

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti využití recyklovaného kameniva jako náhrady  
drobného kameniva v betonech**

**Possibilities of using recycled aggregates as a substitute for  
fine aggregates in concrete**

**Leoš Joura**

**Praha 2022**

**Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.**


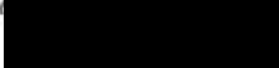


## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

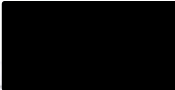
### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Joura	Jméno: Leoš	Osobní číslo: 477071
Zadávající katedra: K133		
Studijní program: Stavitelství		
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Možnosti využití recyklovaného kameniva jako náhrady drobného kameniva v betonech	
Název bakalářské práce anglicky: Possibilities of using recycled aggregates as a substitute for fine aggregates in concrete	
Pokyny pro vypracování: Teoretická část: Zpracování rešerše na téma recyklace stavebně demoličního odpadu a možnosti využití recyklátu jako náhrady za kamenivo v betonu. Experimentální část: Návrh směsí s třemi různými druhy recyklátu a výroba zkušebních těles betonu s různým poměrem recyklovaného drobného kameniva. Experimentální ověření základních materiálových vlastností recyklátů a z nich vyrobených vzorků betonu. Porovnání vlivu recyklátu na základní materiálové vlastnosti výsledného betonu.	
Seznam doporučené literatury: - Odborné časopisy: eBeton, WasteForum a další články dostupné v databázi Scopus a WoS - Normy: ČSN EN 1097-6, ČSN EN 933-1, ČSN EN 12390-3 - Impaktované články zabývající se materiálovým výzkumem: Construction and Building Materials, Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composites	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 14. 2. 2022	Termín odevzdání BP v IS KOS: 15. 5. 2022
	Údaj uveďte v souladu s dat.  k. roku
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
15. 2. 2022	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Podpis



## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Zdeňku Proškovi, Ph.D. za jejich čas, ochotu a poskytnuté rady během vypracování této práce. Současně bych chtěl věnovat poděkování Jaroslavu Kasalickému za poskytnuté rady v oblasti zkoušení recyklovaného kameniva, dále Filipu Gramanovi a Pavlu Koubíkovi za jejich pomoc během výroby zkušebních těles. V poslední řadě své poděkování věnuji rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi v průběhu studia vysoké školy byli významnou oporou.





## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi využití drobného recyklovaného kameniva jako náhrady za přírodní kamenivo pro použití do betonu. Samotnému nahrazení předchází zjištění základních vlastností použitého kameniva: granulometrické složení, obsah jemných částic, objemové hmotnosti a nasákavost. Pro výrobu zkušebních těles byl použit portlandský cement, hrubé a drobné přírodní kamenivo, které bylo nahrazeno ze 33, 66 a 100 % recykláty, přesněji betonovým, směsným a cihelným. Vyrobená zkušební tělesa byla testována po 7 a 28 dnech pro zjištění pevnosti v tlaku. Dále byla zkoušena objemová hmotnost, nasákavost a pórovitost. Zjištěné výsledky u recyklovaných kameniv naznačovaly výrazné nepřesnosti při používání normových zkoušek, konkrétně nasákavosti a objemových hmotností, u směsného a cihelného recyklátu. Vyrobené betony vykazovaly nejlepší vlastnosti při použití náhrad z betonového recyklátu.

### **Klíčová slova:**

recyklace, drobné recyklované kamenivo, betonový recyklát, směsný recyklát, cihelný recyklát, beton

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the possibilities of using fine recycled aggregates as a substitute for natural ones in order to be used in concrete. The replacement itself is preceded by the determination of basic properties of the aggregate used, such as particle size distribution, content of fine particles, bulk density and its absorption. Portland cement, a coarse and fine natural aggregate was used to produce test specimens, which was replaced by 33, 66 and 100 % recycled materials, especially recycled aggregates of concrete, mixed as well as brick ones. The manufactured test specimens were tested after 7 and 28 days to determine the compressive strength. Bulk density, absorption and porosity were also tested. The results obtained for recycled aggregates indicated significant inaccuracies in the use of standard tests, specifically absorbency and bulk densities, for mixed and recycled brick aggregates. The concrete produced showed the best properties, using recycled concrete substitutes.

### **Key words:**

recycling, fine recycled aggregates, recycled concrete aggregate, mixed recycled aggregate, recycled brick aggregate, concrete



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stavebně demoliční odpad.....</b>	<b>2</b>
2.1	Současný stav problematiky .....	3
2.2	Možnosti nakládání se SDO .....	5
2.3	Produkce a nakládání se SDO v ČR.....	6
2.4	Recyklace SDO .....	8
2.5	Postup recyklace SDO .....	10
2.6	Rizika spojená s recyklací .....	12
2.7	Druhy recyklátů .....	13
<b>3</b>	<b>Kamenivo do betonu .....</b>	<b>15</b>
3.1	Normativní zkoušky pro recyklované kamenivo do betonu .....	15
3.2	Vlastnosti drobného kameniva.....	15
<b>4</b>	<b>Nahrazení přírodního kameniva.....</b>	<b>17</b>
4.1	Nahrazení hrubé frakce přírodního kameniva.....	17
4.2	Nahrazení drobné frakce přírodního kameniva.....	18
4.2.1	Betonový recyklát .....	19
4.2.2	Cihelný recyklát .....	20
4.2.3	Směsný recyklát .....	21
	<b>Experimentální část.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Experimentální metody .....</b>	<b>23</b>
5.1	Drobné kamenivo .....	23
5.1.1	Křivka zrnitosti .....	23
5.1.2	Obsah jemných částic.....	24
5.1.3	Objemová hmotnost.....	25
5.1.4	Nasákavost.....	26
5.2	Čerstvý beton .....	27
5.2.1	Konzistence.....	27

5.3	Ztvrdlý beton .....	28
5.3.1	Objemová hmotnost .....	28
5.3.2	Nasákavost .....	28
5.3.3	Pórovitost .....	29
5.3.4	Pevnost v tlaku .....	30
<b>6</b>	<b>Vstupní materiály a zkušební vzorky.....</b>	<b>31</b>
6.1	Popis materiálu .....	31
6.2	Navržená betonová směs a výroba .....	34
6.3	Zkušební vzorky.....	36
6.4	Skladování .....	36
<b>7</b>	<b>Výsledky a diskuze.....</b>	<b>37</b>
7.1	Drobné kamenivo .....	37
7.1.1	Křivka zrnitosti .....	37
7.1.2	Obsah jemných částic .....	39
7.1.3	Objemová hmotnost .....	40
7.1.4	Nasákavost .....	41
7.2	Ztvrdlý beton .....	42
7.2.1	Objemová hmotnost .....	42
7.2.2	Nasákavost .....	43
7.2.3	Pórovitost .....	44
7.2.4	Pevnost v tlaku .....	45
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>46</b>





# 1 Úvod

Vzhledem ke zvyšující se produkci stavebního a demoličního odpadu je nutné pro tento druh odpadu najít vhodné využití, přičemž některé z nich jsme v současné době již plně schopni zahrnout do koncepce znovupoužití, kterému předchází proces recyklace. Podobná témata byla řešena již v minulosti, ovšem tato problematika bude stále více ovlivňovat naši kvalitu budoucího života, a tudíž je nutné zajistit efektivní zacházení se stavebními a demoličními odpady a věnovat těmto tématům náš čas, finanční zdroje a touhu po poznání.

