



Graf 4: Tlakové pevnosti betonu s přidavkem drcené pryže frakce 1 - 4 mm

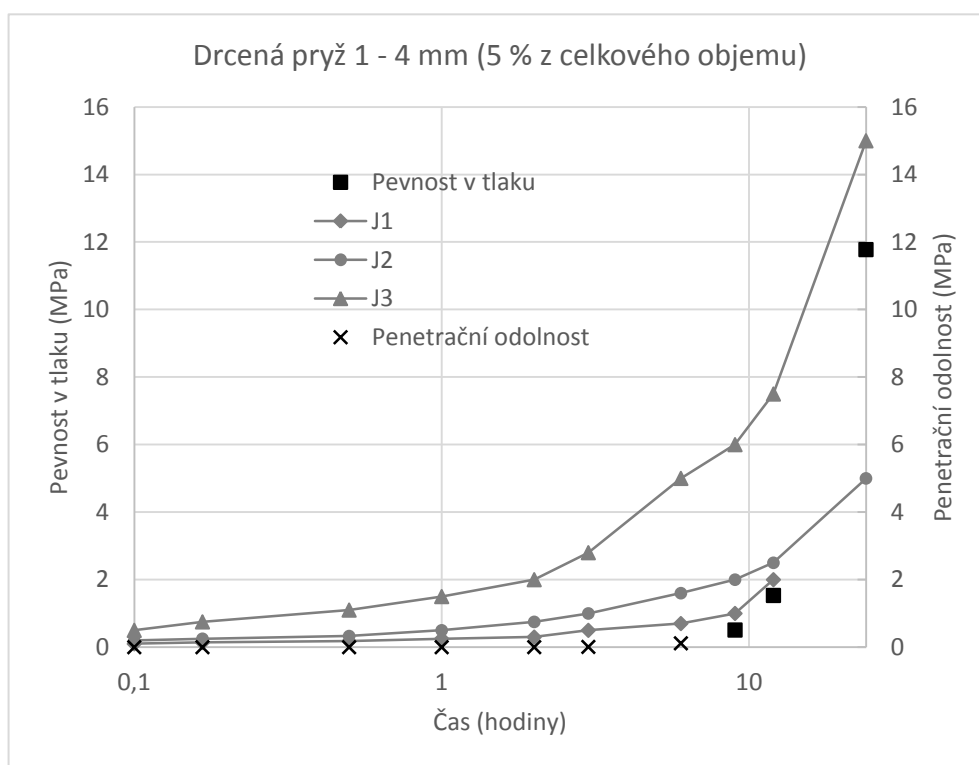


Graf 5: Shrnutí tlakových pevností všech použitých frakcí drcené pryže

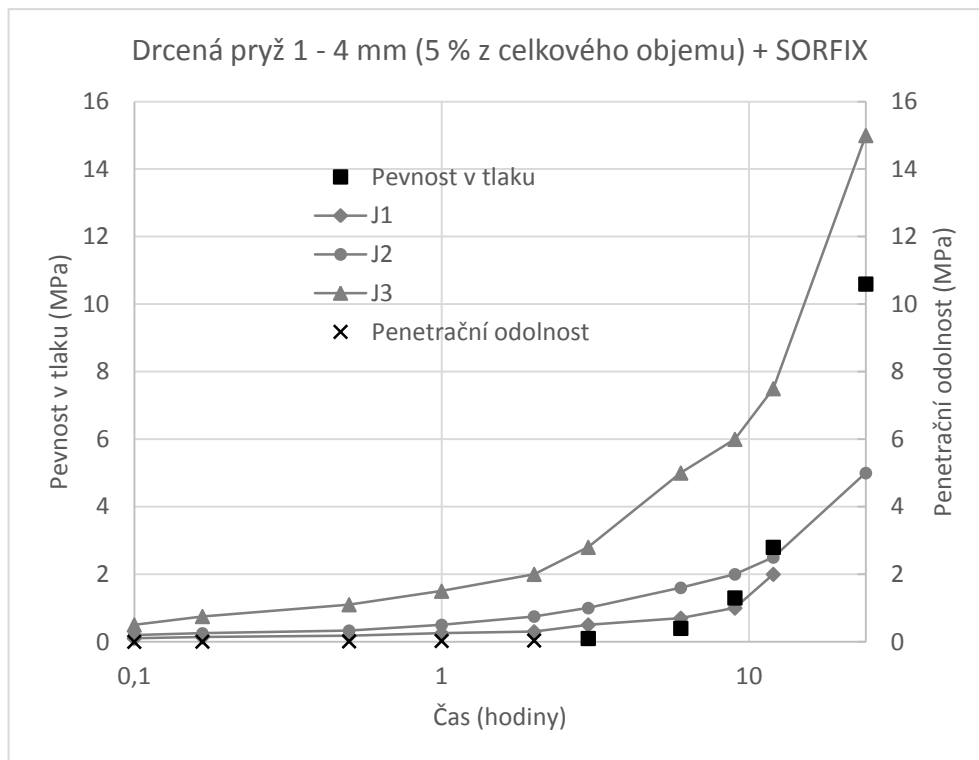
Z výsledků lze pozorovat téměř lineární pokles tlakových pevností vzorků. Zároveň můžeme vidět, že u směsí s větším procentuálním zastoupením drcené pryže (10 %; 12,5%) dochází k menšímu rozdílu pevností v tlaku mezi sebou, než u směsí s nižším obsahem gumových částic.

