

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra konstrukcí pozemních staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití jemné frakce recyklovaného  
kameniva v betonových prvcích

Bc. Vladimír Hujer

2017

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Hájek, CSc.

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 7. ledna 2017

.....

Bc. Vladimír Hujer

## PODĚKOVÁNÍ

*Rád bych vyjádřil poděkování vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Petru Hájkovi, CSc. za jeho čas, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.*

*Také velmi děkuji Ing. Tereze Pavlů, Ph.D. a Ing. Magdaléně Šefflové za jejich čas, cenné rady a odbornou pomoc s experimentální částí mé diplomové práce.*



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

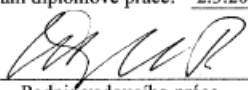
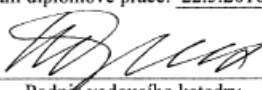
Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

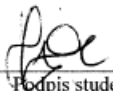
Příjmení: <u>Hujer</u>	Jméno: <u>Vladimír</u>	Osobní číslo: <u>380698</u>
Zadávací katedra: <u>K124</u>		
Studijní program: <u>Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor: <u>Budovy a prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Využití jemné frakce recyklovaného kameniva v betonových prvcích</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Use of fine recycled aggregate in concrete elements</u>	
Pokyny pro vypracování: Rešerše problematiky, experimentální ověření, zhodnocení výsledků	
Seznam doporučené literatury: Normy, odborné články	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>prof. Ing. Petr Hájek, CSc.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.3.2016</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>22.5.2016</u>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>4.3.2016</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
--	--

## ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá možností použití jemné frakce betonového recyklovaného kameniva a recyklovaného cementového prachu jako náhrady jemné frakce přírodního kameniva a portlandského cementu do betonu. Teoretická část je tvořena literární rešerší problematiky recyklovaného kameniva a z něj vyrobeného betonu, dále popsání jednotlivých postupů a použitých pomůcek pro jednotlivé zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu. V experimentální části jsou zkoušeny vlastnosti recyklovaného kameniva a betonu obsahujícího recyklované kamenivo nebo recyklovaný cementový prach. Závěrem jsou shrnuty výsledky zkoušení recyklovaného kameniva a betonu obsahujícího recyklované kamenivo a recyklovaný cementový prach.

## KLÍČOVÁ SLOVA

stavební a demoliční odpad, beton, recyklované materiály, druhotné suroviny, recyklované kamenivo, recyklovaný cementový prach, recyklovaný beton, vlastnosti

## ANNOTATION

This diploma thesis is focused on the possibility of the use of fine recycled aggregate and recycled cement powder as a substitute fines natural aggregates and Portland cement in concrete. The theoretical part consists of a literature research on the subject of recycled aggregate concrete made from it, as well as describing the various procedures and tools used for individual tests fresh and hardened concrete. The properties of recycled aggregate and concrete containing recycled aggregate and recycled cement powder were examined in the experiment part. In conclusions, the testing results recycled aggregate and concrete containing fine recycled aggregate and recycled cement powder were summarized.

## KEYWORDS

construction and demolition waste, concrete, recycled materials, secondary materials, recycled aggregate, recycled cement powder, properties

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

REF – vzorek betonu bez obsahu recyklované složky

5C – vzorek betonu, kde bylo 5% portlandského cementu nahrazeno cementovým recyklovaným prachem

10C – vzorek betonu, kde bylo 10% portlandského cementu nahrazeno cementovým recyklovaným prachem

15C – vzorek betonu, kde bylo 15% portlandského cementu nahrazeno cementovým recyklovaným prachem

10P – vzorek betonu, kde bylo 10% přírodního písku nahrazeno jemným recyklovaným kamenivem frakce 0/4 mm

20P – vzorek betonu, kde bylo 20% přírodního písku nahrazeno jemným recyklovaným kamenivem frakce 0/4 mm

30P – vzorek betonu, kde bylo 30% přírodního písku nahrazeno jemným recyklovaným kamenivem frakce 0/4 mm

$WA_{24}$  = nasákavost kameniva po 24 hodinách (%)

$WA_c$  = kapilární nasákavost ( $kg/m^2$ )

$A$  = plocha nasycení ( $m^2$ )

$\rho_a$  = objemová hmotnost zrn ( $Mg/m^3$ )

$\rho_{ssd}$  = objemová hmotnost kameniva v plně nasyceném stavu ( $Mg/m^3$ )

$\rho_{rd}$  = objemová hmotnost kameniva ve vysušeném stavu ( $Mg/m^3$ )

$M_1$  = hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva (g)

$M_2$  = hmotnost pyknometru obsahující kamenivo nasycené vodou (g)

$M_3$  = hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou (g)

$M_4$  = hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně (g)

$v_L$  = rychlost impulzu (km/s)

$L$  = délka měřicí základny (mm)

$T$  = čas včetně  $T_{kor}$ , který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou ( $\mu s$ )

$T_{kor}$  = korekce – skládá se z mrtvého času přstroje a z rozdílu času šíření impulzů (g)

$D$  = objemová hmotnost zkušební tělesa pro příslušné podmínky a způsobu stanovení objemu ( $kg/m^3$ )

$m$  = hmotnost zkušební tělesa v podmínkách v době zkoušení (kg)

$V$  = objem stanovený příslušným způsobem ( $m^3$ )

$f_c$  = pevnost v tlaku ( $N/mm^2$ )

$F$  = maximální zatížení, při kterém došlo k poruše vzorku (N)

$A_c$  = plocha tělesa, na kterou působí zatížení ( $mm^2$ )

$f_{cf}$  = pevnost v tahu za ohybu ( $N/mm^2$ )

$F$  = maximální zatížení při porušení vzorku (N)

$I$  = vzdálenost mezi podpěrnými válečky (mm)

$d_1$  a  $d_2$  = rozměry příčného řezu zkušební vzorku (mm)

$n$  = poměr hmotnosti písku  $m_K$  k jednotce hmotnosti cementu  $m_C$  (kg)

$V_Z$  - objem vzduchu v betonu, uvádí se 2 - 7 %

$\rho_C$  - objemová hmotnost cementu

$\rho_V$  - objemová hmotnost vody

$\rho_K$  = objemová hmotnost písku



## OBSAH

1	ÚVOD.....	11
1.1	VÝZNAM ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	11
1.2	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	14
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	15
2.1	TRVALE UDRŽITELNÝ ROZVOJ.....	15
2.1.1	Obecně.....	15
2.1.2	Výstavba.....	16
2.2	STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD.....	16
2.3	ZÁSADY PRO NAKLÁDÁNÍ SE STAVEBNÍMI A DEMOLIČNÍMI ODPADY.....	18
2.4	ODBORNÉ ČLÁNKY ZABÝVAJÍCÍ SE TÉMATIKOU POUŽITÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU.....	19
2.5	RECYKLOVANÉ KAMENIVO.....	24
2.5.1	Postup recyklace, recyklační střediska.....	25
2.5.2	Zkoušení vlastností recyklovaného kameniva.....	26
2.5.3	Rozdíly mezi recyklovaným a přírodním kamenivem.....	34
2.6	RECYKLOVANÝ BETON.....	34
2.6.1	Požadavky na beton.....	34
2.6.2	Zkoušení vlastností recyklovaného betonu.....	36
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	42
3.1	ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA.....	42
3.1.1	TESTOVANÉ RECYKLOVANÉ KAMENIVO.....	42
3.1.2	ZKOUŠENÍ GEOMETRICKÝCH VLASTNOSTÍ KAMENIVA.....	43
3.1.3	ZKOUŠENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ KAMENIVA.....	47
3.1.4	ZÁVĚR.....	51

3.2	ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÉHO BETONU .....	52
3.2.1	Návrh jemnozrnné betonové směsi .....	52
3.2.2	Navržené betonové směsi .....	53
3.2.3	Výroba betonové směsi.....	53
3.2.4	Zkoušení vlastností čerstvého betonu .....	54
3.2.5	Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu .....	56
3.2.6	Závěr .....	70
4	ZÁVĚR .....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	74
	SEZNAM TABULEK .....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	77

# 1 ÚVOD

## 1.1 VÝZNAM ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Recyklace stavebních a demoličních odpadů je velmi důležitá činnost, která šetří neobnovitelné přírodní zdroje, takže nedochází k jejich zbytečnému vyčerpávání a zároveň snižuje množství odpadu umístěného na skládkách.

Celkově společnost na celé planetě vyprodukuje obrovské množství odpadu. Jen v ČR se za rok 2013 vyprodukovalo 30,6 mil. tun odpadu. Oproti roku 2012 se jedná o meziroční navýšení o 2 %. Z toho nejvyšší podíl 59 % jsou stavební a demoliční odpady, které meziročně stouply dokonce o 3,4 % [1].

Odpady lze zpracovat a likvidovat, buď jejich uložením na skládku, spalováním nebo recyklací.

Uložení odpadu na skládku je stále nejlevnější variantou, ale jsou zde značné nevýhody. Nevýhodami jsou obrovská náročnost na prostor (záběr půdy a vytváření mrtvých území v krajině) a vznik emisí  $CH_4$ , které mají vliv na přírodní klima. Další nevýhodou je nebezpečí kontaminace spodních vod a půdy. Dále jmenujme hygienické problémy se zápachem, hmyzem a hlodavci, možnost úletu a rozptýlení lehkých odpadků do okolí, možnost vzniku požárů a s tím spojený únik škodlivin do ovzduší. [2]



*Obr. 1 – Ukládání odpadu na skládce [3]*

Další možností likvidace odpadu je spalování. Nevýhodou spalování je znečišťování ovzduší a vysoké náklady na provoz spalovny. Spalovny se na svůj provoz snaží získat dostatečné množství odpadu, který by ani nemusel být spálen a mohl by být recyklován. Výhodami spalování jsou rychlost likvidace odpadu, redukce hmotnosti a objemu odpadu o 80 – 90 % [2].



Obr. 2 – Spalovna [4]

Jinou možností je recyklace. Recyklace je výraz pro nakládání s odpadem, které vede k jeho dalšímu využití. Recyklace umožňuje šetřit obnovitelné i neobnovitelné zdroje a často může snižovat zátěž životního prostředí. Pro správnou efektivitu recyklace je důležitá ekonomická i enviromentální výhodnost.

Směrnice EU č. 98/2008 (ES) v článku 3 definuje pojem recyklace jako:

*„jakýkoli způsob využití, jímž je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo pro jiné účely. Zahrnuje přepracování organických materiálů, ale nezahrnuje energetické využití a přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo nebo jako zásypový materiál.“ [5]*



*Obr. 3 – Logo recyklace [6]*

Recyklace stavebních a demoličních materiálů se v České republice začala rozvíjet na počátku 90. let 20. století. Se stále se zvyšujícím důrazem kladeným na trvale udržitelnou výstavbu došlo v posledních deseti letech k intenzivnímu rozvoji recyklace stavebních a demoličních odpadů. V současné době by měl objem recyklovaných stavebních a demoličních odpadů klesnout z důvodu vydání Plánu odpadového hospodářství České republiky [7] pro období 2015 – 2024 vydaného na konci roku 2014, který požaduje do roku 2020 nejméně 70 % stavebního a demoličního odpadu recyklovat nebo znovu využít.

Beton je nejčastěji používaným stavebním materiálem. Proto vzniká problém s vyčerpáváním přírodních zdrojů kameniva. Z toho důvodu se jeví použití recyklovaného kameniva, jako druhotné suroviny při výrobě betonu, pro snížení negativního dopadu stavební výroby na životní prostředí velmi pozitivní. Další možnou motivací pro používání recyklovaného kameniva může být i jeho cena, která je často příznivější než u přírodního kameniva.

Problémem při používání recyklovaného kameniva jako náhrady přírodního kameniva do betonu může být nevyhovující kvalita recyklovaného kameniva. Ta se liší jak napříč recyklačními středisky, tak i v rámci jednoho recyklačního střediska.

Z výše uvedených důvodů je pro použití recyklovaného kameniva do betonu důležité dodržování technologického postupu při samotné recyklaci. Je důležité testování vlastností recyklovaného kameniva a přizpůsobení návrhu betonové směsi. V praxi se do betonu využívá běžné frakce, nikoliv pouze jemná frakce.

## 1.2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato diplomová práce se zabývá možností použití jemné frakce recyklovaného kameniva a recyklovaného cementového prachu jako částečné náhrady kameniva a cementu pro použití v konstrukcích pozemních staveb.

Cílem této práce je návrh a experimentální ověření směsí betonu obsahující recyklované kamenivo nebo cementový prach s důrazem na jeho mechanické vlastnosti.

Práce je rozdělena do dvou částí. První část je věnována literární rešerši, mapující problematiku zkoušení a použití betonu obsahujícího recyklované kamenivo. Druhá část práce je věnována experimentálnímu programu, zaměřeného na zkoušení vlastností betonu, ve kterém bylo přírodní kamenivo v různých poměrech částečně nahrazeno recyklovaným kamenivem nebo kde recyklovaný cementový prach nahradil portlandský cement. Veškeré experimenty byly prováděny pod odborným vedením paní Ing. Terezy Pavlů, Ph.D. a Ing. Magdalény Šefflové v akreditovaných laboratořích UCEEB, ČVUT v Praze.

### **Jednotlivé cíle diplomové práce a metodika zpracování práce:**

- 1) Literární rešerše na téma: recyklované kamenivo a recyklovaný beton.
- 2) Zkoušení vybraných vlastností recyklovaného jemného kameniva, jejich porovnání s referenčním přírodním kamenivem.
- 3) Návrh a výroba betonových směsí s různým poměrem recyklovaného a přírodního kameniva a s různým poměrem portlandského cementu a recyklovaného cementového prachu.
- 4) Zkoušení vybraných vlastností vyrobeného recyklovaného betonu, jejich porovnání s referenčním betonem obsahujícím přírodní kamenivo.
- 5) Zhodnocení výsledků zkoušení recyklovaného betonu a možnosti jeho použití v betonových prvcích konstrukcí pozemních staveb.

## 2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 2.1 TRVALE UDRŽITELNÝ ROZVOJ

#### 2.1.1 Obecně

Existuje mnoho definic a na mezinárodní úrovni se k udržitelnému rozvoji vede mnoho diskusí a jednání. Základní aspekt udržitelného rozvoje asi nejlépe vystihuje definice ze Zprávy pro Světovou komisi OSN pro životní prostředí a rozvoj (WCED) nazvané Naše společná budoucnost, kterou v roce 1987 předložila její tehdejší předsedkyně Gro Harlem Brundtlandová, která zní: „*Trvale udržitelný rozvoj je takový způsob rozvoje, který uspokojuje potřeby přítomnosti, aniž by oslaboval možnosti budoucích generací naplňovat jejich vlastní potřeby.*“ [8]

Podmínkou rozvoje je zachování možností rozvoje; základní možností je přitom zachování přírodních podmínek v místním měřítku i v celé biosféře. Udržitelný rozvoj znamená především rovnováhu - rovnováhu mezi třemi základními oblastmi našeho života (ekonomikou, sociálními aspekty a životním prostředím), také rovnováhu mezi zeměmi, různými společenskými skupinami, dneškem a budoucností apod. [8]



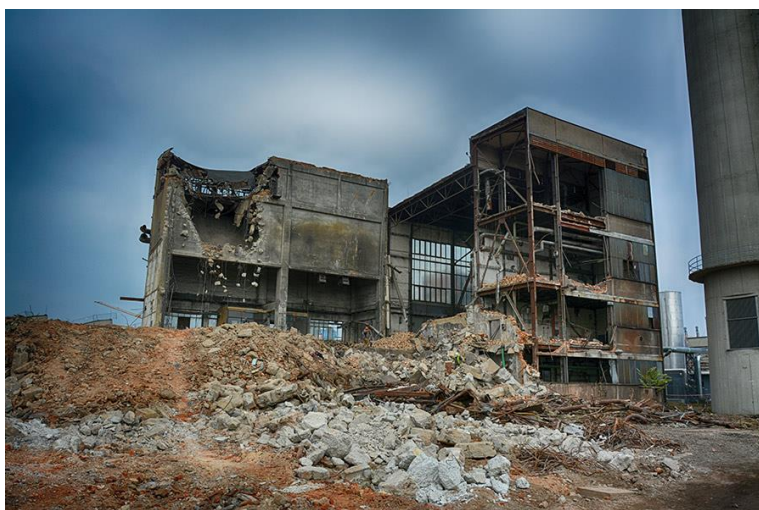
Obr. 4 – Trvale udržitelný rozvoj [9]

### 2.1.2 Výstavba

Cesta k udržitelné výstavbě je v uplatňování nových principů návrhu, nových materiálů a technologií jejich zpracování, nových technologií výstavby, včetně její organizace, nových metod posuzování a hodnocení staveb apod., při současném zachování architektonické a konstrukční pestrosti a variability v navrhování staveb. Takový přístup však vyžaduje akceptovat určité změny v pojetí architektury návrhu (např. zónování vnitřní dispozice s ohledem na energetické požadavky, uplatnění nových technických prvků v architektuře, jako jsou solární kolektory, fotovoltaické články aj.), ale i v pojetí konstrukčního řešení (například demontovatelné konstrukce, vysoce účinné tepelné izolace, využívání recyklovaných materiálů, využití konstrukčních prvků s optimalizovaným tvarem, rekuperace vzduchu, vytápění na bázi obnovitelných zdrojů aj.). [10]

## 2.2 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

Stavební a demoliční odpad je odpad vznikající při zřizování staveb, jejich údržbě, při změnách dokončených staveb a odstraňování staveb zařazovaných do skupiny 17, Katalogu odpadů vyhlášky č. 381/2011 Sb. (zejména vytěžené zeminy, stavební výrobky a materiály). [11]



*Obr. 5 – Neroztříděný stavební odpad [12]*



Stavební odpad je tříděn a recyklován, ať již přímým opakovaným použitím nebo po zpracování jako druhotná surovina při stavební výrobě. Ministerstvo životního prostředí v metodickém listu doporučuje, aby se jednotlivé konstrukční celky staveb opětovně využívaly k původnímu účelu. Pokud toto není možné, doporučuje odpad mechanicky (fyzikálně) upravit na recyklát a ten dále využít buď jako stavební výrobek, nebo jako materiál využitelný například k uzavírání a rekultivacím skládek, k zavážení vytěžených povrchových dolů, lomů a pískoven nebo k terénním úpravám, rekultivacím a jiným úpravám povrchů postižených lidskou činností. [7]

Při procesu recyklace platí, že kvalita recyklátů a efektivnost recyklace je přímo úměrná kvalitě demoličních prací, resp. nakládání a třídění materiálů z demolice přímo na místě. [13]

Z hlediska recyklace je velmi výhodné zvolit takový postup demoličních prací, který by také umožňoval využití celých stavebních prvků a dílců. Tímto druhem recyklace se tak rozumí nejenom zdrobňování, třídění a separace stavebních sutí a odpadů, ale také postupy vedoucí k přímému znovuvyužití celých stavebních prvků a dílců. [13]

Opětovné využití celých stavebních prvků je dnes možné spíše ve výjimečných případech. Jedná se zejména o problém, který je nutno řešit při projektování samotné stavby. To lze aplikovat především u staveb, jejíž existence se předpokládá v konkrétním ohraničeném časovém úseku a poté je plánována její demontáž. [13]

Při běžných demoličních pracích se ukázalo zcela nezbytné (z hlediska dalšího využití stavební sutě) provádět důsledné třídění. Je prokázáno, že třídění již na stavbě je mnohem účinnější a také levnější, než u výrobce recyklátu. Je to dáno zejména tím, že při demolici lze snadněji oddělit od minerální sutě veškeré cizorodé materiály - zejména dřevo, plasty, dehtové lepenky, kovy apod., než je to možné z netříděné sutě, která může vzniknout při nešetrné celkové demolici. [13]



Obr. 6 – Stavební odpad před drcením

### 2.3 ZÁSADY PRO NAKLÁDÁNÍ SE STAVEBNÍMI A DEMOLIČNÍMI ODPADY

Dle Plánu odpadového hospodářství ČR [7] je nutné za účelem splnění recyklačního cíle evropské rámcové směrnice o odpadech a přiblížení se „recyklační společnosti“ zabezpečit:

**Cíl:**

*„Zvýšit do roku 2020 nejméně na 70 % hmotnosti míru přípravy k opětovnému použití a míru recyklace stavebních a demoličních odpadů a jiných druhů jejich materiálového využití, včetně zásypů, při nichž jsou materiály nahrazeny v souladu s platnou legislativou stavebním a demoličním odpadem kategorie ostatní s výjimkou v přírodě se vyskytujících materiálů uvedených v Katalogu odpadů pod katalogovým číslem 17 05 04 (zemina a kamení).“ [7]*

## 2.4 ODBORNÉ ČLÁNKY ZABÝVAJÍCÍ SE TÉMATIKOU POUŽITÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU

**Studie fyzikálních, chemických a mineralogických vlastností jemného recyklovaného kameniva vyrobeného z betonového odpadu – L. Evangelista, M. Guedes, J. de Brito, A. C. Ferro, M. F. Pereira [14]**

Tato studie popisuje fyzikální, chemické a mineralogické vlastnosti jemného recyklovaného kameniva z betonového odpadu a porovnává je s přírodním jemným kamenivem. Autor studie zjistil, že se ve světě za jeden rok vyprodukuje 10 miliard kubických metrů betonu, což dokazuje, že je nejvíce používaným stavebním materiálem. 60 – 80 % objemu betonu je tvořeno kamenivem. Jeho těžba vytváří tlak na okolní ekosystémy. Písek je těžen z řek a přímořských oblastí. To ovlivňuje proudění řek, zvýšení přímořské eroze, ustupování pobřeží a ničí místní ekosystémy a život v nich. Dalším problémem stavebního průmyslu je významná produkce odpadů s odhadem 850 až 880 milionů tun/rok jen v EU.