V případě nakládání s těmito odpady byly v minulosti nejvíce využívány prostory skládek, na kterých bylo ukládáno velké množství tun odpadu, ovšem toto řešení se v současné době výrazně omezuje, např. zakazy skládkování inertního odpadu, a vše směřuje k výrazně jinému konceptu nakládání s těmito odpady ve formě využití každé suroviny, kterou tento odpad obsahuje. Při vyřešení problémů spojených s tímto pojetím využívání odpadů by lidstvo bylo schopno výrazně omezit těžbu přírodních neobnovitelných zdrojů, neboť i tyto zdroje mají své limity a je na nás, abychom si stanovili své hranice, které z důvodu existenčních či jiných nebudeme chtít překročit.

Cílem této bakalářské práce bylo zhotovit rešeršní část, která se zabývá problematikou recyklace stavebně demoličních odpadů a současně možnostmi využití recyklovaného kameniva jako náhrady za přírodní drobné kamenivo v betonech, společně se stanovením vlastností těchto kameniv, které by bylo možné využít pro efektivní navržení výrobních směsí. Současně z těchto směsí vyrobit zkušební tělesa a zjistit jejich fyzikální a mechanické vlastnosti, které byly na závěr posouzeny, a vybráno nejvhodnější řešení.

## 2 Stavebně demoliční odpad

Pro stavebně demoliční odpad se obecně využívá zkratka SDO a jedná se o produkt, který vzniká při stavbě, přestavbě, rekonstrukci nebo demolici stavebních objektů. Blíže je tato problematika vysvětlena a popsána v zákonu o odpadech č. 541/2020 Sb. [1].

SDO se rozděluje do tří skupin: inertní odpady, neinertní odpady a znečištěné odpady. První skupinu tvoří odpady, které nevykazují chemické případně fyzikální změny v průběhu času. Konkrétně se jedná o zbytky betonu, cihelné bloky a maltoviny, přičemž tato skupina se podílí nejvyšší produkcí z výše zmíněných [2]. Jedná se konkrétně o 84 % z celkové produkce SDO z nově budovaných, rekonstruovaných a demolovaných stavebních objektů [3]. Neinertní odpady jsou tvořeny materiály jako je dřevo, sklo, papír, dřeviny a jiné organické materiály, které v průběhu času mění svou strukturu. Tato skupina zastupuje již výrazně menší podíl z produkce odpadu v porovnání s odpadem inertním [2]. Do skupiny kontaminovaných odpadů spadají zeminy, případně SDO, který přišel do kontaktu s ropnými, případně jinak nebezpečnými látkami. Produkované množství této skupiny odpadů je v porovnání s předchozími skupinami velmi nízké [4].

Hlavními odpady, které vznikají ze stavebních procesů, je zdicí materiál, zbytky malt, obklady, dlažby, beton, dřevěný materiál, elektrické rozvody, tepelně izolační materiál, potrubí, sklo a jiné odpadní materiály. Tyto odpady se dají ve velké míře recyklovat a využít pro případnou výrobu nových výrobků nebo je jinak využít. Samostatným zástupcem odpadu jsou zeminy, konkrétně ty z výkopových prací, které tvoří až 50 % celkové produkce SDO. Zeminy nejsou určeny pro recyklaci, neboť se dají využít v jejich původním nezměněném stavu pro zemní práce [5].

Aby bylo možno SDO recyklovat, musí být zajištěno jeho roztřídění před samotným odvozem odpadu ze stavby. Což v praxi znamená rozdělení různých druhů odpadů do samostatných kontejnerů, které se na stavbě nacházejí. V případě smíchání s jiným druhem stavebního a demoličního odpadu je jeho následná recyklace komplikovanější a finančně náročnější [5].

Produkované odpady jsou posuzovány i z hlediska ochrany životního prostředí. Pro účely jednoduššího posouzení se využívá rozdělení odpadů podle kódového označení, které se nachází v katalogu odpadů v příloze 1 Vyhlášky č. 8/2021 Sb. [6] v oddílu 17. Pro každý odpad, případně jejich skupinu je v Tab. 1 přiřazen číselný kód, který daný odpad popisuje [5].



Tab. 1 – Rozdělení SDO [6]

Kód	Název
17	Stavební a demoliční odpady
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika
17 02	Dřevo, sklo a plasty
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu
17 04	Kovy (včetně jejich slitin)
17 05	Zemina (včetně kontaminované), kamení, vytěžená hornina a hlušina
17 06	Izolační materiály a stavební materiály s obsahem azbestu
17 08	Stavební materiál na bázi sádry
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady

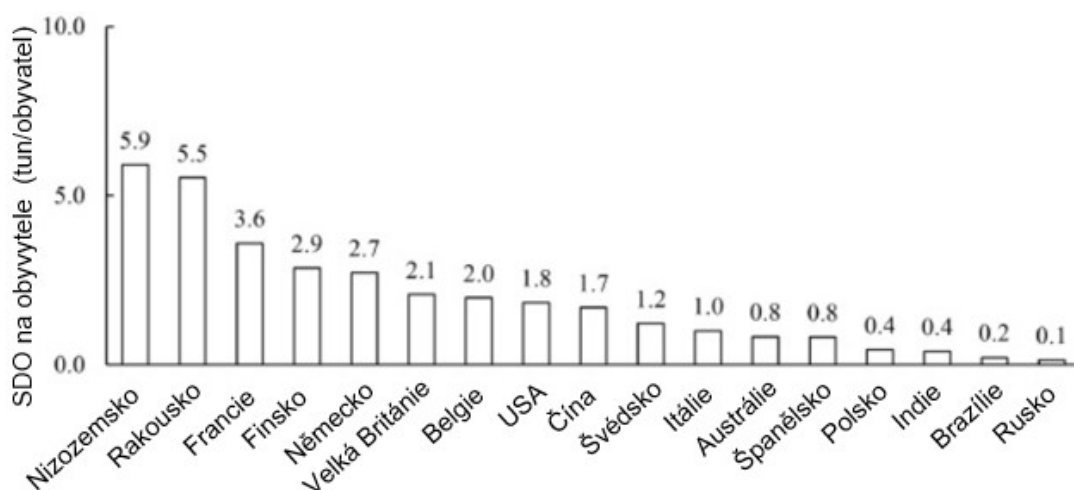
Z hlediska zákonů nelze demolici staveb uvažovat jako výrobu, tudíž nemůžeme výsledný SDO považovat za tzv. vedlejší produkt. Pro některé prvky a dílce existují výjimky, které nepovažují SDO za odpad. Jsou to případy, kde jsou konstrukční prvky a dílce ze stavebních konstrukcí vyjmuty. Za případné vyjmutí se považuje rekonstrukce nebo demolice stavebního objektu nebo jeho části. Hlavními představiteli spadajícími do této výjimky jsou betonové dílce a nosníky, keramické bloky a pálené nebo jinak vyrobené cihly. Tyto prvky a dílce musí splňovat podmínku neznečištění nebezpečnými látkami a musí být v jejich nezměněné podobě umožněno zabudování do budoucí stavební konstrukce. Za změnu jejich podoby se nepovažuje očištění nebo oškrabání zbytků maltových směsí. Počet znovupoužitelného stavebního materiálu je závislý především na znalosti skladeb konstrukcí stavby, která je rekonstruována nebo demolována. Tomu přechází plán demolice, který umožňuje co nejefektivnější oddělení SDO od opětovně využitelných prvků, případně oddělení nebezpečných prvků, které by komplikovaly následnou recyklaci nebo skládkování SDO [7].