Všechny zkoumané směsi splnily požadavek na tlakovou pevnost měřenou po 24 hodinách zrání dle oborové křivky J2. Požadavek na 70 % tlakové pevnosti referenčního betonu po 24 hodinách zrání splnily všechny zkoumané směsi s obsahem gumových částic v hodnotě 2,5 % a dále směsi s obsahem 5 % drcené pryže frakcí 1 - 4 mm a 3 - 6 mm.

8.5.2 Nárůst pevnosti v tlaku v průběhu 24 hodin



Graf 6: Nárůst tlakových pevností (pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %)



Graf 7: Nárůst tlakových pevností (pryž frakce 1 - 4 mm; 5 %; SORFIX)

Z naměřených výsledků vyplývá, že betonová směs bez použití Sorfixu splnila hodnoty oborové křivky J2 až po 24 hodinách zrání. Směs s přidáním Sorfixu vykazovala požadované tlakové pevnosti dle křivky J2 už po 12 hodinách zrání. Stále ale nebylo dosaženo takového výsledku, aby betonová směs nabývala požadovaných hodnot již od začátku měření. Vliv Sorfixu je zřejmý zejména v počátečních pevnostech, což se zajisté projeví lepší stabilitou nanášené směsi. Pro splnění tlakových pevností předepsaných oborovou křivkou J2 by byla nutná aplikace vyšší dávky urychlovače tuhnutí a tvrdnutí.

9. Závěr

Využití drcené pryže v oblasti stavebnictví se stává stále více aktuálním a je potřeba hledat způsoby, jak nejefektivněji toto plnivo aplikovat. Použití gumové drti může mít přínos v různých odvětvích stavebního průmyslu, ale nejdůležitějším přínosem je úleva životnímu prostředí. Rostoucí životní úroveň s sebou přináší i větší množství odpadů, a proto je důležité přemýšlet nad tím, jak tyto odpady dále zpracovávat.

Z výše popsaných zkoušek je patrné, že mechanické vlastnosti betonu s použitím gumové drti se spíše zhoršují. Z tohoto pohledu můžeme říci, že použití drcené pryže v betonové směsi není důvodem technickým, ale spíše politickým.

V rámci experimentu byla použita drcená pryž frakcí různých velikostí. Pokud srovnám všechny použité frakce ve stejném procentuálním zastoupení v betonové směsi, mohu prohlásit, že nejvyšších hodnot tlakových pevností dosahovaly frakce 1 - 4 mm a 3 - 6 mm. Zároveň je ale nutné dodat, že rozdíly tlakových pevností jednotlivých frakcí byly minimální. Proto si dovoluji tvrdit, že velikost frakce drcené pryže nemá zásadní vliv na výslednou pevnost v tlaku.

Důvodem klesající tlakové pevnosti je procentuální zastoupení drcené pryže v betonové směsi. Modul pružnosti gumy je mnohonásobně nižší než modul pružnosti referenčního betonu a proto pryž působí v betonu jako pór. S větším obsahem pryžových částic roste množství pórů a tím pádem se mechanické vlastnosti betonové směsi zhoršují.

Ačkoliv beton s přídavkem drcené pryže není v současnosti v oblasti stavitelství úplně novým objevem, stále však o něm mnoho nevíme. Proto je v tomto odvětví pořád co zkoumat a objevovat. Pro budoucí použití tohoto druhu betonu bych uvítal existenci uceleného srovnání jeho vlastností, díky kterému by se gumobeton dostal do širšího povědomí veřejnosti a tím by se určitě zvýšila i jeho využitelnost.

10. Seznam zdrojů

- [1] Martina Bagarová Grzywa, Řešením jsou moderní technologie [online]
Dostupné na : <http://odpady-online.cz/resenim-jsou-moderni-technologie/>
- [2] Agáta Radvanská, Gumový granulát z pneumatik [online]
Dostupné na : <http://odpady-online.cz/gumovy-granulat-z-pneumatik/>
- [3] Šroty.cz, Co se děje z pneumatikami po jejich vyřazení [online]
Dostupné na : <http://www.sroty.cz/recyklace-pneumatik>
- [4] Český tunelářský komitét ITA – AITES, Stříkaný beton v podzemním stavitelství
Dostupné na :
http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_03_strikaný_beton.pdf
- [5] MujBeton.cz, Plastifikátory [online]
Dostupné na : <http://www.muibeton.cz/plastifikatory>
- [6] Kunal Bisht, P.V.Ramana; Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete; Construction and Building Materials 155 (2017) 811 -817
Dostupné na : www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- [7] Osama Youssf, Julie E. Mills, Reza Hassanli; Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete; Construction and Building Materials 125 (2016) 175 – 183
Dostupné na : www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- [8] Tomáš Svoboda, Gumobeton, Bakalářská práce ČVUT, 2012
- [9] Bc. Tomáš Svoboda, Gumobeton a vaznost pryže na cementovou pastu, Diplomová práce ČVUT, 2013

- [10] Bc. Roman Chylík, Mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu s přísadou gumového recyklátu, Diplomová práce ČVUT, 2017
- [11] Úřad průmyslového vlastnictví ČR, Způsob přípravy bezslínkového hydraulického pojiva, Patentový spis, 2017
Přímá citace
- [12] Bohumil Pražský, Nové využití starých pneumatik [online]
Dostupné na : <http://vtm.e15.cz/aktuality/nove-vyuziti-starych-pneumatik>
- [13] Ing. Pavel Trojan a kol., Jednotlivé části pneumatiky [online]
Dostupné na : <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1489>
- [14] Sycorex CR s.r.o., Dopravní stavby, Pryžový granulát [online]
Dostupné na : <http://www.sycorex.cz/dopravni-stavby/>
- [15] MOPED izolace, Suchý torkret, mokřý torket [online]
Dostupné na : <http://www.moped.cz/slovnicek>