V rámci studie byl proveden experimentální program, pro který byl použit jemný recyklovaný beton vyroben z betonu C25/30.X0.S3.Dmax25.C10,1. K drcení byl použit čelistový drtič o světlosti 40 mm a třech velikostí otvorů. Byl studován vliv těchto otvorů na vlastnosti částic. Dále byla stanovena objemová hmotnost, nasákavost, mineralogická analýza XRD a termická analýza.

Testováním bylo zjištěno, že množství jemných částic vznikajících při drcení závisí na velikosti otvoru čelisti drtiče. Při zvolení minimální velikosti otvoru vznikne zhruba 2,5 krát více jemných částic než při použití maximálního otvoru. Jemné recyklované kamenivo má o 10 až 15% nižší hustotu než jemné přírodní kamenivo z důvodu větší pórovitosti recyklovaného kameniva.

**Trvanlivost betonu s jemným recyklovaným betonovým kamenivem – L. Evangelista, J. de Brito [15]**

Na univerzitě Instituto Superior Técnico (zkráceně IST) v Lisabonu v Portugalsku byl proveden experimentální výzkum, který měl posoudit praktičnost využívání recyklované jemné betonové směsi k výrobě nového betonu. Experimentální výzkum

studuje vlastnosti betonu s různými poměry náhrad. Výsledky byly porovnány s referenčním betonem se stejným složením pouze bez použití recyklovaného kameniva.

Trvanlivost recyklovaného betonového kameniva byla zkoušena pomocí tří zkoušek: nasákavost ponořením, nasákavost skrze kapilaritu a pronikáním chloridů v neustáleném stavu.

Jako první byl navržen referenční beton (RC) a podle něj se stanovily zbývající směsi betonů. Poměr W/C (voda/cement) - v důsledku toho i kalibrace ostatních materiálů - musel být upraven v důsledku hranatějšího tvaru částic jemného recyklovaného kameniva, který vytváří větší vnitřní tření.

Dále bylo nutné přidat vodu, kterou recyklované kamenivo absorbovalo už během míchání, aby se zabránilo změnám při hydrataci. Byly tedy zvoleny dva různé poměry W/C: globální poměr W/C a efektivní W/C. Konečné složení betonových směsí je uvedeno v tabulce 2. Pro zkoušky byly použity tři druhy přírodního kameniva. Mechanické vlastnosti byly také testovány s velmi dobrými výsledky a prezentovány v článku Studie mechanických vlastností betonu s jemným recyklovaným betonovým kamenivem (výsledky zhodnoceny v této práci na str. 20 - 23)

Tab. 1 – Složení směsí betonu – převzato a přeloženo z [15]

Složení směsí betonu (/1m <sup>3</sup> )			
	RC	C30R	C100R
% náhrzení	0	30	100
Cement CEM I 42,5R (kg)	380	380	380
Voda (l)	155,8	170,2	180,9
Poměr W/C	0,41	0,45	0,48
Efektivní poměr W/C	0,41	0,44	0,45
Jemné přírodní kamenivo (kg)	668	460	0
Jemné recyklované kamenivo (kg)	0	154	509
Hrubé kamenivo 1 (kg)	409	402	400
Hrubé kamenivo 2 (kg)	382	376	374
Hrubé kamenivo 3 (kg)	397	390	388
Superplastifikátor (kg)	4,9	4,9	4,9

Při absorpci vody ponořením měl beton vyrobený s úplnou náhradou FNA (přírodní jemnozrnné kamenivo) za FRA (recyklované jemnozrnné kamenivo) zvýšenou vlhkost

o 46% a při náhradě 30% FRA měl vlhkost zvýšenou o 16,8%. Z toho vyplívá velmi dobrý poměr mezi nasákavostí a FRA/FNA.

Tab. 2 – Absorpce vody ponořením – převzato a přeloženo z [15]

Absorpce vody ponořením				
	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	Cv	$\Delta$ (%)
RC	11,3	0,11	0,0097	-
C30R	13,2	0,22	0,0167	16,8
C100R	16,5	0,32	0,0194	46

Výsledky jsou shrnuty v tabulce 4. Nasákavost se výrazně zvýšila (70,3%) pro beton s úplnou záměnou FRA za FNA. Beton s náhradou 30% FRA za FNA měl vlhkost zvýšenou o 34,4%. Při zvyšování objemu náhrady v betonu roste kapilarita, protože jemné recyklované kamenivo vytváří větší množství delších kapilár. Ačkoli přítomnost FRA zvyšuje nasákavost, použití například doplňkového cementu jako křemičitý úlet nebo vysokopecní struska místo portlandského cementu by mohlo omezit tento negativní vliv.

Tab. 3 – Korelační data pro Hallův kapilární model – převzato a přeloženo z [15]

Korelační data pro Hallův kapilární model					
	A	C	S	$\Delta S$ (%)	R2
RC	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,84 \times 10^{-5}$	$2,73 \times 10^{-4}$	-	0,895
C30R	$6,26 \times 10^{-5}$	$1,70 \times 10^{-5}$	$3,67 \times 10^{-4}$	34,4	0,975
C100R	$3,19 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-5}$	$4,65 \times 10^{-4}$	70,3	0,904

Průměrné výsledky získané v testu pronikání chloridu byly pro betonovou směs zvýšeny přibližně na 12% při náhradě 30% FRA za FNA a o 33,8% při 100% náhradě. Rozdíly výsledků mezi jednotlivými směsmi jsou logické, protože proces pronikání chloridových iontů je přímo závislý na pórovitosti.

Průměrná hloubka karbonatace se zvyšuje s poměrem nahrazení. Jak kapilární absorpce, tak vniknutí chloridu vykazovali stejný trend. Hloubka sycení oxidem uhličitým se zvyšuje téměř lineárně s poměrem náhrady. Při měření na 21 dní starém betonu bylo maximální zvýšení asi o 110% při 100% náhradě a maximální zvýšení o 40% při 30% náhradě FRA za FNA.

## Studie mechanických vlastností betonu s jemným recyklovaným betonovým kamenivem – L. Evangelista, J. de Brito [16]

Tato studie popisuje možnost nahrazení přírodního písku jemnou frakcí recyklovaného kameniva. První experimenty betonů s náhradou FNA (jemné přírodní kamenivo) za FRA (jemné recyklované kamenivo) nevykazovaly dobré vlastnosti a tato studie se snaží ukázat lepší pohled na mechanické vlastnosti betonu a jeho možné uplatnění ve stavebních konstrukcích.

Pro experimentální program byly použity stejné zkušební vzorky jako pro experimentální program, jehož výsledky popisuje článek: *Trvanlivost betonu s jemným recyklovaným betonovým kamenivem – L. Evangelista, J. de Brito*. Bylo nutné dopočítat efektivní poměr W/C (voda/cement) a podle toho upravit betonovou směs. Experimentální program byl rozdělen do třech různých fází. První fáze sloužila pro zjištění vhodné složení směsi pro zajištění vyhovující zpracovatelnosti. Druhá fáze sloužila pro testování k vyhodnocení mechanických vlastností jednotlivých směsí. Třetí fáze sloužila k důkladnějšímu zkoumání nejlepších směsí.

Tab. 4 – Složení směsí betonu – převzato a přeloženo z [16]

Složení směsí betonu (/1 m <sup>3</sup> )						
	RC	C10R	C20R	C30R	C50R	C100R
% náhrzení	0	10	20	30	50	100
Cement CEM I 42,5R (kg)	380	380	380	380	380	380
Voda (l)	155,8	160,6	165,4	170,2	175,6	180,9
Poměr W/C	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,48
Efektivní poměr W/C	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,45
Jemné přírodní kamenivo (kg)	668	598	529	460	327	0
Jemné recyklované kamenivo (kg)	0	52	103	154	254	509
Hrubé kamenivo 1 (kg)	409	407	404	402	400	400
Hrubé kamenivo 2 (kg)	382	380	378	376	374	374
Hrubé kamenivo 3 (kg)	397	395	393	390	388	388
Superplastifikátor (kg)	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9

Testování pevnosti tlaku bylo testováno pro tři různé fáze (výsledky druhé a třetí fáze se nelišily). Z výsledků plyne, že s pevnost v tlaku se při nahrazení jemného přírodního kameniva za jemné recyklované kamenivo liší jen minimálně. Z měření také vyplynulo, že pevnost v tlaku betonu bez obsahu jemného recyklovaného kameniva se téměř stabilizovala po 28 dnech. Pevnost v tlaku betonu s obsahem jemného

recyklovaného kameniva se zvyšuje delší dobu. Výsledky pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 5 – Výsledky pevností v tlaku – převzato a přeloženo z [16]

Výsledky pevností v tlaku					
	První fáze	$\Delta$	Druhá a třetí fáze	$\Delta$	$\delta$ (mezi fázemi)
	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)	(%)
RC	59,4	-	59,3	-	-0,2
C10R	62,2	4,7	59,0	-0,6	-5,3
C20R	58,4	-1,7	57,3	-3,4	-2,0
C30R	61,3	3,1	57,1	-3,7	-6,8
C50R	60,8	2,3	58,8	-0,8	-3,2
C100R	61	2,7	54,8	-7,6	-10,2

V tabulce 7 jsou uvedené výsledky pevnosti v tahu. Výsledky ukazují jasný pokles pevnosti při vyšším množství použití jemného recyklovaného kameniva do betonu. Nejvyšší problém s poklesem pevnosti v tahu je vyšší poréznost při použití FRA.

Pro srovnání výsledků modulu pružností slouží tabulka 8. Při 30% náhradě dochází k mírnému snížení modulu a při 100% náhradě je snížení výrazné.

Tab. 6 – Výsledky pevností v tahu za ohybu – převzato a přeloženo z [16]

Výsledky pevností v tahu za ohybu		
	$f_{ctm}$	$\Delta$
	(MPa)	(%)
RC	3,85	-
C30R	3,65	-5,2
C100R	2,95	-30,5

Tab. 7 – Výsledky modulu pružnosti – převzato a přeloženo z [16]

Výsledky modulu pružnosti		
	$E_c$	$\Delta$
	(GPa)	(%)
RC	35,5	-
C30R	34,2	-3,7
C100R	28,9	-18,5

Tento experimentální program prokázal, že lze použít jemné recyklované kamenivo při výrobě konstrukčního betonu. Hlavně při nižších poměrech náhrady (do 30%) nedochází k většímu ovlivnění mechanických vlastností betonu.

## **Vlastnosti betonu obsahujícího jemné recyklované kamenivo – J. M. Khatib [17]**

Tato studie se zabývala možností náhrady jemné frakce kameniva recyklovaným. Pro zkoušení byly použity dva typy recyklátu, prvním byl drcený beton a druhým byly drcené cihly.

Maximální velikost zrna recyklátu byla 5 mm. Bylo navrženo celkem devět směsí, z nichž první byla referenční (pouze s přírodním pískem), ve zbylých osmi bylo jemné kamenivo nahrazeno rozdílným množstvím recyklátu (25%, 50%, 75% a 100%) buď betonovým anebo cihelným. Pro snadnou porovnatelnost měly všechny směsi stejný vodní součinitel W/C (voda/cement).

U betonu s betonovým recyklátem se pokles pevnosti v tlaku po 28 dnech pohyboval v rozmezí 25% - 35%, v závislosti na množství recyklátu. U betonu s cihelným recyklátem se pokles pevnosti v tlaku pohyboval v rozmezí 15% - 30% a také byl závislý na množství obsaženého recyklátu. Objemová hmotnost betonu s betonovým recyklátem byla nižší zhruba o 5% a zhruba o 7% u betonu s cihelným recyklátem než objemová hmotnost referenčního betonu.

## **2.5 RECYKLOVANÉ KAMENIVO**

*„Kamenivo anorganického původu, které bylo dříve použito ve stavební konstrukci“* [18] z různých recyklačních středisek a odlišného stavebního odpadu má odlišné geometrické, fyzikální a chemické vlastnosti, a proto je nutné pečlivé testování recyklátu.

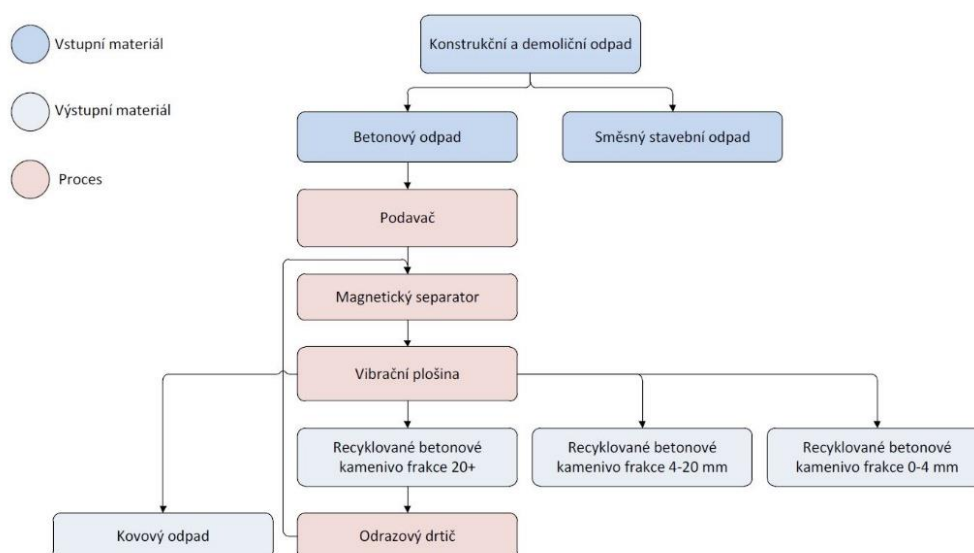




Obr. 7 – Recyklované kamenivo po nadrcení (hrubá frakce)

### 2.5.1 Postup recyklace, recyklační střediska

Jak je patrné z diagramu pod textem, v první řadě je důležité roztřídit odpad na betonový odpad a směsný stavební odpad. Dále bude kamenivo nadrceno, odloučeny kovy z železobetonu a přes vibrační plošinu propadávají kameniva o různých frakcích (viz obr. 5). Kamenivo, které nepropadne skrz vibrační plošinu, projde celým procesem znovu.



Obr. 8 – Schéma doporučeného průběhu recyklace [19]



*Obr. 9 – Vibrační plošina*

#### 2.5.2 Zkoušení vlastností recyklovaného kameniva

Požadované vlastnosti a podmínky pro použití recyklovaného kameniva jsou v České republice definovány především normou ČSN EN 12620 + A1 [18]. Zde jsou předepsány požadované vlastnosti kameniva do betonu získaného úpravou přírodního, umělého nebo recyklovaného materiálu. Dále je v této normě uveden seznam zkoušek a norem, podle kterých jsou zkoušky kameniva prováděny. Možnosti použití recyklovaného kameniva do betonu jsou uvedeny v dodatku A1 ve vydání z roku 2008. Dle normy EN 206 Beton [20] je recyklované kamenivo děleno do dvou skupin (druh A, druh B). Množství recyklovaného kameniva, které je možné do betonu přidat bez nutnosti zkoušení jeho vlastností, závisí na typu recyklovaného kameniva a požadované expoziční třídě betonu.

Tab. 8 – Maximální procento nahrazení kameniva (% hmotnosti) [20]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Všechny ostatní stupně <sup>a</sup>
Typ A: (Rc <sub>90</sub> , Rcu <sub>95</sub> , Rb <sub>10-</sub> , Rd <sub>1-</sub> , FL <sub>2-</sub> , XRg <sub>1-</sub> )	50%	30%	30%	0%
Typ B <sup>b</sup> : (Rc <sub>50</sub> , Rcu <sub>75</sub> , Rb <sub>30-</sub> , Rd <sub>5-</sub> , FL <sub>2-</sub> , XRg <sub>2-</sub> )	50%	20%	0%	0%
<sup>a</sup> Recyklované kamenivo druhu A ze známého zdroje se může použít pro stupně prostředí, pro které byl navržen původní beton, s maximálně 30%-ním nahrazením.				
<sup>b</sup> Recyklované kamenivo druhu B se nepoužívá do betonu třídy pevnosti v tlaku > C30/37				

K určování vlastností recyklovaného kameniva slouží zkoušky popsané v normě ČSN EN 12620 + A1 [18], které jsou rozděleny do tří skupin - geometrických, fyzikálních a chemických vlastností. Recyklované kamenivo má odlišné vlastnosti od přírodního kameniva, proto je důležité otestovat vlastnosti recyklovaného kameniva. Tyto odlišnosti je třeba zohlednit při návrhu betonové směsi. Důležité je, že recyklované kamenivo musí splňovat totožné podmínky jako přírodní kamenivo.

#### 2.5.2.1 Geometrické vlastnosti

##### Prosévací zkouška

Norma ČSN EN 933 – 1 [21] popisuje prosévací zkoušku. Prosévací zkouška se provádí přeseťm vzorku vysušené zeminy přes sadu sít R20. Základní sada podle ISO 565:1990 je tvořena síty o velikosti ok 0,063 mm, 0,125 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm a 63 mm. Vysušený a propraný materiál o předepsané hmotnosti se nasype na síta naskládaná na sebe. Sloupec sít obsahuje dno a určitý počet sít, která jsou uspořádána od horního síta k dolnímu podle zmenšující se velikosti otvorů. Zbytky vzorku na jednotlivých sítích se pečlivě zváží a jejich podíl se vyjádří v procentech původní celkové hmotnosti vzorku.



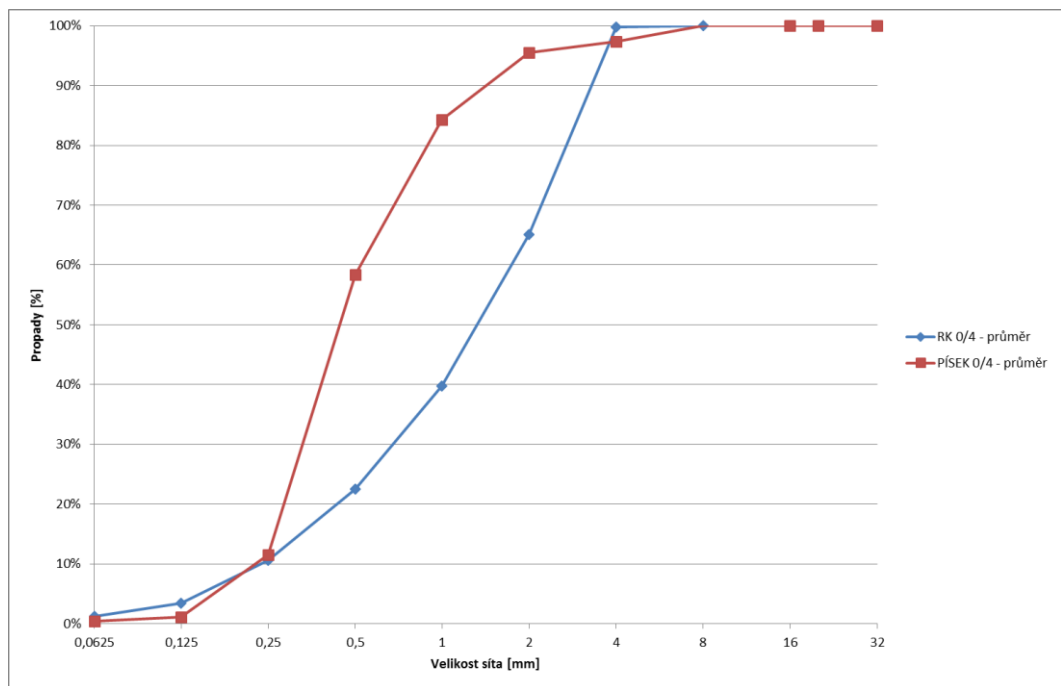
*Obr. 10 – Elektro-magnetická prosévačka kameniva*



*Obr. 11 – Recyklované kamenivo na sítu*

### **Křivka zrnitosti**

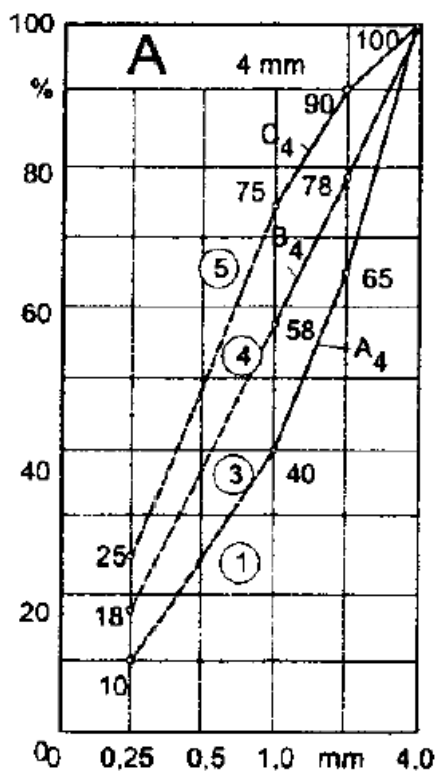
Výsledkem prosévací zkoušky je křivka zrnitosti. Křivka vyjadřuje procentuální zastoupení jednotlivých propadů skrz oka síta dané velikosti. Na ose X jsou vyneseny velikosti ok sít a na ose Y propad daným sítem.