## 2.1 Současný stav problematiky

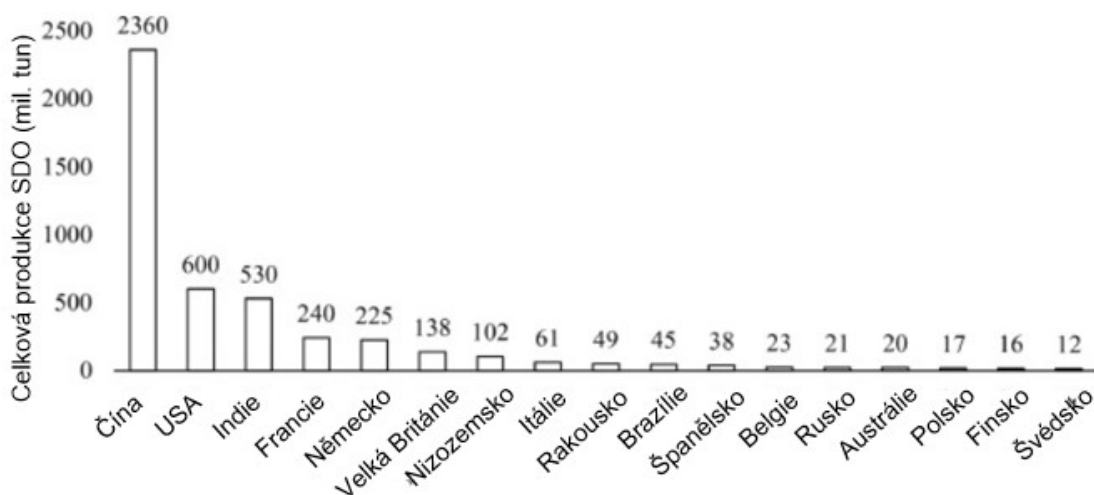
V současné době můžeme pozorovat zhoršující se situaci na planetě Zemi, v podobě globálního oteplování a snižování zásob nerostných surovin. Oba tyto jevy mají neblahý vliv na životy lidí a na výrobu stavebních materiálů, které jsou závislé na přísunu neobnovitelných zdrojů. Celosvětově se jednotlivé státy snaží řešit potíže, které vznikají vlivem ekonomického růstu, týkajících se životního prostředí např: Pařížská dohoda z roku 2015, která řeší snížení produkce skleníkových plynů, nebo snahy Evropské unie o snížení emisí oxidu uhličitého do roku 2050. V případě stavebnictví se nejvíce upozorňuje na výrobu betonu jako stavebního materiálu,

jehož výroba je energeticky náročná [8]. Jednou z hlavních složek betonu je cement, který se vyrábí při vysokých teplotách, tudíž se na jeho výrobu spotřebuje velké množství energie, které je spojováno s nemalou produkcí oxidu uhličitého, jehož množství se snažíme v současné době snižovat. Produkce cementu se na celém světě za posledních 20 let zvýšila z 1,1 miliardy tun na neuvěřitelných 3,27 miliardy tun. Některé odhady uvádějí, že produkce cementu by mohla do roku 2030 vzrůst až na 4,83 miliardy tun [9]. Nedílnou složkou betonu je také kamenivo, které bylo v minulosti využíváno výhradně z přírodních zdrojů, přičemž v roce 2015 překročila jeho spotřeba 48,3 miliardy tun a jeho spotřeba se každým rokem zvyšuje [10].

Mezi největší celosvětové producenty SDO v roce 2018 byla uváděna Čína (2360 mil. tun), Spojené státy americké (600 mil. tun) a Indie (530 mil. tun). Celkové pořadí nejvýznamnější producentů je znázorněno na Obr. 1. Rozdílné pořadí lze pozorovat v případě produkce odpadu na obyvatele, kde se překvapivě na předních příčkách nacházejí země jako Nizozemsko a Rakousko. Přesné pořadí a množství odpadu v přepočtu na obyvatele jsou uvedeny na Obr. 2 [3].



Obr. 1 – Produkce SDO ve světě v roce 2018 [3]



Obr. 2 – Produkce SDO na obyvatele [3]

Podle některých studií je až 35 % celosvětové produkce SDO skládkováno. Ve výjimečných situacích nesprávného uskladnění může dojít ke znečištění podzemních vod, neboť se v odpadu mohou v některých případech vyskytovat škodlivé látky např: chemikálie a ropné látky [11]. Vzhledem ke zvyšujícímu se trendu produkce SDO je nutné řešit rozlohy stávajících skládek a polohy skládek nových, které by v budoucnu mohly být otevírány na místech, která byla v minulosti považována za hodnotná. Nedostatek místa pro skládky může mít v budoucnu za následek zvyšující se finanční náročnost na likvidaci SDO a možná rizika pro přírodu s tím spojená [3].

Vzhledem k rizikům spojených se SDO začínají jednotlivé státy, společnosti a výzkumníci přijímat opatření, která by napomohla a zpřístupnila možnosti, jak nakládat se SDO bez dopadu na přírodu a finanční náročnost. Jednou ze snah Evropské unie bylo snížení produkce inertního odpadu do roku 2020 o 70 %, toho by bylo možné dosáhnout při 2% růstu recyklace, bohužel se reálný růst pohyboval kolem 1 %. Vědecké výzkumy se v posledních desetiletích shodují na možnosti nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným, což má své výhody z hlediska šetření přírodních zdrojů a využívání SDO. Nedílnou součástí je i finanční stránka problematiky, kde se dá ušetřit v průměru od 10 do 20 % nákladů na stavební materiál. Další studie poukazuje na možnost snižování emisí skleníkových plynů vlivem využívání recyklovaného kameniva až o 65 % [3].

## **2.2 Možnosti nakládání se SDO**

V dnešní době je dostupných několik možností, jak se SDO nakládat. Mezi nejsnazší a finančně nenáročnou řadíme skládkování, které slouží k uskladnění odpadu bez nutnosti s ním v budoucnu jakkoliv hýbat. Toho bylo v dřívější době využíváno, neboť nebyl kladen takový tlak na znovupoužití SDO. Ovšem s postupem doby se začaly hledat jiné alternativy, jak snížit zátěž na životní prostředí a jak začít šetřit zásoby neobnovitelných zdrojů, neboť možnost skládkování není do budoucna udržitelná [12]. Touto alternativou se stala recyklace, která umožňuje snížení celkového množství skládkovaného odpadu. Současně bylo umožněno tento odpad roztřídit a v budoucnu znovu použít pro nové konstrukce a výrobky, které šetří neobnovitelné přírodní zdroje [7]. Ve spojení s recyklací se objevuje také upcyklace, která již podle názvu vytváří materiál z odpadu, jehož hodnota se zvyšuje po provedení potřebných úprav. Konkrétně se jedná např. o recyklované kamenivo do betonu [13]. Opakem tohoto typu úpravy je downcyklace, která vytváří horší typ recyklovaného materiálu. Nejčastěji je možné jej využít v podobě zásypů a terénních úprav vzhledem k jeho nižší pořizovací ceně [14].