Obr. 12 – Příklad křivky zrnitosti

### Ideální křivka zrnitosti

Ideální křivka zrnitosti slouží k dosažení skladby kameniva s minimální mezerovitostí a můžeme ji charakterizovat jako zrnitost, při které se na dosažení vyžadované zpracovatelnosti a pevnosti betonu je potřeba minimální množství cementu. [22]



Oblasti:

1 a 5 – nevhodná zrnitost

(2 – křivka přerušené zrnitosti)

3 – dobrá zrnitost

4 – ještě použitelná zrnitost

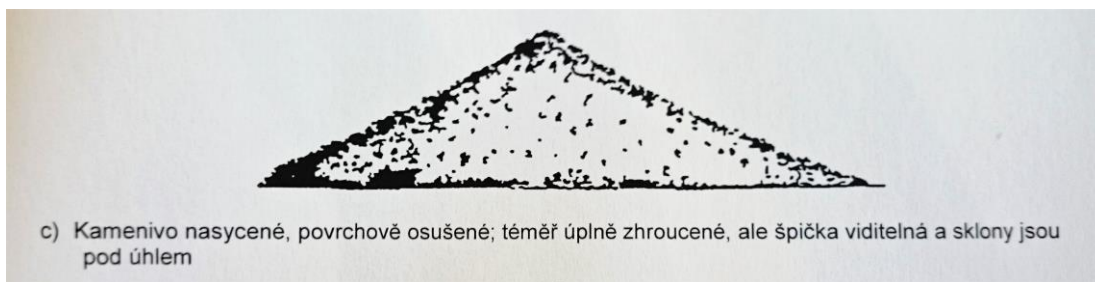
Obr. 13 – Oblast ideální křivky zrnitosti [22]

### 2.5.2.2 Fyzikální vlastnosti

#### Nasákavost

Nasákavost udává maximální možný stav vlhkosti, který dosáhne vzorek ponořený do kapaliny (vody). Maximální hodnota nasákavosti (úplné nasycení) je dosažena po různě dlouhé době ponoření vzorku do kapaliny; jde o moment, kdy jsou všechny otevřené póry vyplněny kapalinou a hmotnost takto nasáklého vzorku už s časem nenarůstá (ustálená hmotnost).

Nasákavost a objemová hmotnost kameniva je zkoušena pyknometrickou zkouškou, která je popsána v normě ČSN EN 1097 – 6 [23]. Zkušební vzorek o předepsané hmotnosti je vložen do pyknometru naplněného vodou, který je poté doplněn vodou až po rysku. Převalováním a protřepáváním v nakloněné poloze, dojde k odstranění vzduchových bublin, poté k osušení pyknometru na vnějším povrchu a zvážení. Po 24 hodinách dojde k vyjmutí kameniva z pyknometru. Prázdný pyknometr se opět naplní vodou až po rysku a zváží. Kamenivo je rozloženo na plech, kde je povrchově osušeno.



*Obr. 14 – Povrchově osušené jemné kamenivo [23]*

Povrchové osušení jemného kameniva probíhá rozložením kameniva do jedné vrstvy, kde se nechá rovnoměrně osušet horkým vzduchem. Poté se zváží a následně je po dobu 24 hodin sušeno v sušárně s cirkulací vzduchu o teplotě  $110 \pm 5$  °C. Po vyjmutí ze sušárny se kamenivo nechá vychladnout na okolní teplotu a opět se zváží.

Nasákavost kameniva vodou po 24 hodinách se vypočte jako:

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (1)$$

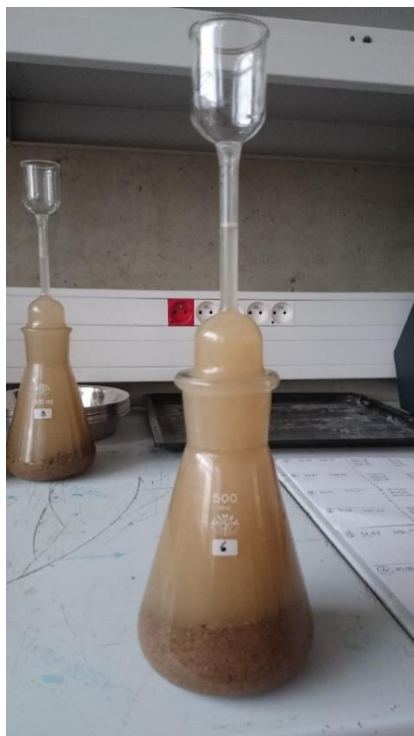
Kde

$WA_{24}$  = nasákavost kameniva po 24 hodinách (%)

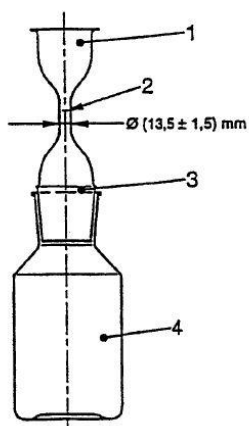
$M_1$  = hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva (g)

$M_4$  = hmotnost vysušeného zkušební vzorku (g)





Obr. 15 – Pycnometr



**Legenda:**

- 1 – skleněná nálevka
- 2 – ryska
- 3 – zábrus, který odpovídá širokému hrdlu baňky
- 4 – baňka se širokým hrdlem a plochým dnem

Obr. 16 – Popis pycnometru [23]

**Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost je také zjišťována pomocí pycnometrické metody, která je popsána v normě ČSN EN 1097 – 6 [23]. Z výsledků lze určit objemovou hmotnost zrn  $\rho_a$ , objemovou hmotnost zrn po vysušení v sušárně  $\rho_{rd}$  a objemovou hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených  $\rho_{ssd}$ .



Objemová hmotnost zrn se vypočte jako:

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (2)$$

kde

$\rho_a$  = objemová hmotnost zrn ( $Mg/m^3$ )

$M_2$  = hmotnost pyknometru obsahující kamenivo nasycené vodou (g)

$M_3$  = hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou (g)

$M_4$  = hmotnost zkušebního vzorku vysušeného v sušárně (g)

Objemová hmotnost v plně nasyceném stavu se vypočte jako:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3)$$

kde

$\rho_{ssd}$  = objemová hmotnost kameniva v plně nasyceném stavu ( $Mg/m^3$ )

$M_1$  = hmotnost nasyceného a povrchově osušeného kameniva (g)

$M_2$  = hmotnost pyknometru obsahující kamenivo a vodu (g)

$M_3$  = hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou (g)

Objemová hmotnost ve vysušeném stavu se vypočte jako:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4)$$

kde

$\rho_{rd}$  = objemová hmotnost kameniva ve vysušeném stavu ( $Mg/m^3$ )

$M_1$  = hmotnost nasyceného a povrchově osušeného kameniva (g)

$M_2$  = hmotnost pyknometru obsahující kamenivo a vodu (g)

$M_3$  = hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou (g)

$M_4$  = hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně (g)

### 2.5.3 Rozdíly mezi recyklovaným a přírodním kamenivem

Dle normy ČSN EN 12620 + A1 [18] je přírodní kamenivo definováno jako kamenivo anorganického původu, které bylo vystaveno jen mechanickému procesu. Naproti tomu recyklované kamenivo je pouze anorganické kamenivo, které bylo dříve použito v konstrukci.

Z fyzikálních vlastností dochází k největším rozdílům u nasákavosti, kterou zapříčiňuje především přítomnost cementového tmelu na povrchu kameniva. Dále ji ovlivňuje složení látek, velikost zrna a vlastnosti původního kameniva. Jemné frakce recyklovaného kameniva mají vyšší nasákavost, a proto je výhodnější jím v betonové směsi nahrazovat hrubší frakce. Vyšší nasákavost recyklovaného kameniva ovlivňuje již samotný návrh receptury betonu, kdy může dojít ke zkreslení hodnoty vodního součinitele a dále pak odolnost kameniva proti mrazu. Dalšími fyzikálními vlastnostmi, kde dochází ke zhoršení vlastností oproti přírodnímu kamenivu, jsou objemová hmotnost, odolnost proti drcení a oděru. Nebylo však prokázáno, že na zmiňované fyzikální vlastnosti má vliv pevnostní třída původního betonu.

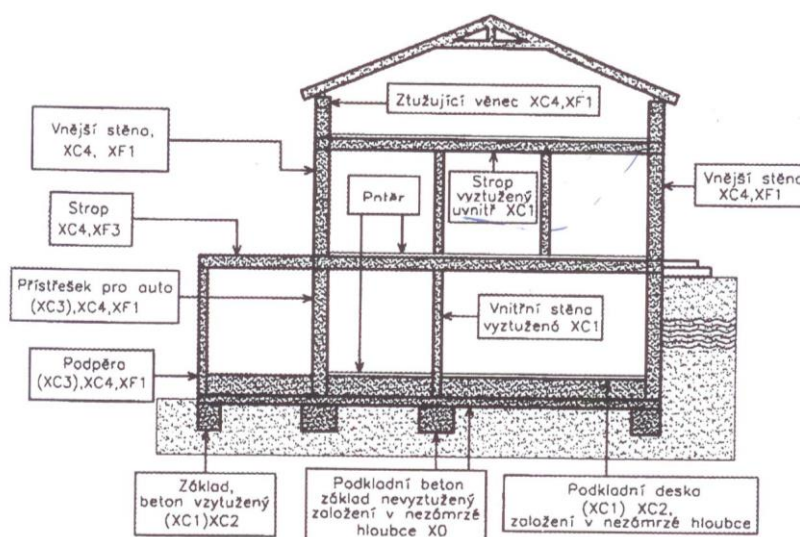
## 2.6 RECYKLOVANÝ BETON

Recyklovaný beton je beton, u kterého je část přírodního kameniva nahrazena recyklovaným kamenivem. Recyklované kamenivo má odlišné vlastnosti a je nutné upravit návrh betonové směsi. Beton z recyklátu z různých recyklačních středisek a odlišného stavebního odpadu má odlišné geometrické, fyzikální a chemické vlastnosti, a proto je nutné pečlivé testování výsledného betonu.

### 2.6.1 Požadavky na beton

Možnost použití daného betonu do dané konstrukce je ovlivněna expozičními třídami betonu. Expoziční třídy určují prostředí, ve kterém bude betonová konstrukce

používána. Garantuje minimálně padesátiletou trvanlivost betonu, se kterou se pojí i výběr vstupních surovin, návrh betonové směsi a budoucí požadavky na beton a dále definuje například maximální požadavky na vodní součinitel, minimální množství cementu a minimální pevnost betonu.



Obr. 17 – Třídy vlivu prostředí – konstrukce [24]

Stupně vlivu prostředí - doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu									
Stupeň	Popis prostředí	Max. w/c	Min. tř. betonu	Min. mn. cem. [kg/m <sup>3</sup> ]	Stupeň	Popis prostředí	Max. w/c	Min. tř. betonu	Min. mn. cem. [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>X0</b>	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	---	C12/15	---	<b>XF</b>	Střídavé působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly), s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich			
<b>XC</b>	Koroze vlivem karbonatace				<b>XF1</b>	mírně nasycen vodou, bez rozmrazovacích prostředků	0,55	C30/37	300
<b>XC1</b>	suché nebo stále mokré	0,65	C20/25	260	<b>XF2</b> a)	mírně nasycen vodou, s rozmrazovacími prostředky	0,55	C25/30	300
<b>XC2</b>	mokré, občas suché	0,60	C25/30	280	<b>XF3</b> a)	značně nasycen vodou, bez rozmrazovacích prostředků	0,50	C30/37	320
<b>XC3</b>	středně mokré, vlhké	0,55	C30/37	280	<b>XF4</b> a)	značně nasycen vodou, s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou	0,45	C30/37	340
<b>XC4</b>	střídavě mokré a suché	0,50	C30/37	300	<b>XA</b>	Chemicky agresivní prostředí			
<b>XD</b>	Koroze způsobená chloridy jinými než z mořské vody				<b>XA1</b>	slabě agresivní chemické prostředí (viz tabulka dále)	0,55	C30/37	300
<b>XD1</b>	středně mokré, vlhké	0,55	C30/37	300	<b>XA2</b> b)	středně agresivní chemické prostředí (viz tabulka dále)	0,50	C30/37	320
<b>XD2</b>	mokré, občas suché	0,55	C30/37	300	<b>XA3</b> b)	vysoce agresivní chemické prostředí (viz tabulka dále)	0,45	C35/45	360
<b>XD3</b>	střídavě mokré a suché	0,45	C35/45	320					
<b>XS</b>	Koroze způsobená chloridy z mořské vody								
<b>XS1</b>	vystaven slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou	0,50	C30/37	300					
<b>XS2</b>	trvale ponořen ve vodě	0,45	C35/45	320					
<b>XS3</b>	smáčený a ostříkovaný přílivem	0,45	C35/45	340					

Poznámky:  
a) Minimální obsah vzduchu 4 %. Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet podle příslušné zkušební metody ve srovnání s betonem, u kterého byla prokázána odolnost proti mrazu a rozmrazování (mrazovým cyklům), pro příslušný stupeň vlivu prostředí  
b) Pokud množství SO<sub>2</sub> vyvolává stupeň vlivu prostředí XA2 a XA3, je nezbytné použít síranovzdorný cement.

Obr. 18 – Třídy vlivu prostředí – vlastnosti betonu [25]

## 2.6.2 Zkoušení vlastností recyklovaného betonu

### 2.6.2.1 Zkoušení čerstvého betonu

#### **Zkouška rozlitím**

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1015-3 [26]. Zkouška je vhodná pro zjištění konzistence malt a jemnozrnných betonů.

Forma se nadvakrát naplní a každá vrstva se desetkrát zhutní dusadlem. Po odstranění formy se patnácti zdvihy desky, na které je čerstvý beton, dosáhne rozlití betonu.

Stupeň rozlití se stanoví jako průměr dvou na sebe kolmých rozměrů rozlitého betonu. Stupeň rozlití se určí dle tabulky.

### 2.6.2.2 Zkoušení ztvrdlého betonu

#### **Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost se provádí dle normy ČSN EN 12390-7 [27]. Existují tři stavy, kdy může být objemová hmotnost u zkušebního tělesa testována – přirozeně vlhké, plně nasyceno a vysušené v sušárně.

Pro zjištění objemové hmotnosti je důležité zvážit vzorek a změřit jeho rozměry, ze kterých poté vypočteme objem vzorku.

$$D = \frac{m}{V} \quad (5)$$

kde

*D = objemová hmotnost zkušebního tělesa pro příslušné podmínky a způsobu stanovení objemu (kg/m<sup>3</sup>)*

*m = hmotnost zkušebního tělesa v podmínkách v době zkoušení (kg)*

*V = objem stanovený příslušným způsobem (m<sup>3</sup>)*

### **Dynamický modul pružnosti**

Dynamický modul pružnosti se stanovuje podle normy ČSN 73 1371 [28] a ČSN EN 12504-4 [29]. Stanovuje se ultrazvukovou metodou – ze stanovené rychlosti šíření ultrazvuku a délky měřicí základny. Impuls podélných vibrací je vyvolán elektroakustickým budičem. Při průchodu betonem je impuls vibrací přeměněn na elektrický signál, který je zachycen snímačem.

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (6)$$

kde

$v_L$  = rychlost impulsu (km/s)

$L$  = délka měřicí základny (mm)

$T$  = čas včetně  $T_{kor}$ , který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou ( $\mu s$ )

$T_{kor}$  = korekce – skládá se z mrtvého času přstroje a z rozdílu času šíření impulsů (g)

### **Nasákavost**

Nasákavost betonu je zkoušena na krychlích o hraně 100 mm. Vzorky jsou po dobu 24 dní ponořeny do vodní lázně, po vyjmutí je nutné krychle povrchově osušit a zvážit. Poté se uloží do sušárny o teplotě  $105 \pm 2$  °C dokud se neustálí jejich hmotnost. Poté je důležité zvážit vysušené vzorky.

$$WA_i = \frac{100 * M_1 - M_2}{M_2} \quad (7)$$

kde

$WA_i$  = nasákavost ponořením (%)

$M_1$  = hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku betonu (kg)

$M_2$  = hmotnost vysušeného vzorku betonu ze sušárny (kg)

### **Kapilární nasákavost**

Kapilární nasákavost je zkoušena na vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Vzorky byly ponořeny po dobu 72 hodin do vody o výšce 5 mm nad základnou vzorku. Množství absorbované vody je pravidelně kontrolováno periodickým vážením vzorku. Nejprve po 5 minutách, další vážení bylo po 15 minutách, poté každou hodinu po prvních šest hodin a nakonec po 12 hodinách. Výpočet nasákavosti kapilaritou se zjistí pomocí vzorce:

$$WA_c = \frac{M_1 - M_2}{A} \quad (8)$$

kde

$WA_c$  = kapilární nasákavost ( $kg/m^2$ )

$M_1$  = hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku betonu ( $kg$ )

$M_2$  = hmotnost vzorku betonu na vzduchu ( $kg$ )

$A$  = plocha nasycení ( $m^2$ )

### **Pevnost v tlaku**

Zkouška je definována normou ČSN EN 12390 – 3 [30]. Pevnost v tlaku je zkoušena na zkušebních vzorcích ve tvaru krychle o velikosti hrany 150 mm nebo válce o rozměrech: průměr 150 mm a výška 300 mm. Očištěný zkušební vzorek s maximálními předepsanými odchylkami se vloží přesně dostředně mezi tlačné desky lisu tak, aby tlak působil kolmo ve směru hutnění. Jedna z desek lisu (obvykle horní) musí být kloubově uložena, druhá deska lisu je pevná. Zkušební vzorek je zatěžován předepsanou rychlostí, než dojde k jeho úplnému porušení. Maximální síla, při které došlo k porušení vzorku, se zaznamená a vypočte se pevnost v tlaku. Podle vypočtených pevností se beton zařadí do jedné z pevnostních tříd dle normy ČSN EN 206 – 1 [20].