## 2.3 Produkce a nakládání se SDO v ČR

V ČR dochází k postupnému zvyšování produkce SDO, která souvisí s nárůstem stavebních projektů a prací v zemi. Toto zvýšení produkce můžeme pozorovat v Tab. 2, konkrétně v letech 2012 a 2018. Podíl SDO, který je v zemi produkován, tvoří zhruba 2/3 veškeré produkce odpadů. K problematice recyklace a nakládání se stavebně demoličním odpadem se ČR staví velice kladně, což můžeme pozorovat v kvantitě vyrobených recyklovaných kameniv. Otázkou je, jak tento materiál využívat, neboť jeho použití je v některých případech komplikované. Konkrétně cihelný a směsný recyklát je za současných legislativních podmínek nevyužitelný. Naopak pro asfaltové recykláty byla v roce 2019 vytvořena vyhláška, která umožňuje nazývat asfaltové odpady vedlejším produktem, tudíž je jeho možnost využití legislativně podpořena a celkově jednodušší. V následujících letech by podobná vyhláška měla být projednávána i pro betonové a cihelné odpady [15].

Tab. 2 – Produkce SDO v ČR [15; 16]

Kód	Název	2012	2018
		[kt]	[kt]
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika	3 445	5 144
17 01 01	Beton	1 385	2 121
17 01 02	Cihly	735	774
17 01 03	Tašky a keramické výrobky	14	17
17 01 07	Směsi neuvedené pod č. 17 01 06	1 250	2 232
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výr. z dehtu	531	907
17 05	Zemina (včetně kont. míst), kamení a hlušina	8 908	13 495
17 06	Izolační mat. a stavební mat. s obsahem azbestu	59	43
17 08	Stavební materiál na bázi sádry	7	14
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady	496	713
	Celkem	13 400	20 316

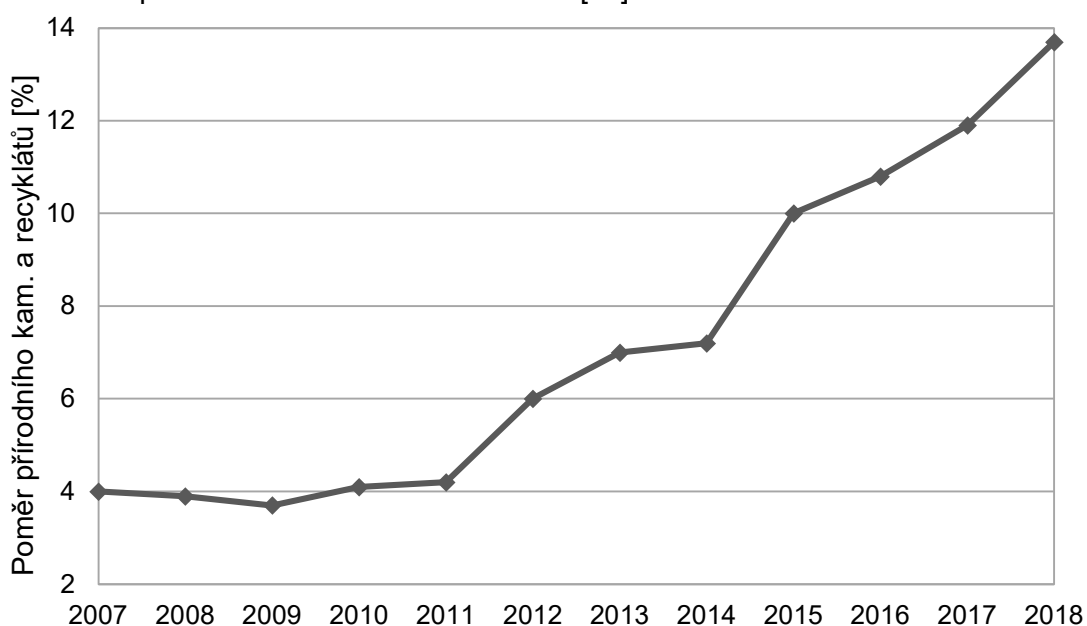
Ohledně zpracování a produkce odpadů v ČR v současné době platí zákon č. 541/2020 Sb., který se zabývá odpady, a druhý zákon č. 542/2020 Sb., o výrobcích s ukončenou životností. Oba tyto zákony platí od 1.1.2021. Tyto zákony jsou od 7.8.2021 doplněny o vyhlášku 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, který určuje, co se považuje za stavební a demoliční odpad. Nově byly schválena vyhláška č. 16/2022 Sb., o podrobnostech nakládání s některými výrobky s ukončenou životností (konkrétně elektrospotřebiče a fotovoltaické panely) [17].

V ČR bylo již v roce 2012 velké množství inertního odpadu využito pro recyklaci a pro terénní úpravy. Samotné skládkování probíhalo na 298 skládkách a tvořilo jen zlomek využití z celkové produkce SDO v ČR, což je znázorněno v Tab. 3 [18].

Tab. 3 – Nakládání se SDO v ČR rok 2012 [18]

Nakládání se SDO	Kód odpadu [kt]				Celkem [kt]
	Beton, cihly	Asfaltové směsi	Zemina	Jiné	
Recyklace	1 470	360	1 036	94	2 961
Skládkování	193	22	306	129	651
Terénní úpravy	458	5	1 914	26	2 404
Rekultivace skládek	31	/	394	5	430
Bezpečnost skládek	205	9	205	106	542

V roce 2020 se v souvislosti s nutností těžby přírodního kameniva začal v ČR projevovat nedostatek lomů. Vzhledem ke složitému procesu povolování nových se nabízí řešení v podobě zvyšování množství využívaného recyklovaného kameniva ve stavebních konstrukcích, neboť těchto zásob má ČR velké množství. V souvislosti s obecným vývojem můžeme pozorovat zvyšující se trend produkce recyklovaného kameniva v porovnání s kamenivem přírodním, který se v posledních letech přibližuje 15 %. Postupný nárůst můžeme pozorovat na Obr. 3, kde je znázorněn vývoj od roku 2007 až do roku 2018. Přírodní kamenivo je reprezentováno všemi lomy a místy pro těžbu v ČR. Dá se předpokládat, že za aktuálních podmínek, které se pojí s nedostatkem přírodního kameniva, by mohlo poměrné procento v následujících letech stoupat až na hodnotu od 25 do 30 % [15].



Obr. 3 – Poměr produkce recyklátů a přírodního kameniva [15]

## 2.4 Recyklace SDO

Recyklace má svá pozitiva i negativa, která jsou zobrazeny v Tab. 4, ovšem obecně se recyklací SDO rozumí roztřídění jednotlivých odpadů podle druhu suroviny. Kvalita recyklovaného materiálu závisí na pracovních postupech demoličních prací, neboť v této fázi je možno zajistit nejvhodnější oddělení jednotlivých demoličních odpadů, což má za následek ušetření finančních nákladů na recyklaci následnou. Tříděný stavební odpad by měl být zbaven cizích materiálů přímo na stavbě, ze které pochází. Roztříděný odpad je skladován jednotlivě ve stavebních kontejnerech určených na odpad a odvážen na deponie nebo do provozů zabývajících se recyklací SDO [7].