Pevnost v tlaku se vypočte jako:

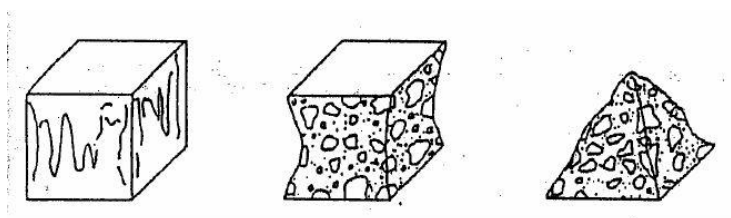
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (9)$$

kde

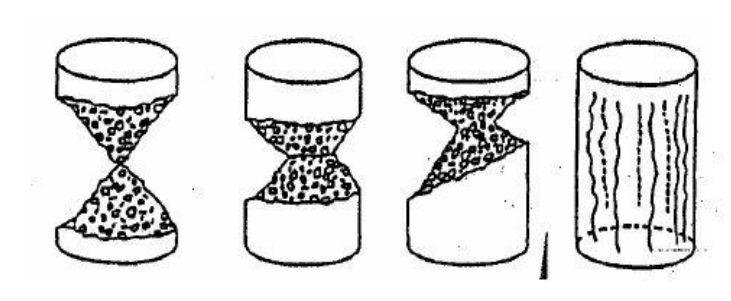
$f_c$  = pevnost v tlaku ( $N/mm^2$ )

$F$  = maximální zatížení, při kterém došlo k poruše vzorku ( $N$ )

$A_c$  = plocha tělesa, na kterou působí zatížení ( $mm^2$ )



Obr. 19 – Vyhovující způsoby porušení krychlí [30]



Obr. 20 – Vyhovující způsoby porušení válců [30]



Obr. 21 – Zkouška pevnosti v tlaku

## Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška je definována normou ČSN EN 12390 – 3 [30]. Zkušební vzorky musí splňovat maximální předepsané odchylky. Zkušební vzorek je do lisu umístěn centricky, podélnou osou kolmo k podélným osám horních a dolních válečků. Je nutné, aby referenční směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Počáteční zatížení vzorku by nemělo přesáhnout 20% odhadovaného zatížení při porušení vzorku. Zatěžování probíhá konstantní rychlostí v předepsaném rozsahu až do porušení zkušebního vzorku. Maximální zatížení při porušení se zaznamená a vypočte se pevnost v tahu ohybem.

Pevnost v tahu za ohybu se vypočte jako:

$$f_{cf} = \frac{3 * F * l}{2 * d_1 * d_2^2} \quad (10)$$

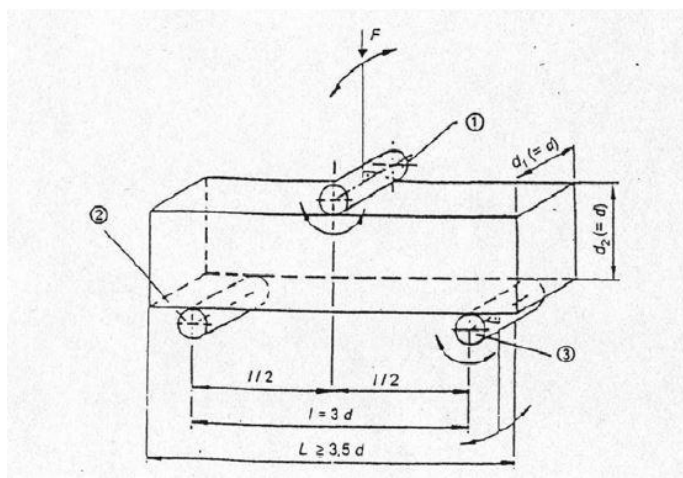
kde

$f_{cf}$  = pevnost v tahu za ohybu ( $N/mm^2$ )

$F$  = maximální zatížení při porušení vzorku ( $N$ )

$l$  = vzdálenost mezi podpěrnými válečky ( $mm$ )

$d_1$  a  $d_2$  = rozměry příčného řezu zkušebního vzorku ( $mm$ )



Obr. 22 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [30]





*Obr. 23 – Zkouška pevnosti v tahu za ohybu*

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální program byl rozdělen na dvě části. První část byla zaměřena na stanovení geometrických a fyzikálních vlastností recyklovaného jemnozrnného kameniva a následného porovnání s přírodním pískem. Druhá část byla věnována samotné betonové směsi s použitím recyklovaného kameniva. Vlastnosti čerstvého a ztvrdlého recyklovaného betonu byly porovnány s vlastnostmi běžného betonu.

Pro experiment byly navrženy betonové směsi s 5, 10 a 15% příměsí recyklovaného cementového prachu a 10, 20 a 30% jemného recyklovaného kameniva frakce 0/4. Pro porovnání byla vytvořena jedna tzv. referenční směs, ve které bylo použito pouze přírodní kamenivo a portlandský cement. Jednalo se o směs bez recyklované složky.

#### 3.1 ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

Z důvodu nestálých vlastností recyklovaného kameniva, u kterého není zaručené přesné složení, je důležité jeho vlastnosti vyzkoušet.

##### 3.1.1 TESTOVANÉ RECYKLOVANÉ KAMENIVO

Pro první část experimentálního programu bylo použito betonové recyklované kamenivo z recyklačního střediska v Plzni. Z recyklačního střediska byly dodány kusy betonu frakce 32/64. Kamenivo bylo rozdrceno na požadovanou frakci pro experimentální část. Na obrázcích 24 a 25 jsou fotografie zobrazující písek a zmíněné recyklované kamenivo.



*Obr. 24 – Použitý písek*



*Obr. 25 – Použité recyklované kamenivo*

### 3.1.2 ZKOUŠENÍ GEOMETRICKÝCH VLASTNOSTÍ KAMENIVA

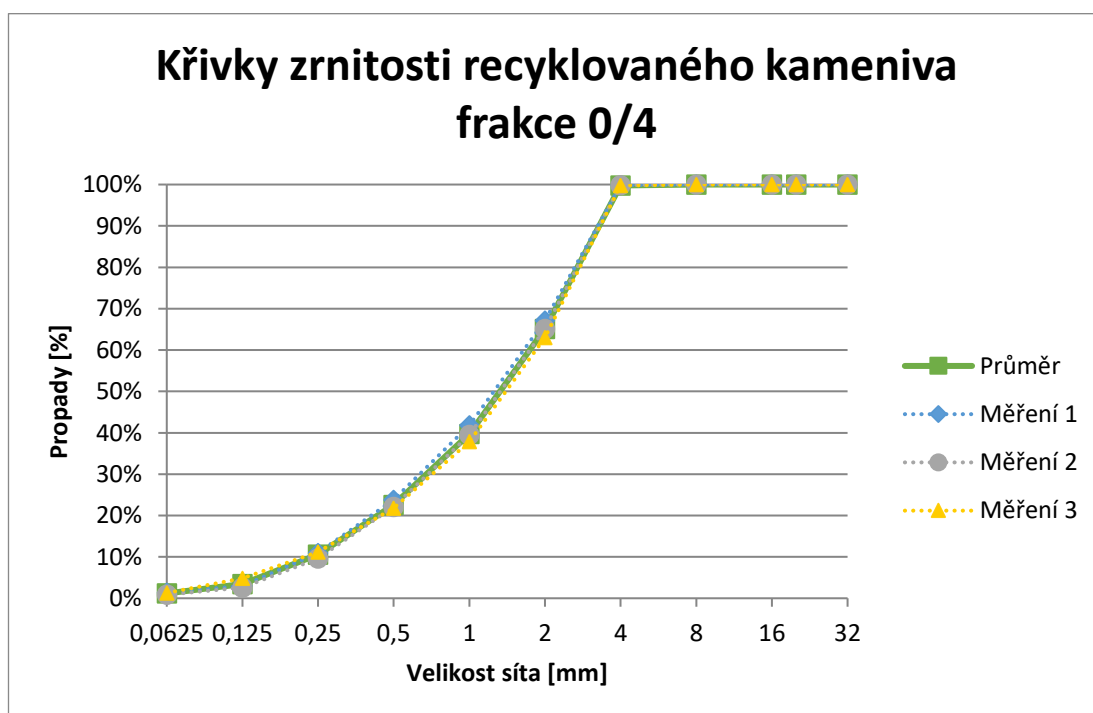
Mezi nejdůležitější geometrické vlastnosti kameniva přidávaného do betonu patří zrnitost, modul jemnosti a obsah jemných částic. Zjišťování geometrických vlastností je tzv. prosévací zkouškou, která je předepsána v normě ČSN EN 12620 + A1 [18].

Prosévací zkouškou bylo otestováno recyklované kamenivo frakce 0/4 a písek. Na obrázku 26 je fotografie zbytku kameniva na sítu o velikosti otvorů 0,5 mm.

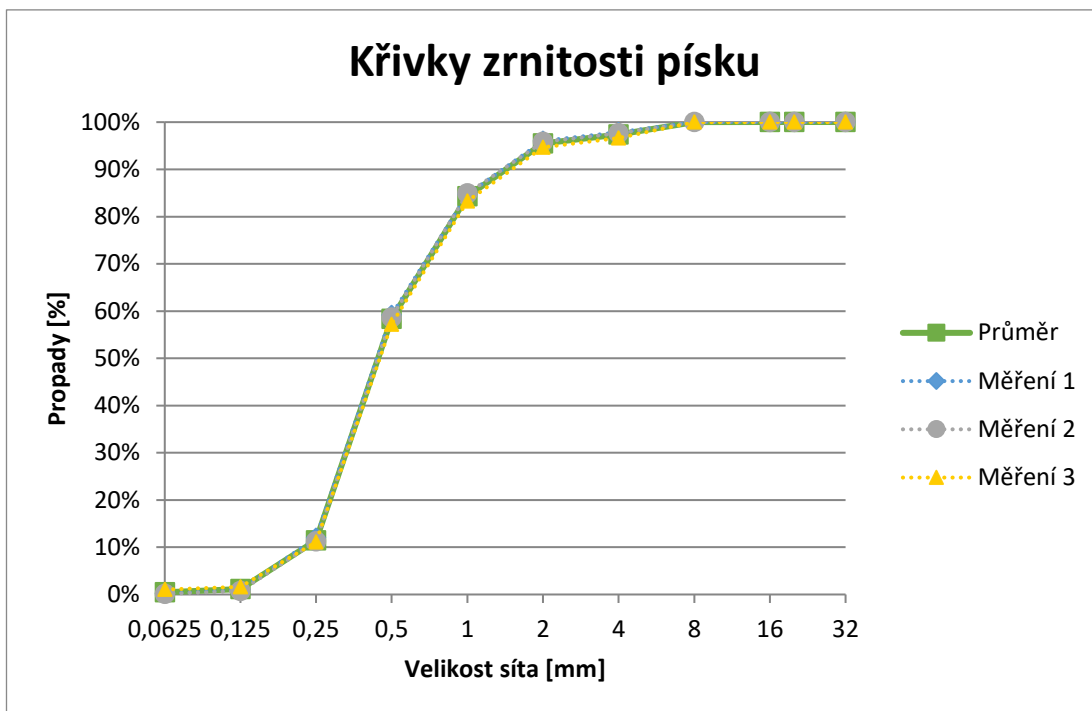


Obr. 26 – Recyklované kamenivo zachycené na sítu o velikosti otvorů 0,5 mm

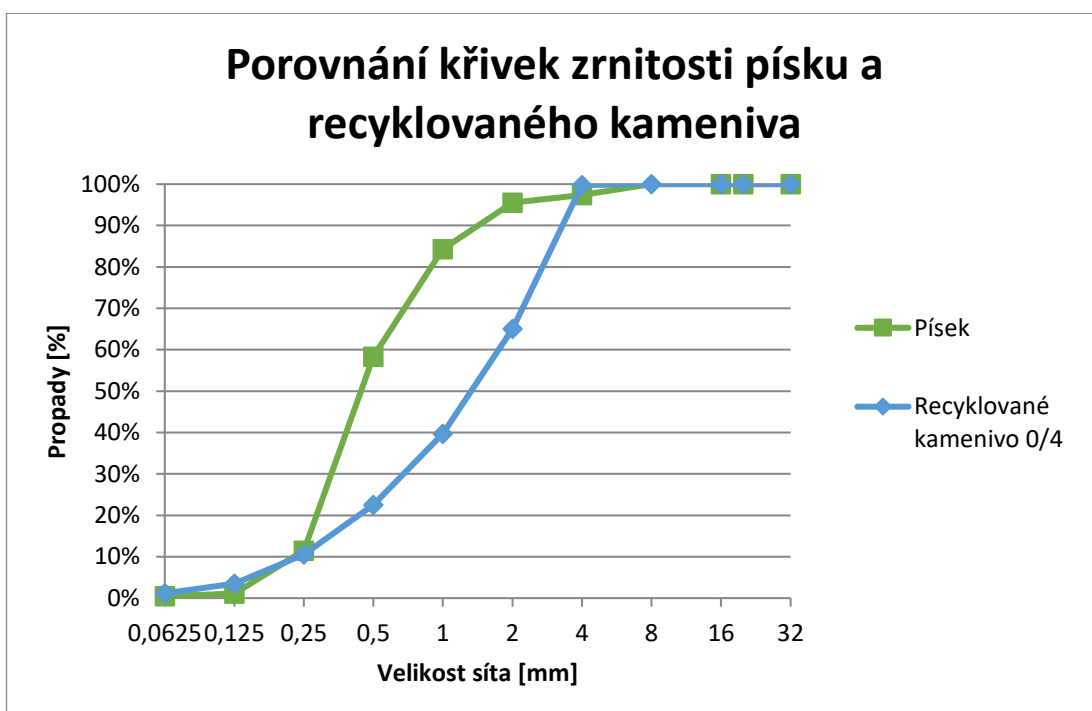
### ZRNITOST



Obr. 27 – Graf křivek zrnitosti recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm



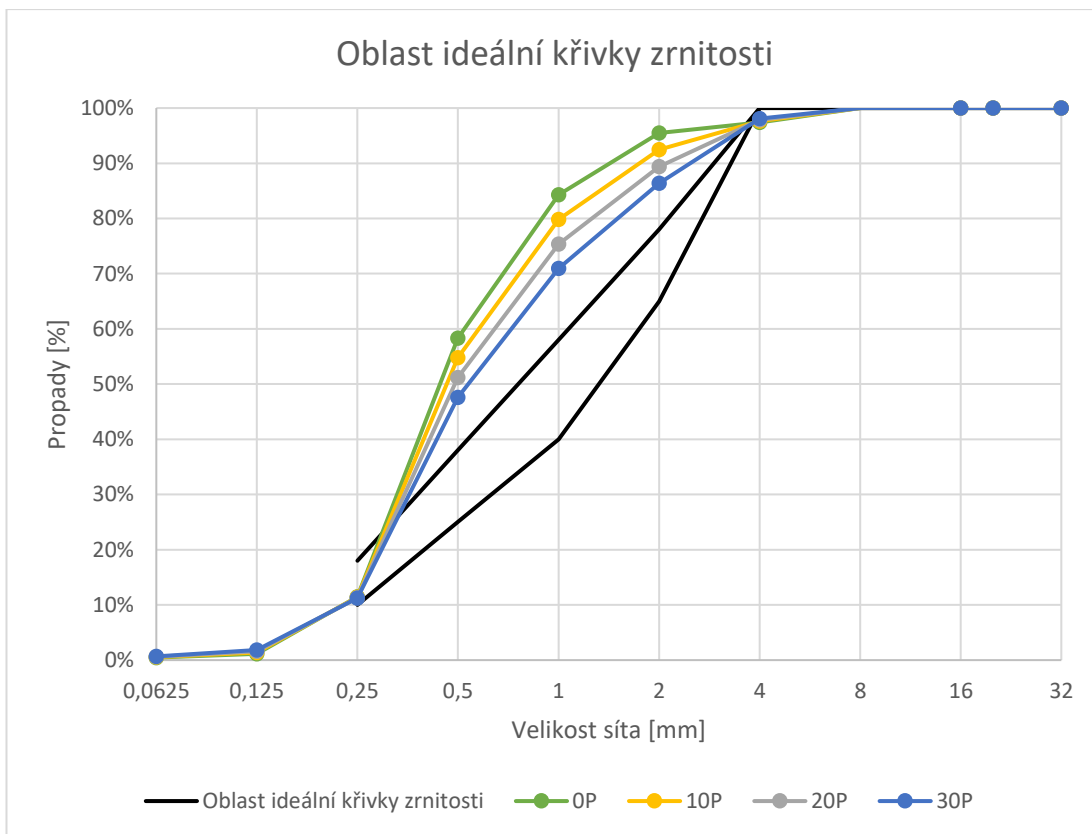
Obr. 28 – Graf křivek zrnitosti písku frakce 0/4 mm



Obr. 29 – Graf porovnání křivek zrnitosti písku a recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm

Na obrázku 27 a 28 je graf zobrazující křivky zrnitosti jemného recyklovaného kameniva frakce 0/4 a písku, které byly vytvořeny z výsledků prosévací zkoušky.

Z grafů je jasně patrné, že křivky zrnitosti recyklovaného kameniva a písku se liší. Odlišnost jejich křivek zrnitosti lze nejlépe pozorovat na obrázku 29. Lze pozorovat, že písek obsahuje větší množství částic, které se zachytily na jemnějších sítích. Z grafu je patrné, že největší množství zachyceného písku zůstalo na sítích 0,25 a 0,5 mm. Jemné recyklované kamenivo obsahuje nejvíce částic zachycených na sítích 1 a 2 mm. Této odlišnosti lze využít při návrhu betonové směsi. Vhodnou kombinací poměru recyklovaného kameniva a písku v betonu lze zlepšit mechanické vlastnosti betonu. Při jejich kombinaci se přibližuje ideální křivce zrnitosti kameniva do betonu. Tato oblast je zobrazena na obrázku 30.



Obr. 30 – Oblast ideální křivky zrnitosti a porovnání s navrženým kamenivem

Na obrázku 30 je již zmíněná oblast ideální zrnitosti kameniva a porovnání s navrženými poměry recyklovaného kameniva a písku použitého pro výrobu betonu, který byl testován. Při zvýšení poměru jemného recyklovaného kameniva na úkor písku se výsledná křivka zrnitosti přibližuje do ideální oblasti. To lze aplikovat jen do určité míry, protože s tím také souvisí zhoršená zpracovatelnost a vyšší nasákavost.



### 3.1.3 ZKOUŠENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ KAMENIVA

Z fyzikálních vlastností kameniva byla zkoušena nasákavost a objemová hmotnost. U těchto vlastností dochází k velkým rozdílům mezi přírodním a recyklovaným kamenivem. Zkoušení fyzikálních vlastností se provádí pyknometrickou zkouškou, která je popsána v normě ČSN EN 1097-6 [23].



Obr. 31 – Pyknometrická zkouška jemného recyklovaného kameniva

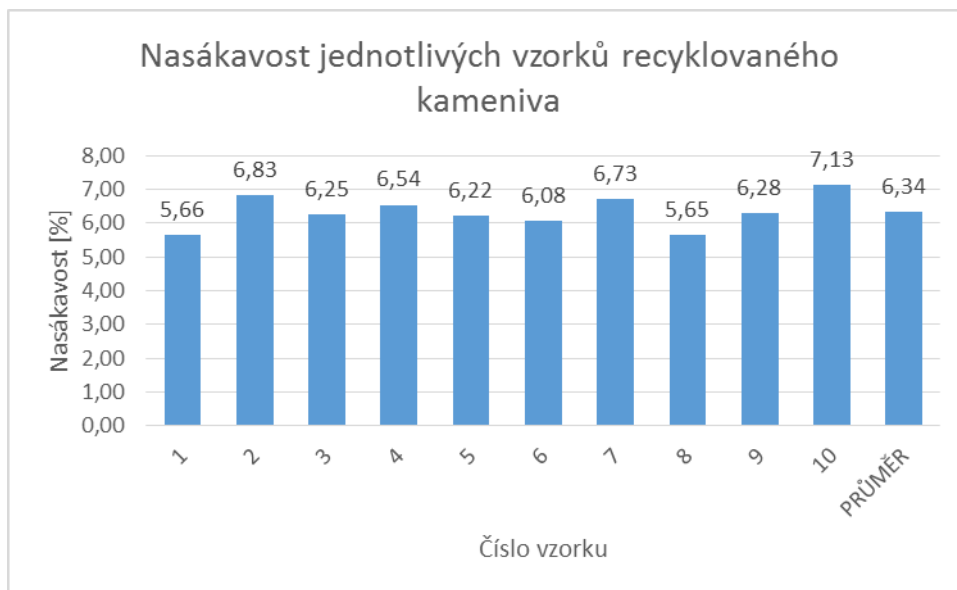
#### NASÁKAVOST

Tab. 9 – Nasákavost recyklovaného kameniva

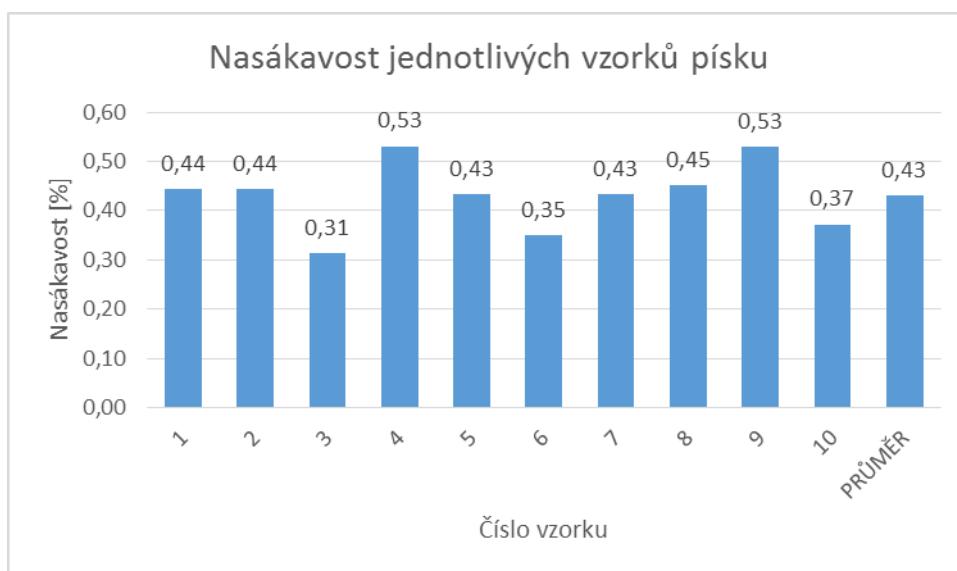
Vzorek	WA <sub>24</sub>
	[%]
1	5,66
2	6,83
3	6,25
4	6,54
5	6,22
6	6,08
7	6,73
8	5,65
9	6,28
10	7,13
<b>PRŮMĚR</b>	<b>6,34</b>

Tab. 10 – Nasákavost přírodního kameniva

Vzorek	WA <sub>24</sub>
	[%]
1	0,44
2	0,44
3	0,31
4	0,53
5	0,43
6	0,35
7	0,43
8	0,45
9	0,53
10	0,37
<b>PRŮMĚR</b>	<b>0,43</b>

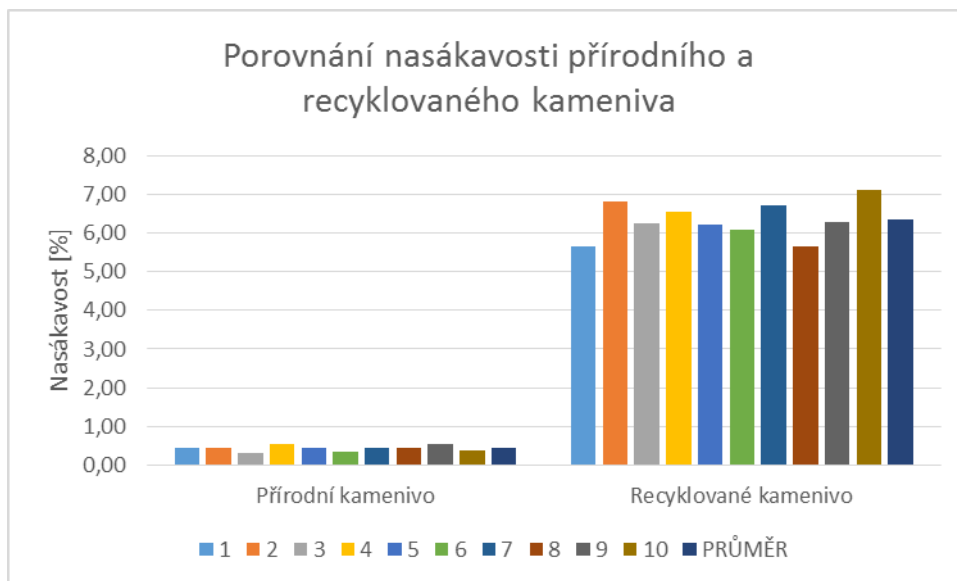


*Obr. 32 – Nasákavost jednotlivých vzorků recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm*



*Obr. 33 – Nasákavost jednotlivých vzorků přírodního písku*





Obr. 34 – Porovnání nasákavosti přírodního a recyklovaného kameniva

Na obrázcích 32 až 34 je zobrazena nasákavost použitého kameniva. Z grafů jasně vyplívá násobně vyšší nasákavost jemného recyklovaného kameniva oproti přírodnímu písku v průměru více než 14 krát. Tento fakt je důležité zahrnout do návrhu betonové směsi úpravou množství přidané vody. Pokud se navrhne vysoký poměr recyklované náhrady, vzroste tím nasákavost výsledného betonu.

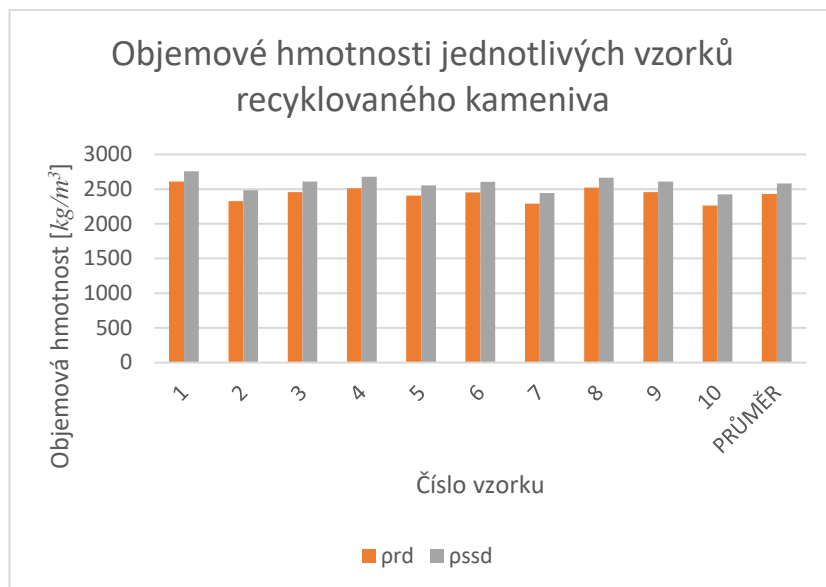
### OBJEMOVÁ HMOTNOST

Tab. 11 – Objemová hmotnost recyklovaného kameniva

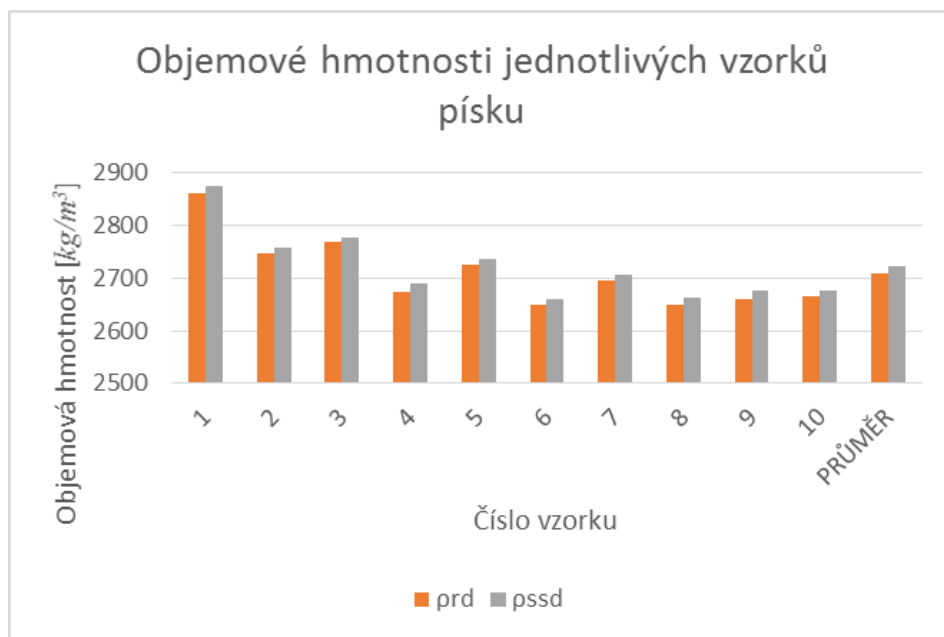
Tab. 12 – Objemová hmotnost přírodního kameniva

Vzorek	$\rho_{rd}$	$\rho_{ssd}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	2611	2759
2	2326	2485
3	2455	2608
4	2512	2677
5	2405	2555
6	2453	2602
7	2291	2445
8	2524	2666
9	2455	2610
10	2265	2427
PRŮMĚR	2430	2583

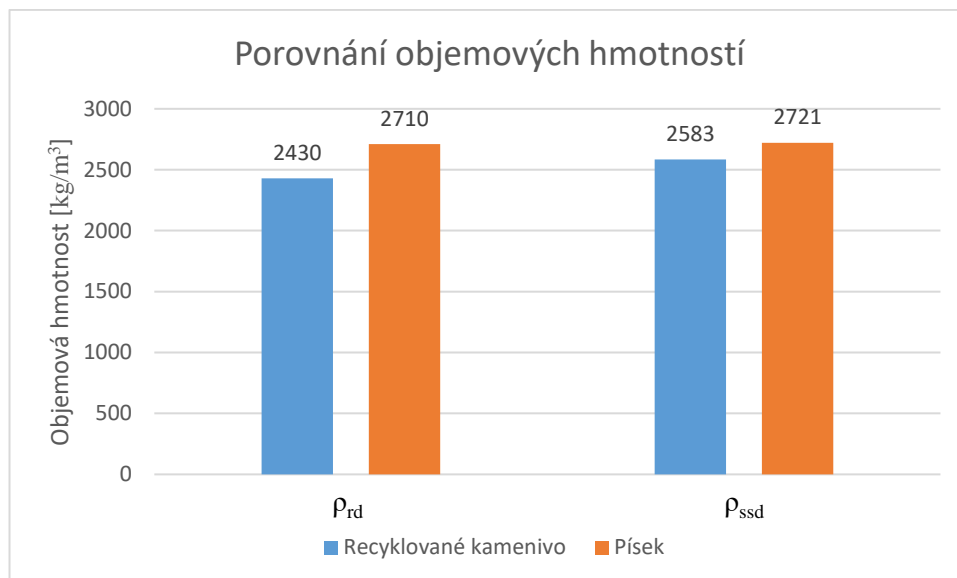
Vzorek	$\rho_{rd}$	$\rho_{ssd}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	2862	2874
2	2746	2758
3	2769	2778
4	2674	2689
5	2725	2737
6	2650	2659
7	2695	2707
8	2650	2662
9	2661	2675
10	2666	2675
PRŮMĚR	2710	2721



Obr. 35 – Objemová hmotnost jednotlivých vzorků recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm



Obr. 36 – Objemová hmotnost jednotlivých vzorků přírodního písku



Obr. 37 – Porovnání objemových hmotností

V tabulkách 11 až 12 a na obrázcích 35 až 37 jsou změřené hodnoty objemové hmotnosti jemného recyklovaného kameniva a přírodního písku kde  $\rho_{ssd}$  je objemová hmotnost kameniva v plně nasyceném stavu a  $\rho_{rd}$  je objemová hmotnost kameniva ve vysušeném stavu.

Z výsledku je patrné, že recyklované kamenivo má nižší objemovou hmotnost než přírodní kamenivo. V plně nasyceném stavu je objemová hmotnost recyklovaného kameniva o 5% nižší než objemová hmotnost přírodního písku. Ve vysušeném stavu se rozdíl objemových hmotností kameniva zvýšil na 10 %.

#### 3.1.4 ZÁVĚR

Zkoušením geometrických vlastností bylo vyzorováno, že se průběh křivky zrnitosti recyklovaného kameniva a písku liší. Písek obsahuje větší množství částic, které se zachytily na jemnějších sítích. Naopak recyklované kamenivo obsahuje větší množství částic zachycených na sítu s větším průměrem ok.

Této odlišnosti lze využít při návrhu betonové směsi. Vhodnou kombinací poměru recyklovaného kameniva a písku v betonu lze zlepšit mechanické vlastnosti betonu. Při jejich kombinaci se přibližuje ideální křivce zrnitosti kameniva do betonu. To lze aplikovat jen do určité míry, protože s tím také souvisí zhoršená zpracovatelnost a vyšší nasákavost.

Zkoušením fyzikálních vlastností recyklovaného kameniva a písku bylo změřeno, že recyklované kamenivo vykazuje více než 14 krát vyšší nasákavost a zároveň o 5 – 10% nižší objemovou hmotnost než má přírodní kamenivo.

## 3.2 ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÉHO BETONU

### 3.2.1 Návrh jemnozrnné betonové směsi

Složení jemnozrnné směsi bylo navrženo podle Baženy metody [32]. Návrh slouží pro výpočet vstupního materiálu do betonové směsi s obsahem kameniva do 4 mm. V této metodě jsou definovány poměry cement/písek a voda/cement. Poměr cement/písek byl uvažován od 1:1 do 1:3,5; přičemž vyšší poměr vykazuje nižší pevnost výsledného betonu. Poměr voda/cement je definována v EN 206 [20] pro danou třídu. Návrh směsi byl proveden za použití těchto vzorců:

Hmotnost cementu  $m_C$  (kg) je dáno následující rovnicí:

$$m_C = \frac{1 - \frac{V_Z}{100}}{\frac{1}{\rho_C} + \frac{w}{\rho_V} + \frac{n}{\rho_K}} \quad (11)$$

Hmotnost vody  $m_V$  (kg) je dána následující rovnicí:

$$m_V = m_C * w \quad (12)$$

Hmotnost písku  $m_K$  (kg) je dána následující rovnicí:

$$m_K = n * m_C \quad (13)$$

kde

$n$  - poměr hmotnosti písku  $m_K$  k jednotce hmotnosti cementu  $m_C$  (kg)

$V_Z$  - objem vzduchu v betonu, uvádí se 2 - 7 %

$\rho_C$  - objemová hmotnost cementu,  $\rho_V$  - objemová hmotnost vody,  $\rho_K$  = objemová hmotnost písku

Hodnoty použité pro výpočet betonové směsi byly:

$\rho_C = 3100 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_V = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_K = 2650 \text{ kg/m}^3$ , poměr voda/cement = 0,5 (bez přednasáknutí); předpokládaný objem vzduchu v betonu z intervalu 2 – 7 % - zvoleno 5%; poměr cement/písek = 1/3

### 3.2.2 Navržené betonové směsi

Zkouška vlastností recyklovaného betonu proběhla na sedmi betonových směsích. Jedna referenční směs byla s obsahem pouze přírodního kameniva (REF). Dalších šest betonových směsí obsahovalo částečnou náhradu buď portlandského cementu za recyklovaný cementový prach, nebo částečnou náhradu jemné frakce přírodního kameniva za jemné recyklované kamenivo.

Portlandský cement byl nahrazován v poměru 5 %, 10 % a 15 % recyklovaného cementového prachu a jemné přírodní kamenivo bylo nahrazeno v poměru 10 %, 20 % a 30 %. Směsi byly označovány pomocí čísla (procento náhrady) a písmena C nebo P (cement a písek).

### 3.2.3 Výroba betonové směsi

Použitý recyklovaný cementový prach pochází z odpadních betonových částí frakce 32/64 mm z recyklačního střediska. Betonové částice byly rozdrčeny na frakci 0/16 mm a prosety. Oddělená frakce 0/4 mm byla použita jako částečná náhrada přírodního písku (jemnozrnné recyklované kamenivo). Nejjemnější část (frakce 0/0,125 mm) byla použita jako náhrada portlandského cementu.

Tab. 13 – Hmotnostní složení betonových směsí na metr kubický

SMĚS	REF	5% CEM	10% CEM	15% CEM	10% PÍSEK	20% PÍSEK	30% PÍSEK
Přírodní kamenivo [kg]	1458	1458	1458	1458	1312	1166	1020
Recyklované kamenivo [kg]	0	0	0	0	146	292	438
Cement CEM I 42,5 [kg]	486	462	437	413	486	486	486
Recyklovaný cement [kg]	0	24	49	73	0	0	0
Voda [kg]	243	243	243	243	243	243	243
Poměr w / c	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

### 3.2.4 Zkoušení vlastností čerstvého betonu

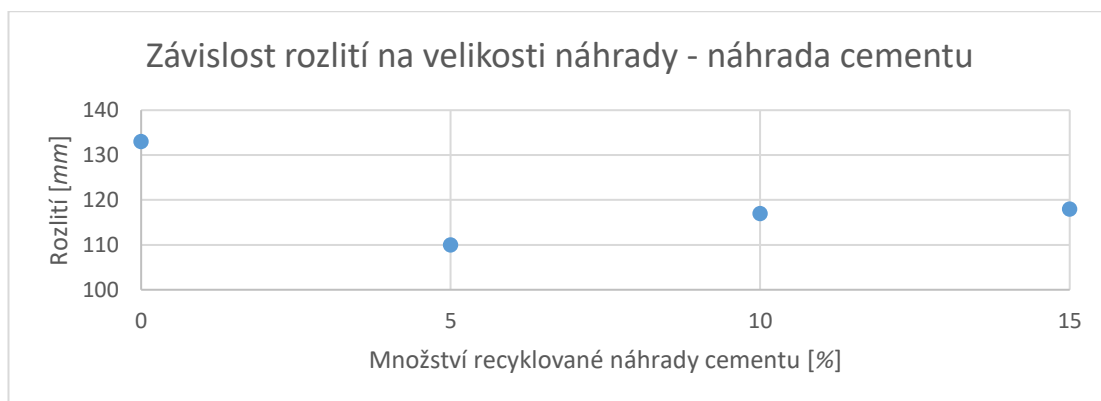
#### Zpracovatelnost

Zpracovatelnost čerstvé betonové směsi byla zkoušena dle ČSN EN 1015 – 3 [31]. Zkouška byla provedena pomocí střešovacího stolku, jelikož se jednalo o jemnozrnný beton, bylo měřeno rozlití betonové směsi. Průběh testování zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi ukazuje obrázek 38.

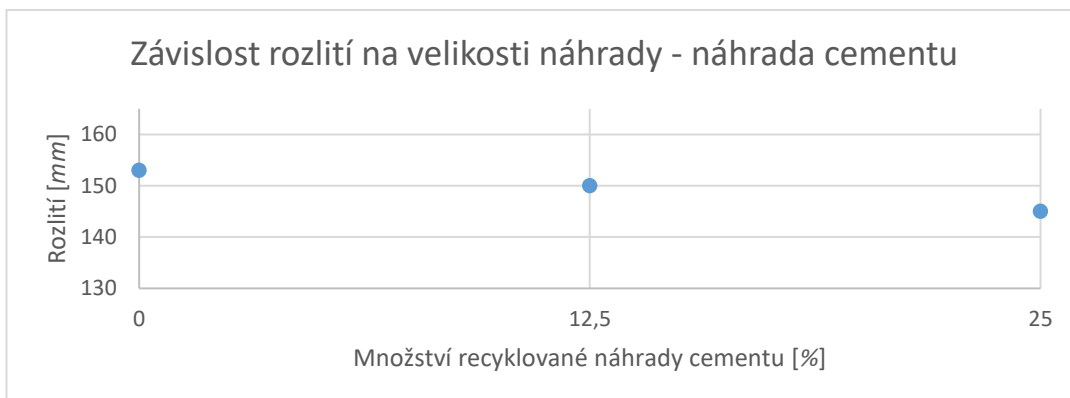


Obr. 38 – Zkouška zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi

Všechny betonové směsi vykazují dobrou zpracovatelnost i bez použití plastifikačních přísad. Zpracovatelnost referenční směsi byla 133 mm a u směsí s obsahem recyklovaného cementového prachu byla v rozpětí od 110 do 118 mm. Grafy na obrázcích 39 a 40 ukazuje vztah mezi množstvím recyklovaného cementového prachu v betonu a jeho zpracovatelností.