Tab. 4 – Výhody a nevýhody recyklace [19]

Výhody	Nevýhody
Ochrana životního prostředí	Některé odpady se nevyplácí recyklovat
Šetrnost zacházení ke zdrojům	Složitost recyklace některých odpadů
Nižší spotřeba energie pro výrobu	Nutnost separace odpadů
Finančně méně náročná	

V posledních letech se začíná veřejnost stále více vzdělávat v oblasti recyklace odpadů a jejich dopadů na celosvětové a místní dění. Hlavním zdrojem informací jsou média, sociální sítě a různé blogy. S tím jak obyvatelstva států začínají rozumět základním souvislostem v oblasti nakládání s odpady, se začíná vyvíjet nátlak na vlády jednotlivých států, aby začaly tento problém efektivněji řešit. V této souvislosti vlády přijímají návrhy a koncepty územního rozvoje, které mají za následek zkvalitnění a vymezení postupů jak s těmito odpady zacházet. Tyto koncepty by měly respektovat vývoj nových poznatků a efektivně tyto poznatky zapracovávat do svých nařízení [20].

I přes veřejnosti podporovanému zacházení s SDO se v této problematice nacházejí překážky, které využití recyklovaných materiálů do velké míry komplikují. Hlavním problémem je ekonomická náročnost, převážně náklady spojené s dopravou odpadu do provozů určených pro úpravu SDO. Častým problémem těchto recyklačních míst je jejich vzdálenost od zdrojů odpadu, kde jsou klady recyklace převažovány jejími negativy, konkrétně náklady na způsob využití dopravy a následky této dopravy na životní prostředí. Po zahrnutí všech nákladů a komplikací se v mnoha případech výrobcům betonu finančně nevyplácí odebírat recyklované kamenivo, které v recyklačních střediscích vzniká. V některých případech se ovšem SDO nemusí dopravovat až do recyklačního zařízení, neboť se v této době dají využít mobilní

recyklační linky, které jsou mnohdy výhodnějším řešením než samotná doprava odpadu do vzdálených stacionárních zařízení. Toto řešení odbourává náklady spojené s dopravou odpadu ale pouze v případech, kde se vyrobený recyklát dá využít v blízkém okolí jeho zdroje, a pokud vlastnosti takto vzniklého recyklovaného kameniva splňují požadavky na budoucí využití [20].

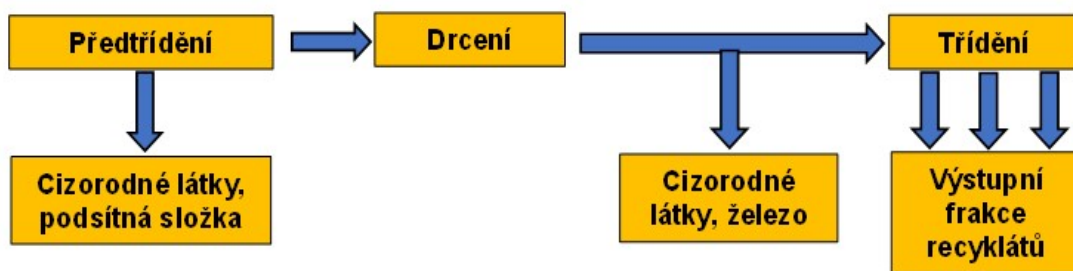
Častým problémem recyklace je těžce dosažitelné udržení požadovaných vlastností recyklovaných kameniv, které jsou žádány investory a výrobci betonu. Kdyby bylo možné zajistit potřebnou kvalitu recyklovaného kameniva, bylo by jeho využití pro výrobu betonu s obsahem recyklovaných kameniv přijímáno vlídněji. Dosažením této stálosti by bylo možné nahradit přírodní kamenivo ve větším podílu kamenivem recyklovaným [21]. Důvodem těchto nestálých vlastností bývá často nižší kvalita budoucího recyklátu, neboť tato kvalita by byla promítnuta do výsledné ceny budoucí konstrukce. V některých případech je postup recyklace natolik složitý, že recyklační zařízení nejsou schopna svými předpisy a postupy provést tento krok efektivně a hlavně levně. Spojením těchto faktorů dochází k získání nekonzistentních vlastností recyklátů a mohou se v řádu dnů výrazně lišit [22].

Dalším problémem je relativně nízká cena přírodního kameniva. Tato cena v mnoha případech zanedbává dopady těžby na přírodu a znečištění ovzduší. Ovšem tyto negativní dopady jsou v ceně nakonec reprezentovány ve formě daní [20]. Tyto daně se odvíjejí od momentální situace, konkrétně na postoji vlád jednotlivých států a jejich zájmech. Danění se využívá i při zvyšování příjmů, ovšem cílem není snížit zájem po přírodním kamenivu, ale docílit malého zvednutí cen bez snížení poptávky. Reálné užití této metody spočívá ve vyšším zdanění surovin, které mají ustálenou cenu, a naopak suroviny s velkým rozptylem cen mají tuto daň nižší [23].

Důvody zdanění neobnovitelných zdrojů, což je v tomto případě těžba přírodního kameniva má několik důvodů. Tím, že se kamenivo zdražuje, dochází ke snížení jeho těžby, neboť po něm není tak velká poptávka, což do jisté míry chrání neobnovitelné zdroje před jejich brzkým vyčerpáním. Dochází k omezení produkce odpadů a prachových částic v důsledku menšího objemu těžby. Vlivem zdanění přírodního kameniva jsou podniky a investoři nuceni přemýšlet i o variantách užití recyklovaného kameniva, který se obecně jeví jako zdroj, který je ekologičtější. Pokud by se podařilo recyklované zdroje natolik zvýhodnit, bylo možno většinou produkci SDO přetvořit na recyklát, který by mohl mít velké zastoupení při výstavbě nových stavebních objektů [24].

## 2.5 Postup recyklace SDO

Celkový proces recyklace se začíná již na stavbě. Odpad z demolice je nutno roztřídit a oddělit. Tato fáze bývá nejvíce závislá na pečlivosti pracovníků stavebních firem, neboť případné smíšení odpadů se může nepříznivě promítnout do nákladů následné fáze recyklace. Po provedení této fáze se na staveništi nachází roztříděný demoliční odpad v podobě zbytků zděičího materiálu, kovů a jiných, který může postoupit do následné fáze, ve které se již využívá recyklačních zařízení. Princip těchto zařízení je vložení demoličního odpadu do násypky. Poté dochází k podrcení vloženého odpadu, velikost vniklých zrn lze nastavit pomocí nastavitelných čelistí drtiče. Vzniklý materiál pokračuje do fáze oddělení kovového odpadu, které se provádí pomocí elektromagnetu. Nejčastěji se zde nachází betonářské výztuže, spojovací materiál a jiné. Takto vyčištěný materiál pokračuje na třídící síta, která od sebe oddělují jednotlivé frakce, a vzniklý materiál je skladován na deponiích. Schématicky je tento postup recyklačních procesů znázorněn na Obr. 4 [19].