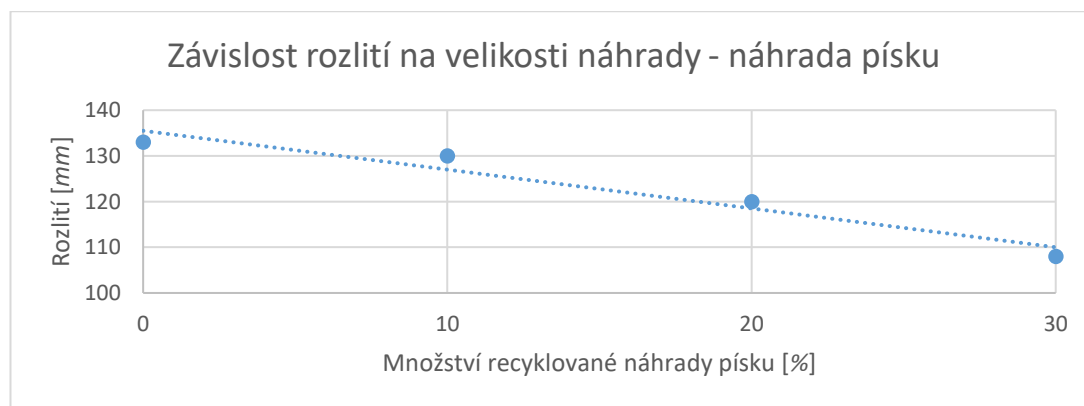


Obr. 39 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou portlandského cementu (vzorky použité k výrobě měřeného jemnozrnného betonu)

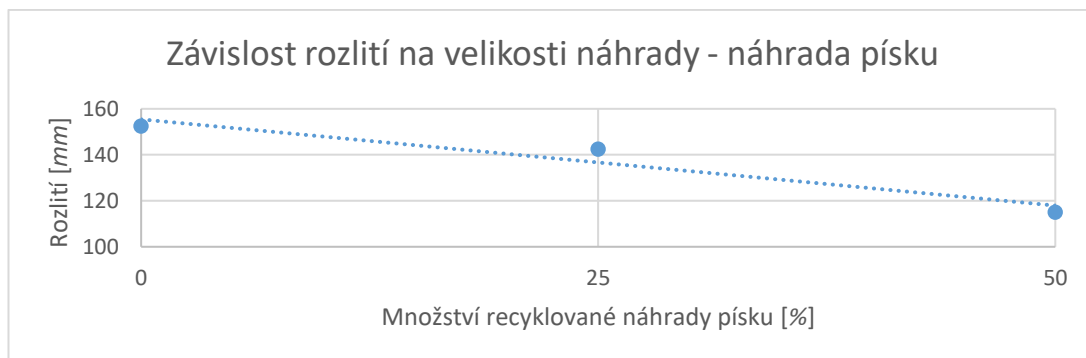


Obr. 40 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou portlandského cementu (upřesňující měření)

Graf na obrázku 41 a 42 ukazuje vztah mezi množstvím jemného recyklovaného kameniva v betonu a jeho zpracovatelností. Se zvyšujícím se množstvím recyklovaného kameniva se mírně zhoršuje zpracovatelnost betonu. Tento fakt je spojen s vyšší nasákavostí jemného recyklovaného kameniva, tím dojde absorpci určitého množství vody potřebné pro hydrataci cementu a tím k poklesu vodního součinitele.



Obr. 41 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou přírodního písku (písek použitý k výrobě měřeného jemnozrnného betonu)



Obr. 42 – Graf rozlité čerstvé betonové směsi s náhradou přírodního písku (upřesňující měření)

### 3.2.5 Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu

Pevnostní a deformační vlastnosti betonu byly zkoušeny na trémčích 160 x 40 x 40 mm. Zkoušení probíhalo po 7, 14, 28, 90 a 180 dnech. Nasákavost byla zkoušena na krychlích o rozměru 100 x 100 x 100 mm a kapilarita byla měřena na hranolech 160 x 40 x 40 mm.

Betonová směs byla uložena do vymazaných bednicích forem daných rozměrů. Poté došlo k zhutnění na vibrační plošině. K odbednění vzorků došlo vždy 24 hodin po betonáži.

Po odbednění byly jednotlivé vzorky popsány. Poté bylo nutné nechat vzorky tvrdnout 7, 14, 28, 90 a 180 dní, při kterých se prováděly zkoušky. Hranoly tvrdly při vzdušné vlhkosti a krychle byly naloženy do vodní lázně – příprava pro zkoušku nasákavosti.

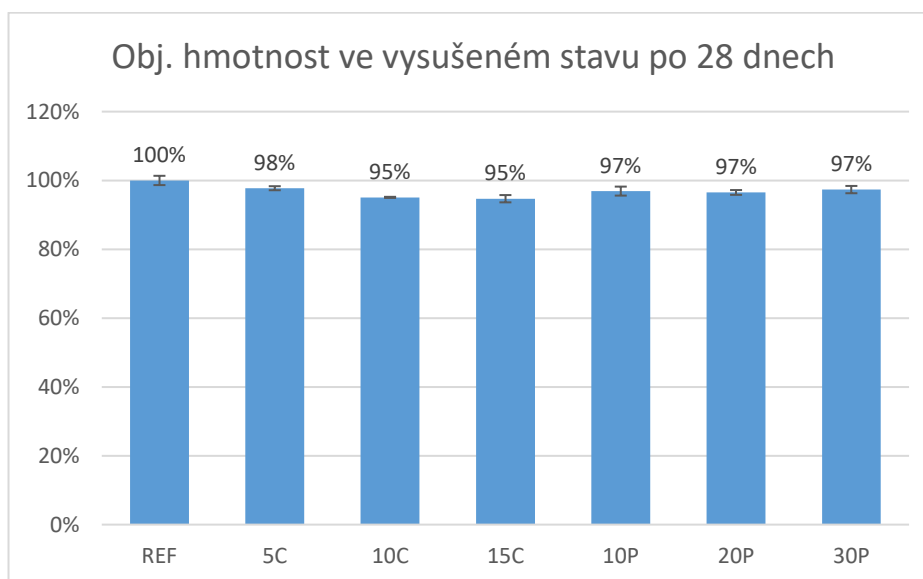
### Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Zkoušení proběhlo podle normy ČSN EN 12390 – 7 [27]. Vzorky byly pečlivě změřeny a zváženy. U krychlí byla stanovena objemová hmotnost ve vysušeném i v nasáklém stavu.

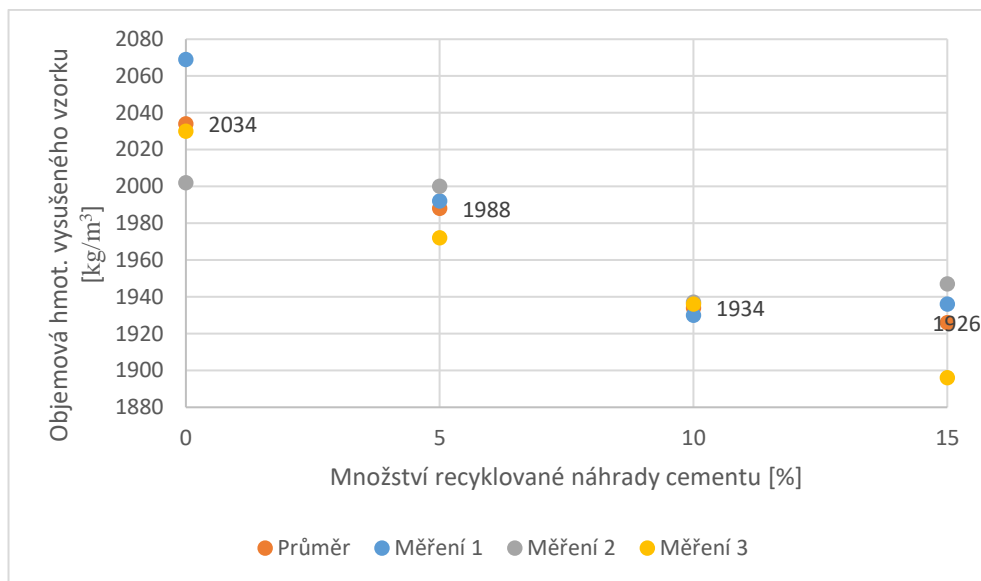


Tab. 14 – Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu v nasáklém a vysušeném stavu (průměrné hodnoty a směrodatné odchylky)

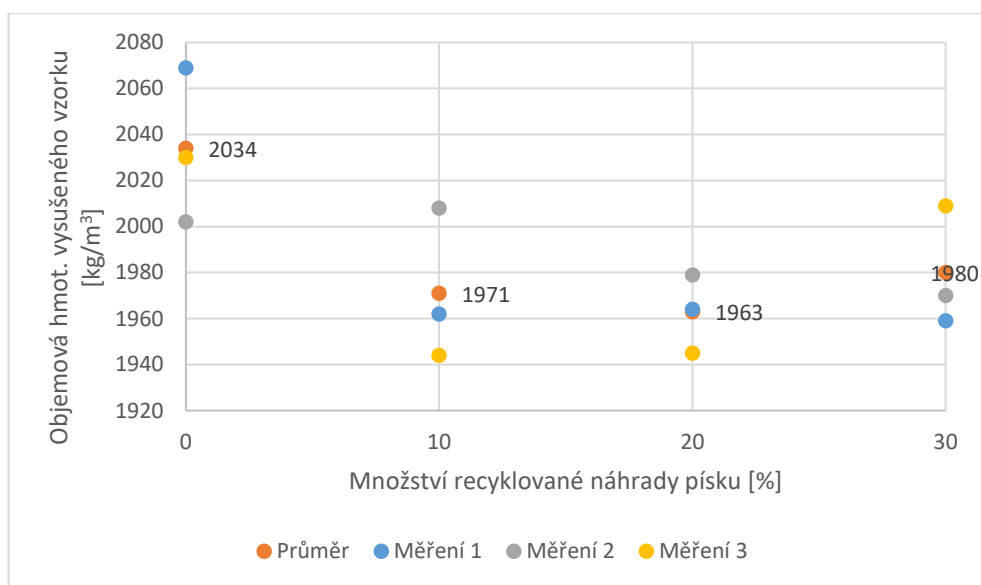
		Objemová hmotnost nasáklého vzorku	Objemová hmotnost vysušeného vzorku
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
REF	Průměr	2210	2034
	Odchylka	30,38	27,45
5C	Průměr	2167	1988
	Odchylka	12,49	11,91
10C	Průměr	2111	1934
	Odchylka	6,33	3,24
15C	Průměr	2106	1926
	Odchylka	22,13	21,52
10P	Průměr	2153	1971
	Odchylka	27,56	26,59
20P	Průměr	2148	1963
	Odchylka	13,48	14,20
30P	Průměr	2169	1980
	Odchylka	22,78	21,57



Obr. 43 – Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu vyjádřené v %



Obr. 44 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu na množství náhrady cementu



Obr. 45 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu na množství náhrady písku

Při zkoušení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu došlo k potvrzení předpokladu, že u betonu obsahujícího recyklované kamenivo dochází k poklesu objemové hmotnosti. Nižší objemová hmotnost recyklovaného betonu je zapříčiněna nižší objemovou hmotností recyklovaného kameniva, které je pórovitější než přírodní kamenivo.

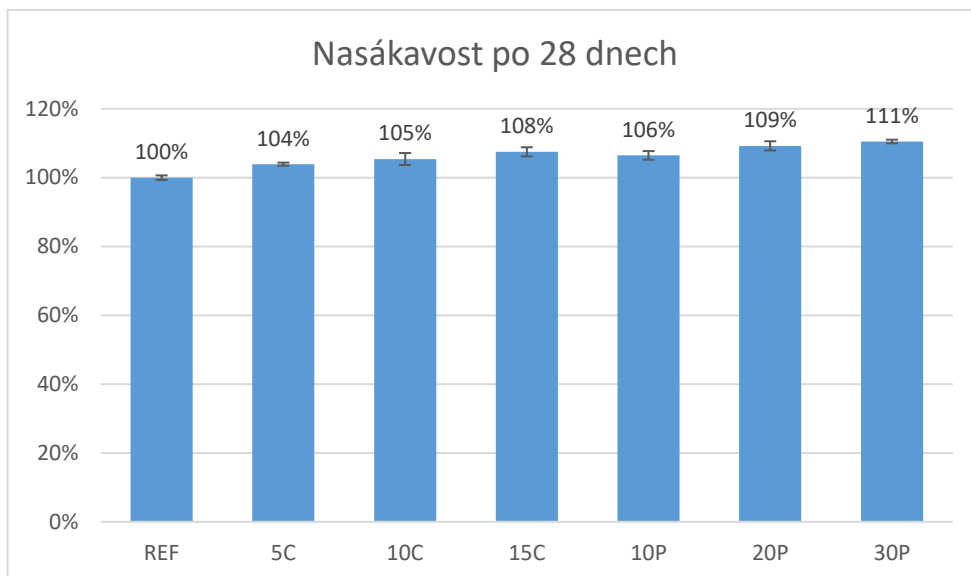
Z grafů na obrázcích 44 a 45 je jasně patrné, že objemové hmotnosti vzorku bez přidaného recyklované náhrady mají nejvyšší hodnoty. Při nahrazení přírodního písku jemnou frakcí recyklovaného kameniva je objemová hmotnost téměř konstantní. U náhrady portlandského cementu mírně klesá objemová hmotnost s vyšším množstvím recyklovaného cementového prachu.

### Nasákavost betonu

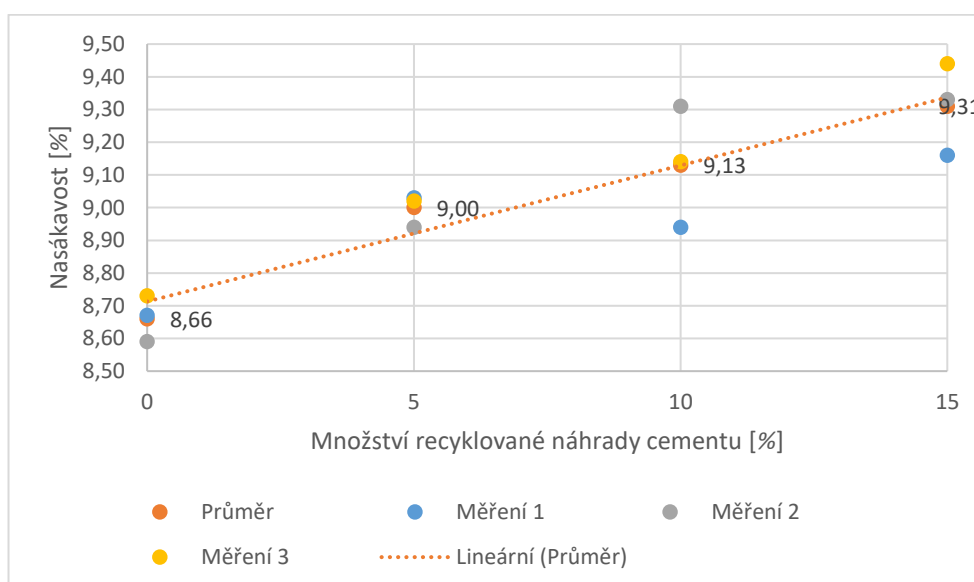
Zkouška probíhala podle normy ČSN EN 13369 [34]. Nasákavost byla zkoušena na krychlích 100 x 100 x 100 mm, které byly po odbednění uloženy do vodní lázně na dobu 28 dnů.

*Tab. 15 – Hodnoty nasákavostí ztvrdlého betonu (průměrné hodnoty a směrodatné odchylky)*

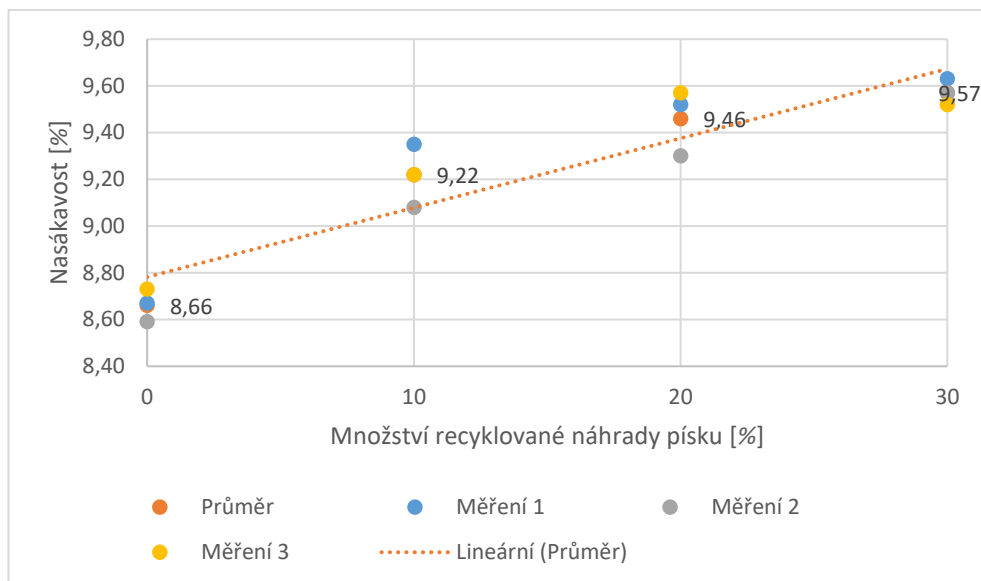
		Nasákavost
		[%]
<b>REF</b>	Průměr	8,66
	Odchylka	0,00057
<b>5C</b>	Průměr	9,00
	Odchylka	0,00039
<b>10C</b>	Průměr	9,13
	Odchylka	0,0015
<b>15C</b>	Průměr	9,31
	Odchylka	0,00115
<b>10P</b>	Průměr	9,22
	Odchylka	0,00109
<b>20P</b>	Průměr	9,46
	Odchylka	0,00116
<b>30P</b>	Průměr	9,57
	Odchylka	0,00046



Obr. 46 – Hodnoty nasákavosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu vyjádřené v %



Obr. 47 – Závislost nasákavostí ztvrdlého betonu na množství náhrady cementu



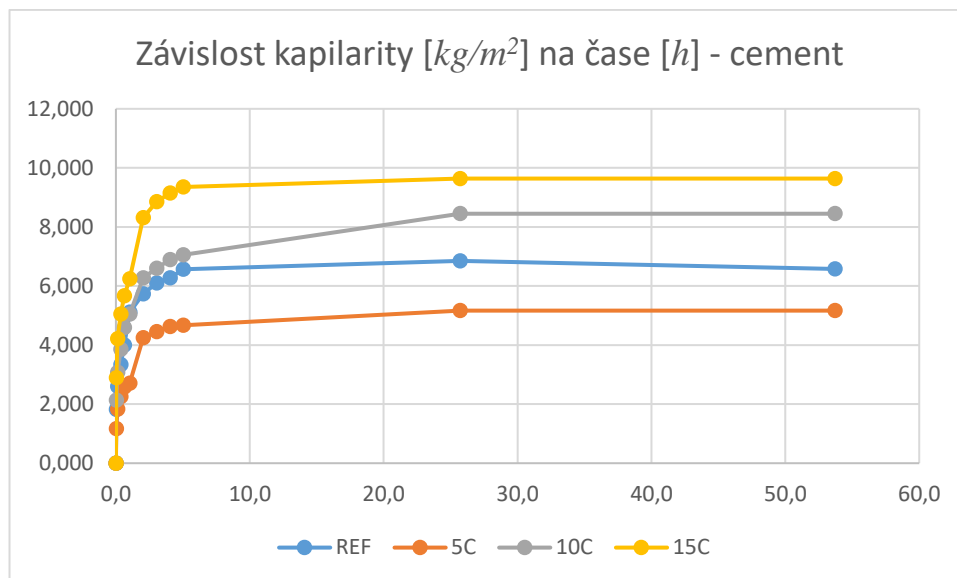
Obr. 48 – Závislost nasákavostí ztvrdlého betonu na množství náhrady písku

Z dostupných výsledků je patrné, že beton obsahující recyklované kamenivo má vyšší nasákavost než referenční beton z důvodu vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva. To potvrzuje i fakt, že s rostoucím objemem náhrady roste i nasákavost betonu. Vyšší nasákavost betonů s náhradou písku než s náhradou cementu je dána větším objemem recyklované náhrady.

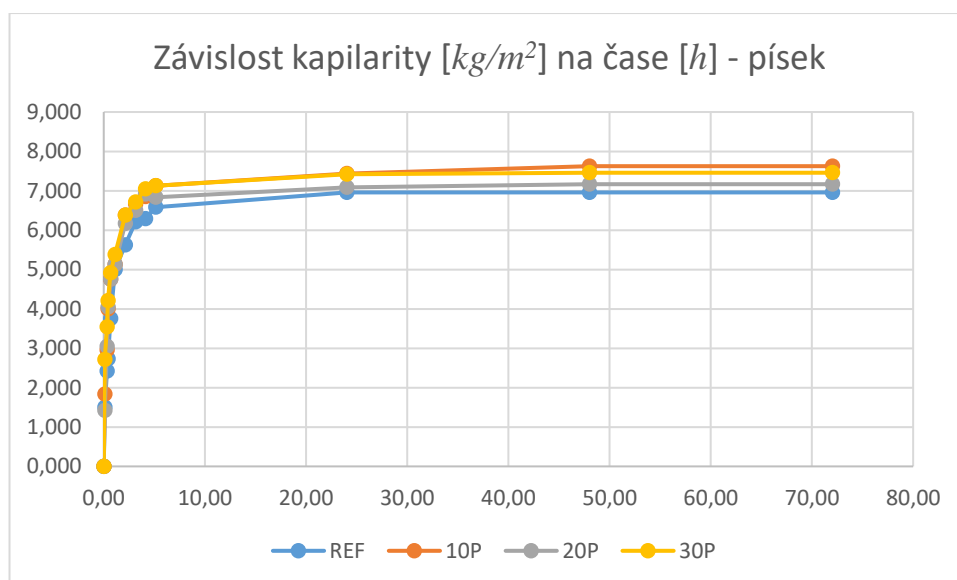
### Kapilární nasákavost betonu

Zkouška kapilární nasákavosti betonu byla prováděna na betonových hranolech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Zkušební tělesa vystavena vzdušné vlhkosti byla ponořena do nádoby s pitnou vodou o teplotě  $20 \pm 5$  °C, výška vodního sloupce v nádobě byla 5 mm. Tělesa byla pravidelně vážena po dobu 72 hodin.

V grafech na obrázcích 49 a 50 jsou zobrazeny průběhy kapilární nasákavosti betonu s náhradou portlandského cementu a s náhradou přírodního písku. Kromě směsi 5C přineslo přidání příměsi zvýšení kapilární nasákavosti. To je způsobeno jinou strukturou recyklovaného kameniva a cementového prachu a vyšší pórovitostí recyklovaného kameniva.



Obr. 49 – Graf průběhu průměrné kapilární nasákavosti betonu – náhrada cementu



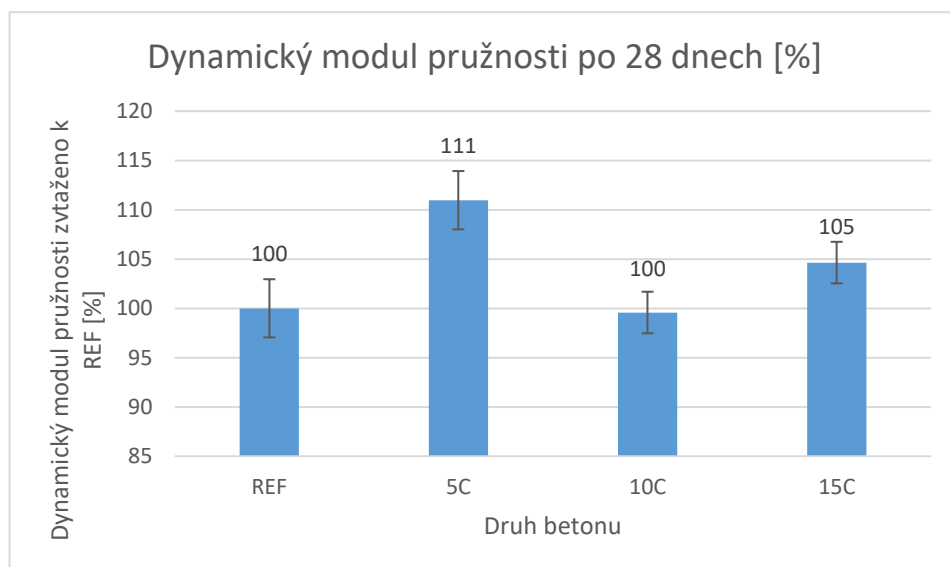
Obr. 50 – Graf průběhu průměrné kapilární nasákavosti betonu – náhrada jemné frakce recyklovaného kameniva

### Dynamický modul pružnosti

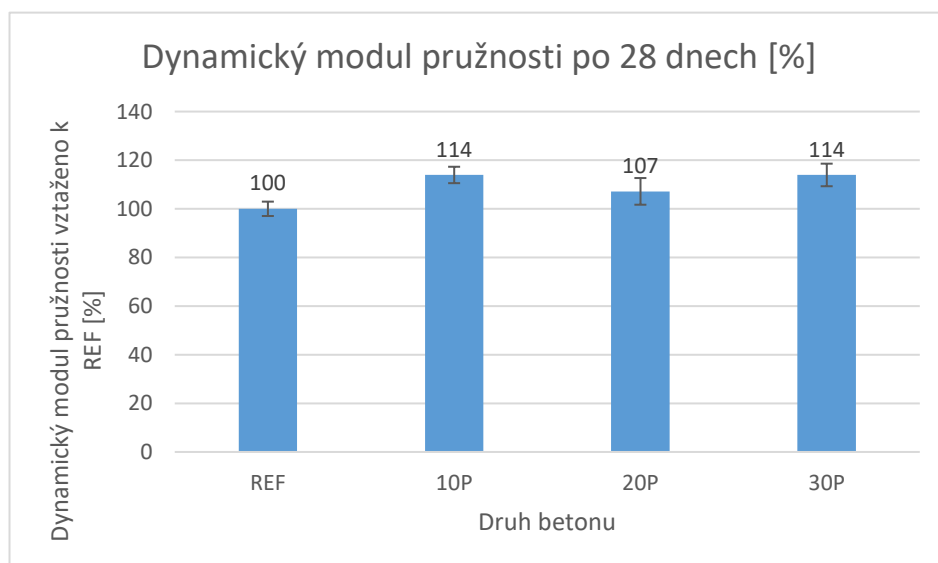
Dynamický modul pružnosti byl pro urychlení zkoušení testován ultrazvukovou metodou, která je popsána v normě ČSN 73 1371 [29]. Ultrazvuková metoda je založena na principu stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v betonu. Ze stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v betonu je možné dopočítat

fyzikálně mechanické vlastnosti betonu na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření ultrazvukového vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu.

V grafech na obrázcích 51 a 52 jsou naměřené hodnoty dynamického modulu pružnosti po 28 dnech. Z grafů lze vyčíst, že všechny měřené vzorky vykazují, buď stejné, nebo jemně vyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti jako referenční směs. Z tak malého počtu vzorků nelze toto s určitostí potvrdit a proto je nutné další ověření.



Obr. 51 – Hodnoty dynamického modulu pružnosti po 28 dnech – náhrada cementu



Obr. 52 – Hodnoty dynamického modulu pružnosti po 28 dnech – náhrada jemné frakce



*Obr. 53 – Zkoušení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou*

### **Pevnost betonu v tlaku**

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390 – 3 [31]. Pevnost betonu v tlaku byla zkoušena po 7, 14, 28, 90 a 180 dnech na zlomcích trámeků o rozměru 160 x 40 x 40 mm.

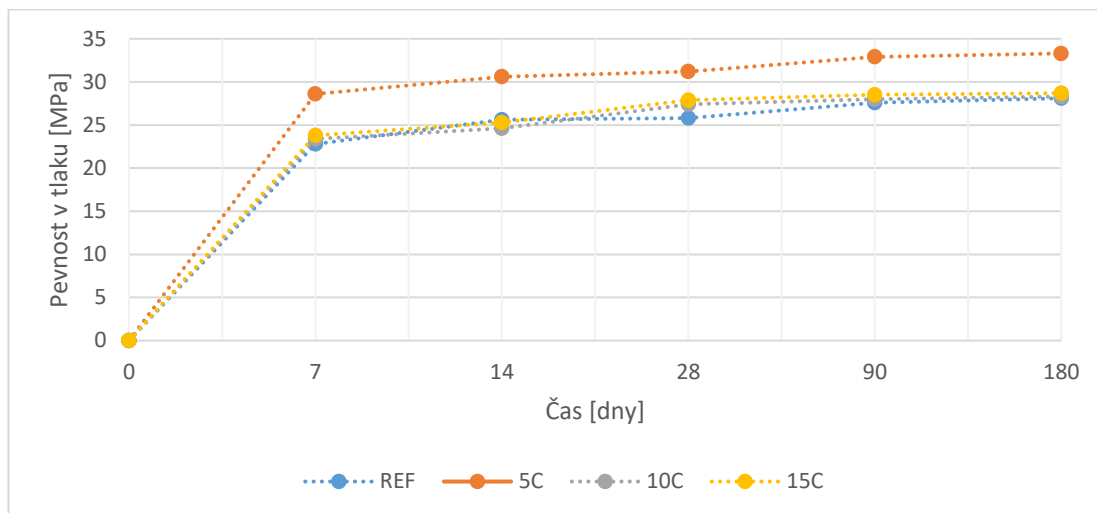


*Obr. 54 – Zkouška pevnosti v tlaku*

Z grafu na obrázku 55 lze odečíst postupný nárůst pevností při tuhnutí betonu. Vývoj pevností betonů s náhradou je velmi podobný vývoji pevnosti referenčního betonu. Důvodem pro mírně zvýšené hodnoty pevnosti v tlaku u směsí betonu s náhradou recyklovaného cementu za portlandský cement by mohl být vyšší měrný

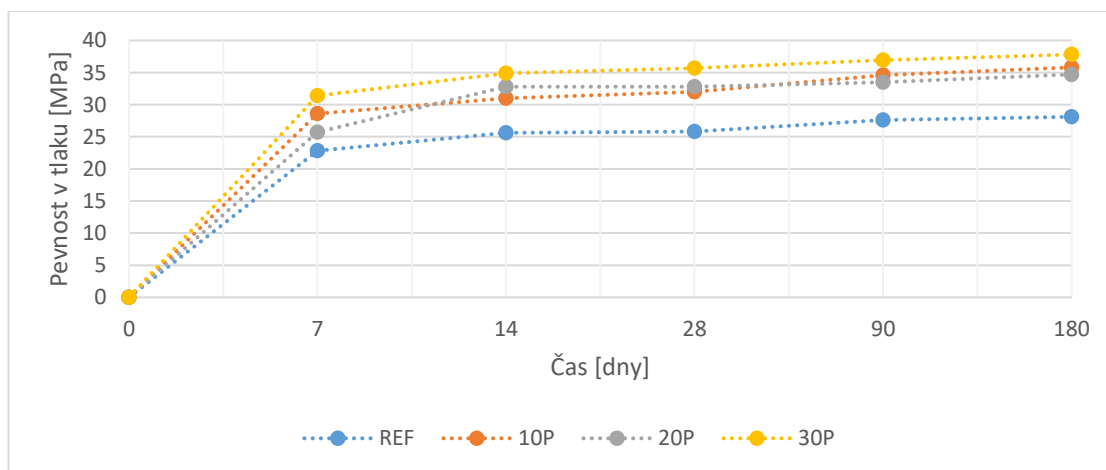


povrch zrn recyklovaného cementu. Pro potvrzení předpokladu je nutné další testování.



Obr. 55 – Graf nárůstu pevnosti betonu v tlaku – náhrada cementu

Graf nárůstu pevnosti v tlaku na obrázku 56 nám ukazuje, že při použití částečné náhrady jemné frakce v betonu se jeho pevnost zvýší. To vychází z předpokladu, že betonová směs, která obsahuje přírodní i recyklované jemné kamenivo se její křivka zrnitosti více přibližuje ideální křivce zrnitosti než při použití pouze přírodního kameniva.

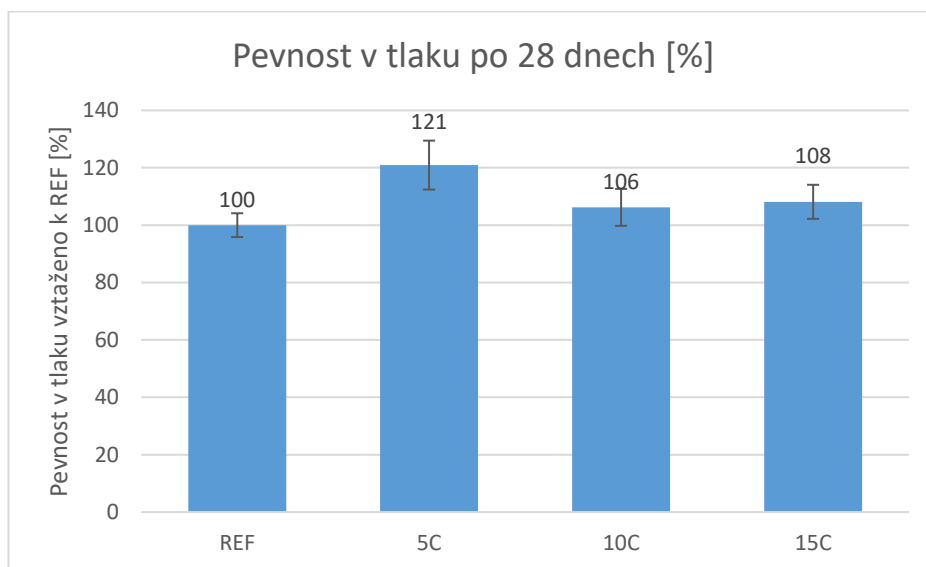


Obr. 56 – Graf nárůstu pevnosti betonu v tlaku – náhrada jemné frakce

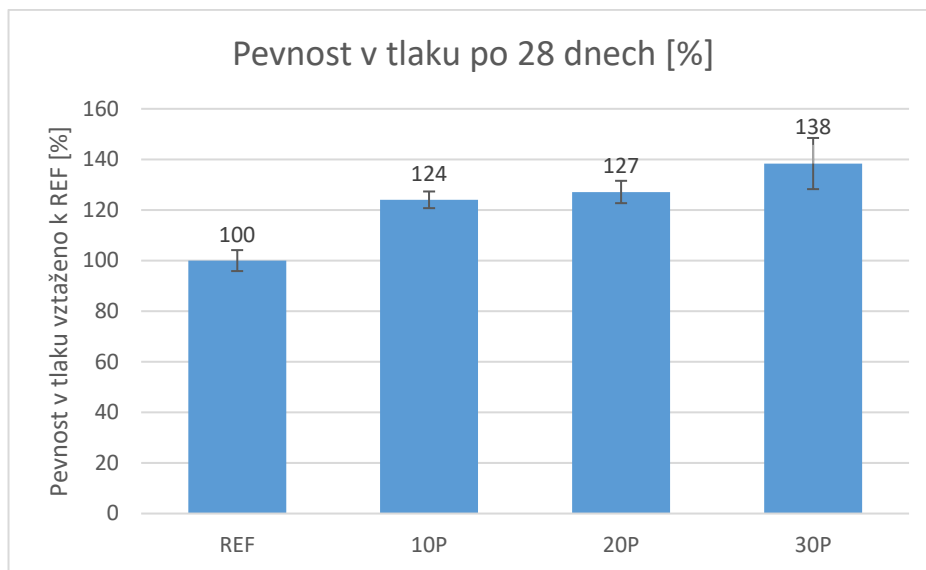
Tab. 16 – Pevnosti betonu v tlaku

	Čas [den]						
	0	7	14	28	90	180	
Pevnost v tlaku [Mpa]	REF	0	22,8	25,6	25,8	27,6	28,1
	5C	0	28,6	30,6	31,2	32,9	33,3
	10C	0	23,4	24,6	27,4	28,0	28,3
	15C	0	23,8	25,3	27,9	28,5	28,7
	REF	0	22,8	25,6	25,8	27,6	28,1
	10P	0	28,6	31	32,0	34,6	35,8
	20P	0	25,7	32,8	32,8	33,5	34,7
	30P	0	31,4	34,9	35,7	36,9	37,8

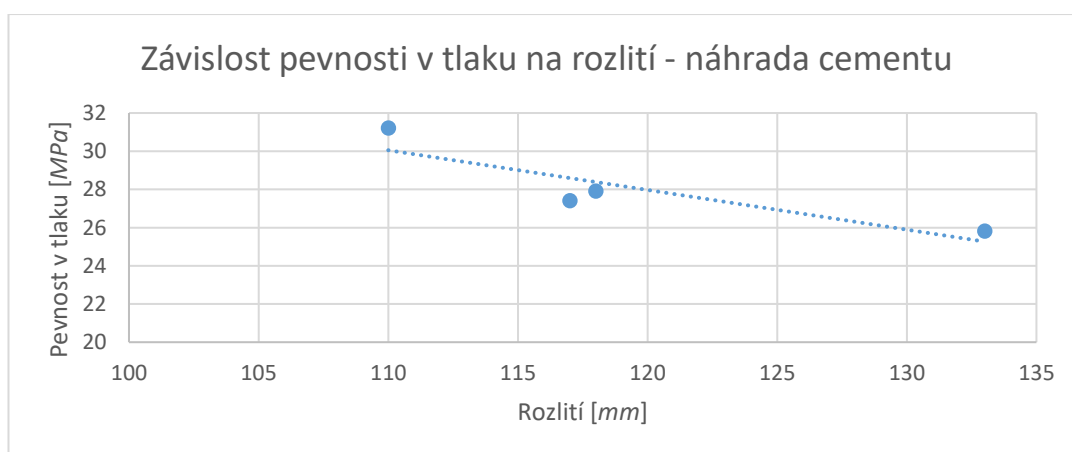
Na obrázcích 57 a 58 jsou zobrazeny pevnosti v tlaku betonu po 28 dnech vztažené k referenční směsi a její hodnotě 25,6 MPa.



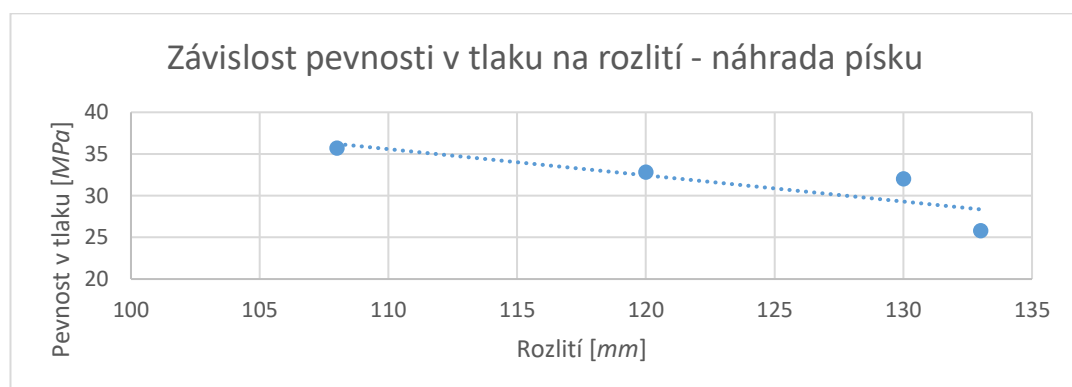
Obr. 57 – Pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech – náhrada cementu



Obr. 58 – Pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech – náhrada písku



Obr. 59 – Závislost pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech na rozlité – cementu



Obr. 60 – Závislost pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech na rozlité – náhrada písku

## Pevnost betonu v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390 – 3 [31]. Pevnost betonu v tahu za ohybu byla zkoušena po 7, 14, 28, 90 a 180 dnech na trámčích o rozměru 160 x 40 x 40 mm.

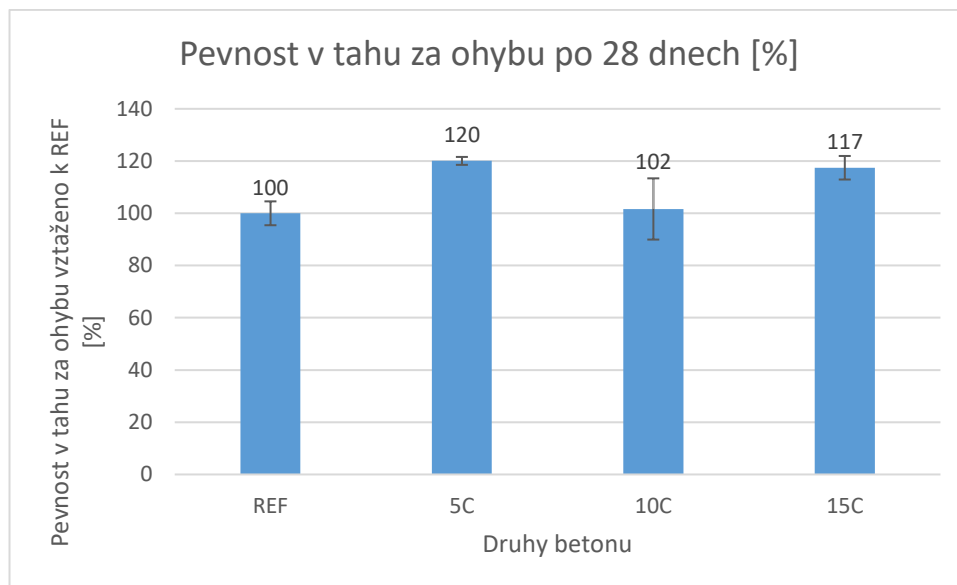


Obr. 61 – Hranol připravený na zkoušku pevnosti tahu za ohybu

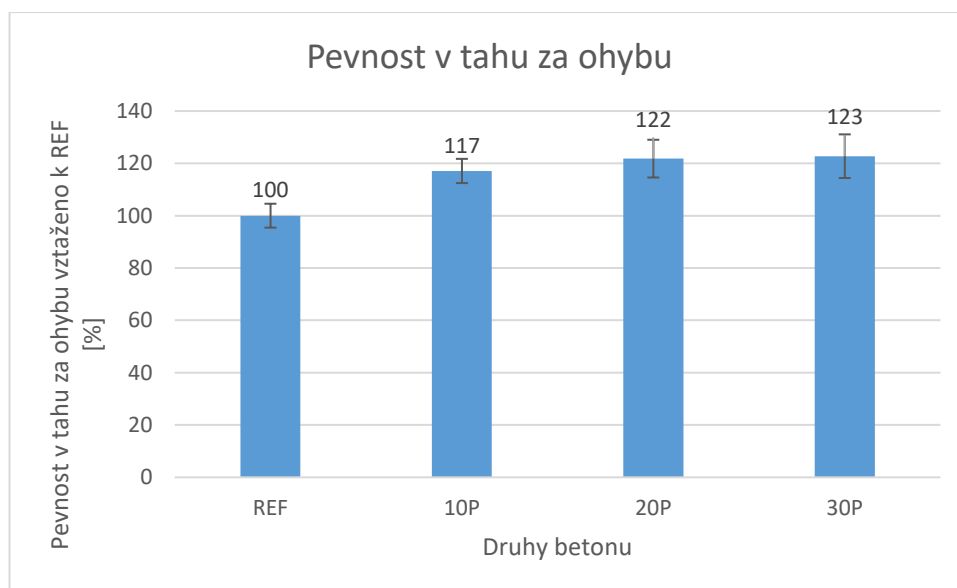
Tab. 17 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu [Mpa]	Čas [den]						
	0	7	14	28	90	180	
REF	0	4,9	5,3	4,9	5,5	5,6	
5C	0	5,5	6,2	5,9	6,4	7,2	
10C	0	4,9	6,0	5,0	5,6	6,5	
15C	0	4,3	5,2	5,7	4,7	6,1	
REF	0	4,9	5,3	4,9	5,5	5,6	
10P	0	5,4	6,1	5,7	6,2	7,5	
20P	0	5,3	6,2	5,9	6,7	7,2	
30P	0	5,4	6,5	6,0	6,2	7,3	

V grafech na obrázcích 62 a 63 můžeme odečíst pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech u jednotlivých směsí betonu. Z grafu je patrné, že pevnosti v tahu za ohybu ve všech navržených směsích jsou mírně vyšší, než tomu je u referenčního betonu.