Obr. 4 – Schéma recyklace SDO [25]

Rozlišujeme dva druhy recyklačních zařízení pro úpravu SDO. Jejich využití primárně záleží na okolních podmínkách jako jsou vzdálenost od nejbližší skládky a recyklačního zařízení, způsobu recyklace, kvalitě a množství získaného recyklátu. Prvním typem jsou mobilní linky, které jsou využívány vždy na místě, na kterém je skladován SDO. Mnohdy se využívají i během demolic, během kterých je produkován odpad okamžitě zpracováván [20]. Udává se, že tyto linky jsou využity až při 35 % všech prací. Druhým typem jsou stacionární linky, které jsou o poznání větší, a bývají vybaveny složitějšími technologiemi spojenou s vyššími výkony [26]. V minulosti se v obou případech jednalo o velice rozměrné zařízení, ovšem v průběhu vývoje se začaly zmenšovat a jejich efektivita se zvyšovala [27]. Obecně se linky na zpracování SDO výrazně neliší od linek, které zpracovávají přírodní kamenivo. V obou případech se u nich nachází drtič, třídič, síta a dopravníkové pásy [28].



## Mobilní recyklační zařízení

Jedná se o hybné zařízení, které je poháněno nejčastěji pomocí dieselového motoru. Tento motor zajišťuje pohon jak drtících čelistí, tak dalších systémů. Výkony těchto zařízení se pohybují od 50 do 150 t/h. Odpad je vsypáván do násypky, ze které putuje pomocí vibračního pásového dopravníku k čelistovým drtičům. Tato zařízení mají obvykle jeden nebo dva drtiče. Pokud to konstrukce umožňuje, mohou obsahovat také separátory pro vytrídění nečistot. Takto upravené kamenivo se dopravuje pomocí dalšího pásového dopravníku na místo určené ke skladování [29; 30]. Shrnutí výhod a nevýhod mobilních recyklačních zařízení se nachází v Tab. 5.

Tab. 5 – Výhody a nevýhody mobilního recyklačního zařízení [31]

Výhody	Nevýhody
Kratší vzdálenosti pro přepravu odpadu	Méně kvalitní recyklát
Přemístitelnost	Prašnost
Méně rozměrné	Drahé při výrobě malého množství

## Stacionární recyklační zařízení

Tato zařízení obsahují i několik drtičů, oddělovače kovové odpadu a dopravníkové pásy. V některých případech také technologii pro promývání odpadu vodou, k čemuž se využívá vodních separátorů. Ty umožňují znečištěný materiál zbavit odplavitelných částic, nejčastěji se jedná o jemný prach, případně zbytky dřeva a plastů. Takto upravený materiál můžeme považovat za velice kvalitní a vhodný k roztřídění. Roztřídění se provádí pomocí oscilačních třídíčů, kde je recyklovaný materiál oddělován soustavou sítí různých velikostí a následně dopravován na deponie, odkud je odebírán pro další využití [26].

Tab. 6 – Výhody a nevýhody stacionárního recyklačního zařízení [31]

Výhody	Nevýhody
Velmi kvalitní recykláty	Drahé pro pořízení
Množství vyrobeného recyklátu	Nákladný na dovoz SDO
Dlouhodobý provoz	Nákladné na provoz

## **2.6 Rizika spojená s recyklací**

Jako každý průmysl má i recyklace stavebního odpadu řadu negativních dopadů na životní prostředí a na nás samotné. Hlavním problémem recyklace je samotná přeprava a úprava kameniva, neboť při drcení vzniká jemný prach, kterému se složitě zabraňuje. S tímto bodem se pojí také hluk a otřesy, k oběma těmto negativním produktům recyklace dochází při samotném drcení kameniva v recyklačním zařízení [20]. Některá tato zařízení využívají ve své technologii úpravy také vodu, která slouží jako prostředek k promývání kameniva, aby bylo dosaženo jeho vyčištění od odpadu, který by mohl další úpravě kameniva bránit [25]. Tato voda se ve většině případů značně znečistí a při neodborném zacházení s touto vodou může dojít k ovlivnění kvality podzemních zásob vody nebo vodních toků [20]. Další vlivy způsobené recyklací jsou krátce popsány v následujících odstavcích.

### **Hluk a otřesy**

Mezi hlavní negativní zdroje patří hluk společně s otřesy, které vznikají při recyklačních procesech během úpravy SDO. Recyklační linky bývají umístovány do odlehlých míst, ovšem v některých případech mohou tyto vlivy značně ovlivňovat okolní zástavbu. Mezi hlavní producenty hluku patří chody motorů, přesuny odpadů, recyklovaného kameniva a samotné fáze úpravy odpadů [32].

### **Prachové znečištění**

Během výroby recyklovaného kameniva dochází vlivem drcení a přesouvání recyklovaného odpadu k produkci a víření velkého množství prachových částic. Nezanedbatelným zdrojem prachu je také doprava využívající nákladní automobily, které se pohybují po nezpevněných prašných cestách, a jejich pohyb po těchto komunikacích zvedá velké množství prachu, který je dále unášen větrem. Aby došlo alespoň k částečnému zlepšení, musí být zamezeno uvolňování prachu do ovzduší primárně v místě recyklace, neboť opatření pro nákladní přepravu nejsou v současné době proveditelná [33].

### **Poškození krajiny a přírody**

Rozsáhlejší recyklační zařízení často do krajiny nezapadají a nepůsobí přírodním dojmem, což může mít neblahý vliv na vnímání veřejnosti. V případě uzavření recyklačních zařízení bývá krajina uváděna do stavu, ve kterém se nacházela před jejich otevřením [33], avšak původní živočišné zázemí bývá již nenávratně zničeno.

## 2.7 Druhy recyklátů

### Betonový recyklát

Jedná se o nejčastěji využívaný druh recyklátu, neboť se vyrábí z betonového odpadu, kterého se produkuje obrovské množství. Musí splňovat taktéž některé podmínky, kterými jsou: obsah betonového odpadu  $\geq 90\%$ , obsah zemin a cihelného odpadu maximálně  $6\%$  a obsah skla méně než  $1\%$  [34]. Betonový recyklát se ve velké míře využívá v dopravním stavitelství, konkrétně u železničních staveb při tvorbě železničního svršku nebo v silničním stavitelství při tvorbě provizorních cest a zásypů. V případě inženýrských vedení jsou nahrazovány pískové obsypy pomocí jemného betonového recyklátu, který plní stejnou funkci [26]. U nových betonových směsí se recykláty taktéž využívají, ovšem toto využití má své limity, neboť betonový recyklát obsahuje starou betonovou pastu, u které jsou její vlastnosti ovlivněny původem, vodním součinitelem, prostředím a stářím betonu. Z toho důvodu je jeho využití schváleno jen do betonů třídy C30/37 a nižší [35].