*Obr. 62 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu po 28 dnech – náhrada cementu*



*Obr. 63 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu po 28 dnech – náhrada jemné frakce*

### 3.2.6 Závěr

Tab. 18 – Souhrnná tabulka výsledků

Souhrnné výsledky	REF	5C	10C	15C	10P	20P	30P
Rozliti [mm ]	133	110	117	118	130	120	108
Obj. hm. nasáklého vzorku [ $kg/m^3$ ]	2210	2167	2111	2106	2153	2148	2169
Obj. hm. vysušeného vzorku [ $kg/m^3$ ]	2034	1988	1934	1926	1971	1963	1980
Nasákavost [% ]	8,66	9,00	9,13	9,31	9,22	9,46	9,57
Dynamický modul pružnosti [GPa ]	23,7	26,3	23,6	24,8	27,0	25,4	27,0
Pevnost v tlaku [MPa ]	25,8	31,2	27,4	27,9	32,0	32,8	35,7
Pevnost v tahu za ohybu [MPa ]	4,9	5,9	5,0	5,7	5,7	5,9	6,0

Při porovnání všech výsledků v tabulce 18 vybočuje betonová směs 5C s náhradou 5 % portlandského cementu recyklovaným cementovým prachem. Směs 5C má menší zpracovatelnost než ostatní směsi s náhradou cementu. Objemová hmotnost jak v nasáklém, tak suchém stavu a nasákavost jsou dle původních předpokladů. Jako jediná směs s příměsí má nižší kapilární nasákavost než referenční směs. S přihlédnutím k výsledkům ostatních směsí s náhradou portlandského cementu má vysokou hodnotu dynamického modulu pružnosti, křivka nárůstu pevnosti v tlaku je výše než ostatní a pevnost v tahu za ohybu je po 28 dnech také nejvyšší. To by mohlo být způsobeno nepřesností měření nebo změnou vlastností některých příměsí (např. nově otevřený cement, písek s odlišnou vlhkostí).

Při zkoušení čerstvé betonové směsi bylo zaznamenáno mírné zhoršení zpracovatelnosti. To souvisí s vyšší nasákavostí recyklovaného kameniva a tím snížení vodního součinitele.

Z výsledků zkoušení vlastností ztvrdlého betonu vyplynulo, že u betonu obsahujícího recyklované kamenivo dochází k poklesu objemové hmotnosti. Nižší objemová hmotnost recyklovaného betonu je zapříčiněna nižší objemovou hmotností recyklovaného kameniva, které je pórovitější než přírodní kamenivo.

Provedené zkoušky ukazují, že beton obsahující recyklované kamenivo nebo recyklovaný cementový prach, má vyšší nasákavost než referenční beton - z důvodu vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva. To potvrzuje i fakt, že s rostoucím objemem náhrady roste i nasákavost betonu.

S vyšším objemem recyklované náhrady roste také kapilární nasákavost. Výjimku tvoří směs 5C, která má jako jediná směs s náhradou nižší kapilární nasákavost než referenční směs. Těsně vyšší hodnoty než referenční směsí mají směsi s náhradou jemné frakce kameniva a nejvyšší kapilární nasákavost mají směsi 10C a 15C.

Při náhradě portlandského cementu je výkyv hodnoty u směsi 5C. Směsi 10C a 15C mají podobnou velikost jako referenční směs. Betonové směsi, u kterých byl nahrazen přírodní písek, vykazují mírně vyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti oproti referenci.

Nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku má již zmiňovaná směs 5C. Vývoj pevnosti 15C je velmi podobný s referenční křivkou. Důvodem je vyšší měrný povrch recyklovaného cementu. Dalším důvodem je předpoklad, že křivka betonové směsi, která obsahuje přírodní i recyklované jemné kamenivo se více přibližuje ideální křivce zrnitosti než při použití pouze přírodního kameniva. Dalším důvodem je vyšší nasákavost recyklovaného cementu, který absorbuje část vody potřebnou pro hydrataci.

Pevnost v tahu za ohybu je ve všech navržených směsích mírně vyšší, než tomu je u referenčního betonu.

Celý experiment byl proveden pouze s omezeným množstvím zkušebních vzorků. Pro přesnější závěry a důkladné zhodnocení řešené problematiky by bylo nutné provést další měření na dalších zkušebních vzorcích.

## 4 ZÁVĚR

Využití recyklovaného kameniva ze stavebního a demoličního odpadu šetří zdroje přírodního kameniva a snižuje objem skládkovaného materiálu. To jsou jasné výhody recyklace a opětovného použití tohoto odpadu. V mnoha experimentech a publikacích bylo ověřeno, že je možné dosáhnout vysoké kvality recyklovaného betonu nahrazením části přírodního kameniva v betonové směsi. V současné době však, podle českých norem, není možné použít beton z recyklovaného kameniva ve všech typech konstrukcí, vzhledem k nízké kvalitě recyklovaného kameniva v českých recyklačních střediscích. I když není používání recyklovaného kameniva v betonu rozšířené, dá se těžit zejména z nízkého dopadu na životní prostředí. V budoucnu bude však využití recyklovaného betonu stále růst současně s ubývajícemi zásobami přírodních zdrojů kameniva.

S touto motivací byl uskutečněn experimentální program rozdělený na dvě části. V první části byly testovány vlastnosti recyklovaného jemnozrnného kameniva a následného porovnání s přírodním pískem. Druhá část byla věnována návrhu samotné betonové směsi s použitím recyklovaného kameniva. Vlastnosti čerstvého a ztvrdlého recyklovaného betonu byly porovnány s vlastnostmi běžného betonu.

Pro experiment byly navrženy betonové směsi s 5, 10 a 15% příměsí recyklovaného cementového prachu a 10, 20 a 30% jemného recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm. Pro porovnání byla vytvořena jedna tzv. referenční směs, ve které bylo použito pouze přírodní kamenivo a portlandský cement. Jednalo se o směs bez recyklované složky.

Výsledky provedených zkoušek ukázaly, že recyklované kamenivo frakce 0/4 mm má více než 14 krát vyšší nasákavost a o 5 – 10% nižší objemovou hmotnost než přírodní kamenivo stejné frakce. Recyklované kamenivo také obsahuje více částic zachycených na sítích s oky velikosti 1 – 2 mm, zatímco zrna přírodního písku se za nejvíce zachytávala na sítích s oky velikosti 0,25 – 0,5 mm.



Zkoušení ukázalo, že s přidáním recyklované příměsi do betonu se mírně zhorší jeho zpracovatelnost v čerstvém stavu, což je způsobeno vyšší nasákavostí recyklovaného kameniva a tím spojené absorbování části vody potřebné k hydrataci.

Z výsledků zkoušení vlastností ztvrdlého betonu vyplynulo, že u betonu obsahujícího recyklované kamenivo dochází mírnému k poklesu objemové hmotnosti. Nižší objemová hmotnost recyklovaného betonu je zapříčiněna nižší objemovou hmotností recyklovaného kameniva, které je pórovitější než přírodní kamenivo. Dále je z výsledků patrné, že beton obsahující recyklované kamenivo nebo recyklovaný cementový prach, má vyšší nasákavost než referenční beton - z důvodu vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva. To potvrzuje i fakt, že s rostoucím objemem náhrady roste i nasákavost betonu. S vyšším objemem recyklované náhrady roste také kapilární nasákavost. Hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou stejné nebo mírně vyšší než u referenční směsi.

Pevnost v tlaku u betonů s náhradou portlandského cementu mají podobný nárůst pevnosti jako referenční směs. Z toho vybočuje směs 5C, která má nejvyšší pevnost. U betonu s náhradou přírodního písku je nárůst pevnosti v tlaku, na rozdíl od referenční křivky, znatelnější. Pevnost v tahu za ohybu je ve všech navržených směsích mírně vyšší, než tomu je u referenčního betonu. Důvodem je vyšší nasákavost recyklovaného cementu, který absorbuje část vody potřebné pro hydrataci. Dalším důvodem je odlišná křivka zrnitosti kameniva, jejíž tvar se více přibližuje optimální křivce zrnitosti.

Celý experiment byl proveden pouze s omezeným množstvím zkušebních vzorků. Pro přesnější závěry a důkladné zhodnocení řešené problematiky by bylo nutné provést další měření na dalších zkušebních vzorcích. Provedené experimenty ukazují, že nahrazení jemné frakce přírodního kameniva nemá významné negativní dopady na vlastnosti betonové směsi.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Produkce odpadů v roce 2013 a nakládání s nimi. *České ekologické manažerské centrum*. [online]. 06.01.2015 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/produkce-odpadu-v-roce-2013-a-nakladani-s-nimi/>
- [2] Jsou lepší skládky nebo spalovny komunálního odpadu?. *IS CUNI – prezentace*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/studium/predmety/index.php?do=download&did=34519&kod=MO550P101>
- [3] Stavební odpad. *Exkurze KA*. [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://ekojes.blog.cz/galerie/exkurze-ka/obrazek/70867487>
- [4] Spalovna. *FLER*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.fler.cz/files/u/3/5/u3567/spalovna.jpg>
- [5] Recyklace. *Wikipedia*. [online]. 9. 10. 2015 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Recyklace>
- [6] Recyklace. *AZ Dřevo Kov*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.azdrevokov.cz/img/recyklace.jpg>
- [7] Plán odpadového hospodářství ČR. Ministerstvo životního prostředí. [online]. 22. 12. 2014 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/plan\\_odpadoveho\\_hospodarstvi\\_cr](http://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr)
- [8] Udržitelný rozvoj. *CENIA, česká informační agentura životního prostředí*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://www.ekoznacka.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/MZPMSFHV0HSB](http://www.ekoznacka.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/MZPMSFHV0HSB)
- [9] Trvale udržitelný rozvoj. *CENIA, česká informační agentura životního prostředí*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=trvale\\_udrzitelny\\_rozvoj&site=spotreba](http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=trvale_udrzitelny_rozvoj&site=spotreba)
- [10] Udržitelná výstavba budov a její uplatňování ve střední Evropě. *Časopis stavebnictví*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/udrzitelna-vystavba-budov-a-jeji-uplatnovani-ve-stredni-evrope\\_N465](http://www.casopisstavebnictvi.cz/udrzitelna-vystavba-budov-a-jeji-uplatnovani-ve-stredni-evrope_N465)

- [11] Recyklace stavebních a demoličních odpadů. *ECOServis*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.ecoservis.eu/nakladani-se-stavebnimi-a-demolicnimi-odpady>
- [12] Demolice staveb a budov. Markus Moravia Demolice likvidace [online]. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.demolice-likvidace.cz/demolice-staveb.html>
- [13] Podstata recyklace. *ARSM*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.arasm.cz/podstata.php>
- [14] EVANGELISTA, L., GUEDES, M., BRITO, J. de, FERRO, A. C., PEREIRA, M. F. *Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste*. Construction and Building Materials. 2015, str. 178 – 188.
- [15] EVANGELISTA, L., BRITO, J. de. *Durability performace of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and concrete Composites. 2010, str. 9 – 14.
- [16] EVANGELISTA, L. a J. DE BRITO. *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and concrete Composites. 2007, str. 397 – 401.
- [17] KHATIB, J.M. *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and Concrete Research. 2005, str. 763 - 769.
- [18] ČSN EN 12620 + A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [19] PAVLŮ, T., Kočí, V., Šefflová, M., Environmentální vyhodnocení recyklovaného kameniva. 21. Betonářské dny, 2014.
- [20] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastností, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [21] ČSN EN 933 – 1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva. Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [22] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [23] ČSN EN 1097 – 6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

- [24] HomeN. *idoc*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~sta366/Betonove%20konstrukce/Podklady%20PBK/Stupen%20prorostredi%20v%20OB.jpg>
- [25] Stupeň vlivu prostředí. *ABS Bilina*. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: [http://www.absbilina.cz/upload/248-1293024853\\_1850j92p4T.upl-vliv\\_prostredi.jpg](http://www.absbilina.cz/upload/248-1293024853_1850j92p4T.upl-vliv_prostredi.jpg)
- [26] ČSN EN 1015 – 3. *Zkušební metody malt pro zdivo. Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [27] ČSN EN 12390 – 7. *Zkoušení ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu. Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [29] ČSN EN 12504 – 4. *Zkoušení betonu. Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [30] ČSN EN 12390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu. Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [31] ČSN EN 13369. *Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

## SEZNAM TABULEK

*Tab. 1 – Složení směsí betonu – převzato a přeloženo z [15]*

*Tab. 2 – Absorpce vody ponořením – převzato a přeloženo z [15]*

*Tab. 3 – Korelační data pro Hallův kapilární model – převzato a přeloženo z [15]*

*Tab. 4 – Složení směsí betonu – převzato a přeloženo z [16]*

*Tab. 5 – Výsledky pevností v tlaku – převzato a přeloženo z [16]*

*Tab. 6 – Výsledky pevností v tahu za ohybu – převzato a přeloženo z [16]*

*Tab. 7 – Výsledky modulu pružnosti – převzato a přeloženo z [16]*

*Tab. 8 – Maximální procento nahrazení kameniva (% hmotnosti) [20]*

*Tab. 9 – Nasákavost recyklovaného kameniva*

*Tab. 10 – Nasákavost přírodního kameniva*

*Tab. 11 – Objemová hmotnost recyklovaného kameniva*

*Tab. 12 – Objemová hmotnost přírodního kameniva*

*Tab. 13 – Hmotnostní složení betonových směsí na metr kubický*

*Tab. 14 – Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu v nasáklém a vysušeném stavu (průměrné hodnoty a směrodatné odchylky)*

*Tab. 15 – Hodnoty nasákavostí ztvrdlého betonu (průměrné hodnoty a směrodatné odchylky)*

*Tab. 16 – Pevnosti betonu v tlaku*

*Tab. 17 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu*

*Tab. 18 – Souhrnná tabulka výsledků*

## SEZNAM OBRÁZKŮ

*Obr. 1 – Ukládání odpadu na skládce [3]*

*Obr. 2 – Spalovna [4]*

*Obr. 3 – Logo recyklace [6]*

*Obr. 4 – Trvale udržitelný rozvoj [9]*

*Obr. 5 – Neroztříděný stavební odpad [12]*

*Obr. 6 – Stavební odpad před drcením*

*Obr. 7 – Recyklované kamenivo po nadrcení (hrubá frakce)*

*Obr. 8 – Schéma doporučeného průběhu recyklace [19]*

*Obr. 9 – Vibrační plošina*

*Obr. 10 – Elektro-magnetická prosévačka kameniva*

- Obr. 11 – Recyklované kamenivo na sítu*
- Obr. 12 – Příklad křivky zrnitosti*
- Obr. 13 – Oblast ideální křivky zrnitosti [22]*
- Obr. 14 – Povrchově osušené jemné kamenivo [23]*
- Obr. 15 – Pyknometr*
- Obr. 16 – Popis pyknometru [23]*
- Obr. 17 – Třídy vlivu prostředí – konstrukce [24]*
- Obr. 18 – Třídy vlivu prostředí – vlastnosti betonu [25]*
- Obr. 19 – Vyhovující způsoby porušení krychlí [30]*
- Obr. 20 – Vyhovující způsoby porušení válců [30]*
- Obr. 21 – Zkouška pevnosti v tlaku*
- Obr. 22 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [30]*
- Obr. 23 – Zkouška pevnosti v tahu za ohybu*
- Obr. 24 – Použitý písek*
- Obr. 25 – Použité recyklované kamenivo*
- Obr. 26 – Recyklované kamenivo zachycené na sítu o velikosti otvorů 0,5 mm*
- Obr. 27 – Graf křivek zrnitosti recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm*
- Obr. 28 – Graf křivek zrnitosti písku frakce 0/4 mm*
- Obr. 29 – Graf porovnání křivek zrnitosti písku a recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm*
- Obr. 30 – Oblast ideální křivky zrnitosti a porovnání s navrženým kamenivem*
- Obr. 31 – Pyknometrická zkouška jemného recyklovaného kameniva*
- Obr. 32 – Nasákavost jednotlivých vzorků recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm*
- Obr. 33 – Nasákavost jednotlivých vzorků přírodního písku*
- Obr. 34 – Porovnání nasákavosti přírodního a recyklovaného kameniva*

*Obr. 35 – Objemová hmotnost jednotlivých vzorků recyklovaného kameniva frakce 0/4 mm*

*Obr. 36 – Objemová hmotnost jednotlivých vzorků přírodního písku*

*Obr. 37 – Porovnání objemových hmotností*

*Obr. 38 – Zkouška zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi*

*Obr. 39 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou portlandského cementu (vzorky použité k výrobě měřeného jemnozrnného betonu)*

*Obr. 40 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou portlandského cementu (upřesňující měření)*

*Obr. 41 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou přírodního písku (písek použitý k výrobě měřeného jemnozrnného betonu)*

*Obr. 42 – Graf rozlití čerstvé betonové směsi s náhradou přírodního písku (upřesňující měření)*

*Obr. 43 – Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu vyjádřené v %*

*Obr. 44 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu na množství náhrady cementu*

*Obr. 45 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu na množství náhrady písku*

*Obr. 46 – Hodnoty nasákavosti ztvrdlého betonu ve vysušeném stavu vyjádřené v %*

*Obr. 47 – Závislost nasákavostí ztvrdlého betonu na množství náhrady cementu*

*Obr. 48 – Závislost nasákavostí ztvrdlého betonu na množství náhrady písku*

*Obr. 49 – Graf průběhu průměrné kapilární nasákavosti betonu – náhrada cementu*

*Obr. 50 – Graf průběhu průměrné kapilární nasákavosti betonu – náhrada jemné frakce recyklovaného kameniva*

*Obr. 51 – Hodnoty dynamického modulu pružnosti po 28 dnech – náhrada cementu*

*Obr. 52 – Hodnoty dynamického modulu pružnosti po 28 dnech – náhrada jemné frakce*

*Obr. 53 – Zkoušení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou*

*Obr. 54 – Zkouška pevnosti v tlaku*

*Obr. 55 – Graf nárůstu pevnosti betonu v tlaku – náhrada cementu*

*Obr. 56 – Graf nárůstu pevnosti betonu v tlaku – náhrada jemné frakce*

*Obr. 57 – Pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech – náhrada cementu*

*Obr. 58 – Pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech – náhrada písku*

*Obr. 59 – Závislost pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech na rozlití – cementu*

*Obr. 60 – Závislost pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech na rozlití – náhrada písku*

*Obr. 61 – Hranol připravený na zkoušku pevnosti tahu za ohybu*

*Obr. 62 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu po 28 dnech – náhrada cementu*

*Obr. 63 – Pevnosti betonu v tahu za ohybu po 28 dnech – náhrada jemné frakce*