Obr. 5 – Betonový recyklát [36]

### Cihelný recyklát

Tento druh recyklátu vzniká z cihelného odpadu, který je ze staveb dopravován do recyklačních zařízení, která produkují velikosti zrn až do 80 mm. Nejběžnějšími frakcemi jsou 0/16, 16/32, 32/80 mm, ale mohou být i jiné v závislosti na požadavcích dalšího využití. Takto vyrobený cihelný recyklát nachází své uplatnění při výrobě nových stavebních dílců a směsí. Reprezentantem těchto směsí je cihlobeton, ve kterém je přírodní kamenivo nahrazováno cihelným recyklátem. Využití těchto betonů má své limity v podobě horší odolnosti vůči mrazu z důvodu vyšší nasákavosti, proto se využívají hlavně ve vnitřních prostorech. Mezi zástupci stavebních dílců, které jsou z cihelného recyklátu vyráběny, jsou vibrované, lisované bloky, případně

nové cihly. Dále se recyklát využívá i jako možná náhrada do malt, ve kterých je využíváno drobných zrn recyklátu, konkrétně do velikosti 4 mm [37]. Ovšem nejčastěji se setkáváme s využitím ve formě různých zásypů v širokém spektru stavitelství [26].



Obr. 6 – Cihelný recyklát [36]

### **Směsný recyklát**

Jedná se o materiál, kterému předchází nekvalitně provedená demolice, která je prováděna ve velké míře demoličními stroji. V tomto případě nelze zajistit dostatečnou separaci jednotlivých druhů odpadů a dochází ke smíchání nebo je třídění odpadů natolik drahé, že je zanedbáno. Směsný recyklát obsahuje zbytky betonů, cihel, asfaltů, zemin, dřeva a v některých případech i sklo. Obsah znečišťujících látek by měl být  $\leq 10\%$  z celkové hmotnosti. Nejčastěji se využívá v podobě násypů, zásypů a jako materiál pro zemní úpravy [38].



Obr. 7 – Směsný recyklát [36]

## **3 Kamenivo do betonu**

### **3.1 Normativní zkoušky pro recyklované kamenivo do betonu**

Pro recyklované kamenivo nejsou v současné době normy, které by blíže specifikovaly, jakým způsobem se mají různé druhy recyklovaného kameniva zkoušet. Z toho důvodu se využívají normy pro přírodní kamenivo, které mají dostatečný legislativní rámec. Zkoušky pro přírodní kamenivo jsou rozděleny do třech oddílů, a to na geometrické, fyzikální a chemické [39].

První oddíl, tudíž geometrické vlastnosti představují zkoušku proséváním, jejichž výsledkem je určení hmotností jednotlivých frakcí zkoušeného kameniva a následné vytvoření křivky zrnitosti. Ve spojení s prosévací zkouškou bývá často používáno také hmotnostní určení jemných částic v kamenivu. Pro větší zrna kameniva je určován také tvarový index, kterým se určuje podíl vhodných zrn, které jsou vhodné pro výrobu betonu, a současně kolik zrn je nevhodných. Druhý oddíl je tvořen zkouškami fyzikálních vlastností, které se zabývají mrazuvzdorností, odolností vůči drčení, otírání, objemovou hmotností a nasákavostí zkoušeného kameniva. Některé tyto zkoušky jsou rozhodující pro využití recyklovaného kameniva do venkovních prostor, nejčastěji se jedná o zkoušky na jejich odolnost vůči působení mrazu. Posledním oddílem jsou zkoušky chemických vlastností. Tyto zkoušky představují rozbor chemického složení kameniva, dále obsah solí a mnohé další [39]. V normě ČSN EN 12620+A1 [40] se udává, které další druhy zkoušek se provádějí na kamenivu určeného pro využití do betonu, včetně popisu provedení a vyhodnocení.

### **3.2 Vlastnosti drobného kameniva**

Vlastnosti drobného kameniva se ve většině případů odvíjejí podle místa a druhu původu. Určitý vliv má také způsob úpravy odpadů, ze kterých jsou recyklovaná kameniva vyráběna, neboť některé druhy recyklace v závislosti na použitém materiálu tvoří například větší množství jemných částic, což může mít negativní vliv na jejich nasákavost. V souvislosti s původem a postupem získávání přírodního a recyklovaného kameniva se mohou některé výzkumy a odborné články značně lišit, konkrétně ve vlastnostech získaných ze zkoušek, které byly v daných publikacích prováděny. Z důvodu přehlednosti bylo drobné kamenivo rozděleno na jednotlivé druhy, kterými jsou: přírodní, betonové, směsné a cihelné.

Přírodní kamenivo popisují ve svých člancích např. JM Khatib [41], L. Evangelista [42], Rahul Singh [43] a José MV Gómez-Soberón [44], přičemž nejčastěji byl využíván křemičitý písek případně vápencový písek. José MV Gómez-Soberón [44], Ange-Therese Akono [45], Cheng-Chih Fan [46] používali betonový recyklát z recyklačních zařízení a L. Evangelista [42] provedl návrh a vlastní výrobu betonu, ze kterého vznikl výsledný recyklát. Vlastnosti drobného cihelného recyklovaného kameniva jsou blíže popsány v člancích od JM Khatib [41], Farid Debieb [47], May M. Atyia [48] a Ali A. Aliabdo [49]. V případě směsného recyklátu byly jeho vlastnosti popsány v odborných člancích od Jak-Ji Chen [50] a Taimí Castaño-Cardoza [51].

Z výše uvedených odborných článků jsou shrnuty vlastnosti drobného kameniva v Tab. 7. Obecně je nejčastěji při výrobě betonových a jiných směsí využíván přírodní písek, čemuž nasvědčuje i mnoho článků dokládajících vlastnosti jeho drobné frakce. Při zkoumání recyklovaného kameniva se dlouhodobě objevuje nejvíce článků zaměřených na využívání betonového recyklátu, čemuž nasvědčuje i objem dostupných dat. Menší zastoupení informací je možné dohledat o cihelném recyklátu, ovšem v posledních letech je tento materiál více zkoumán. Nejhůře dohledatelným materiálem je směsný recyklát, o kterém je do současné doby zveřejněno velmi málo výzkumů, což se odráží i na množství doložených dat.

Tab. 7 – Přehled vlastností drobného kameniva z odborných článků [41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51]

	<b>Přírodní</b>	<b>Betonové</b>	<b>Cihelné</b>	<b>Směsné</b>
Obj. hm. suchá [kg/m <sup>3</sup> ]	2544 – 2570	1913 – 2245	1700 – 2170	2190 – 2260
Obj. hm. osušená [kg/m <sup>3</sup> ]	2564 – 2630	2165 – 2404	2080– 2539	2417 – 2423
Nasákavost [%]	0,80 – 1,49	6,25 – 14,71	14,00 – 18,30	4,75 – 10,37
Modul jemnosti [-]	2,38 – 3,3	2,38 – 3,8	3,07 – 3,91	2,61 – 2,68
Jemné částice [%]	do 9,24	do 9,85	do 5,9	do 10,8

## 4 Nahrazení přírodního kameniva

Řešení této problematiky je popsáno v normě ČSN EN 206+A1 (tato norma byla v nedávné době nahrazena normou ČSN EN 206+A2), která stanovuje dva termíny, a to kamenivo regenerované a kamenivo recyklované [52].

Regenerované kamenivo je získáváno vypráním čerstvého betonu, ze kterého se dostávají jemné částice. Takto získané kamenivo lze využívat pouze do betonu třídy C12/15 a tříd nižších [53]. Další podmínkou je možnost nahrazení netříděného regenerovaného kameniva až do 5 % z výsledného hmotnosti použitého kameniva. V případě nahrazení více než 5 % musí být regenerované vyprané kamenivo rozděleno na drobnou a hrubou frakci. Takto rozdělené kamenivo musí splňovat požadavky dané normou ČSN EN 12620+A1. Regenerované kamenivo, které bylo získáno pomocí vyprání, je možno použít do betonu, ale jen pro vlastní využití daného výrobce. Při nahrazení více než 5 % regenerovaného drceného kameniva je podle normy nutno nazývat toto kamenivo recyklovaným [54]. Požadavky na recyklované kamenivo jsou rozděleny na hrubou (zrna > 4 mm) a drobnou (zrna od 0 do 4 mm) frakci a jsou popsány v dalších kapitolách. Stejně tak je doloženo několik odborných článků, které zkoumají vliv různých druhů recyklovaného kameniva na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.

### 4.1 Nahrazení hrubé frakce přírodního kameniva

Specifika problematiky nahrazení hrubé frakce přírodního kameniva jsou popsána v ČSN EN 206+A2. Obecně norma rozlišuje možnosti využití podle druhu hrubého recyklovaného kameniva a podle stupně vlivu prostředí, kterému bude kamenivo vystavováno. Norma popisuje dva druhy recyklovaného kameniva, a to druh A, který má min. objemovou hmotnost  $2100 \text{ kg/m}^3$  a další druh je B, jehož min. objemová hmotnost je  $1700 \text{ kg/m}^3$ . Norma ČSN EN 12620+A1 stanovuje pro oba tyto druhy recyklovaného kameniva, z jakých složek a v jakých poměrech mohou být zastoupeny, aby tvořily recyklované kamenivo [52]. Pro recyklované kamenivo druhu A platí, že může být použito do prostředí, na které byl navržen původní beton, ovšem využití je omezeno na max. 30 %. Recyklované kamenivo druhu B nesmí být použito do betonu C30/37 a vyšších. Pro oba druhy je možné max. 50% využití recyklovaného kameniva do stupně vlivu prostředí X0. Druh A lze využít s max. 30% využitím do vlivu prostředí od XC1 do XC4, XF1, XA1 a XD1, pro jiné stupně vlivu prostředí toto kamenivo využít nelze. U recyklovaného kameniva druhu B je možné využít až 20 % a to do stupňů vlivu prostředí XC1 a XC2, pro jiné stupně využít nelze [54].

Betony s obsahem recyklovaného hrubého kameniva mají vždy vyšší nasákavost, která oproti betonům s využitím přírodního kameniva zhoršuje jejich trvanlivost v prostředí vystavené mrazu a v situacích, kde dochází do styku s rozmrazovacími látkami. Z toho vyplývá, že recyklovaný beton je možné využít ve vnitřním prostředí budov a případně v základových konstrukcích [52].

Výzkum provedený Chaocan Zheng [55] řešil vliv nahrazení přírodního hrubého kameniva pomocí betonového a cihelného recyklátu. Navržené nahrazení bylo v 0, 25, 50, 75 a 100 %, přičemž pevnost byla v 56 dnech průměrně až o 25 % vyšší než ve 28 dnech. Bylo zjištěno, že při nahrazení betonovým recyklátem docházelo k nižším poklesům pevnosti oproti cihelnému recyklátu. V obou případech docházelo ke snižování pevností v tlaku se zvyšující se náhradou. Referenční vzorky vykazovaly mírně vyšší pevnosti než obě zmíněné náhrady.

## **4.2 Nahrazení drobné frakce přírodního kameniva**

K problematice nahrazení drobné frakce v betonových směsích, kde by bylo možné využít recyklované kamenivo, se v současné době nevztahují žádné předpisy ani normy [54]. Z pohledu recyklace SDO vzniká velké množství drobného recyklovaného kameniva, které by se dalo využít jako náhrada přírodního drobného kameniva podobně jako je tomu u hrubého recyklovaného kameniva. U drobné frakce bylo v minulosti provedeno několik výzkumů, které zjistily výrazný negativní vliv na většinu vlastností vyrobeného betonu, což bylo způsobeno vysoce nekvalitními recykláty [56].

Výzkumy zkoumající využití drobné frakce jako náhrady do betonu vznikají i v současnosti. Jedním z hlavních zjištěných problémů je vysoká nasákavost recyklovaného kameniva [57]. Nasákavost má za následek úbytek vody během míchání nutný k požadované zpracovatelnosti směsi, neboť tato voda je kamenivem v krátké době vysáta. Z toho důvodu je nutno počítat při návrhu směsi i s vodou, kterou kamenivo během míchání absorbuje [58]. Vlastní nasákavost je ovlivněna pórovitostí kameniva. Pórovitost má za následek nižší objemovou hmotnost výsledného betonu, které se negativně promítá v podobě nižší pevnosti betonu v tlaku a nižší odolnosti vůči vlivům zmrazování a jiných degradací [57]. Vzhledem k frakci, která je tvořena od 0 do 4 mm, se v recyklovaném kamenivu nachází vysoký podíl jemných částic. Tyto částice jsou tvořeny zrny, které mají svou velikost menší než 0,063 mm. Nejčastěji pocházejí z různých cementových past a zbytků maltovin, konkrétně u betonového a směsného recyklovaného kameniva. U cihelného recyklátu jsou tyto částice tvořeny prachovými částicemi, které vznikly při drcení cihelného odpadu. Při správném



dávkování těchto částic je předpokládán pozitivní vliv na výsledný beton, neboť by tento jemný materiál mohl vyplňovat malé mezery mezi zrny a tím zvýšit objemovou hmotnost betonu a současně jeho výslednou pevnost [51].

Rozlišujeme několik druhů recyklátů, které by bylo možno po uvedení norem pro drobné recyklované kamenivo využívat při výrobě betonu. Recykláty, které se dají pro danou problematiku využít, se rozdělují na betonový (nejčastěji zkoumaný), cihelný (častý výskyt) a případně směsný (velmi málo výzkumů). V následujících článcích a výzkumech jsou krátce popsány provedené náhrady z těchto recyklátů a zhodnocen jejich vliv na výsledné vlastnosti recyklovaného betonu společně se shrnutím podstatných zjištění, kterých bylo během výzkumů dosaženo. Tyto závěry budou v experimentální části využity pro porovnání s mými výsledky.

#### **4.2.1 Betonový recyklát**

L. Evangelista a J. de Brito [59] ve svém výzkumu zkoumali vliv 0, 10, 20, 30, 50 a 100% náhrady přírodního drobného kameniva na výsledné mechanické vlastnosti betonu. V případě pevnosti betonu v tlaku byla zjištěna mez 30 %, do které nedochází k výraznému snížení jeho pevnosti. Při vyšší náhradě je snížení pevnosti již znatelné. Stejná hranice byla pozorována u modulu pružnosti, u kterého byl v porovnání s referenčním betonem minimální rozdíl. V případě odolnosti vůči oděru docházelo k lepší výsledkům při vyšších náhradách s využitím recyklovaného kameniva.

V jiném výzkumu na trvanlivost betonu s použitím 0 %, 30 % a 100 % náhrady se L. Evangelista a J. de Brito [42] shodují, že nasákavost ponořením recyklovaného betonu se zvyšovala s vyšší náhradou za přírodní kamenivo, přičemž u 100% náhrady docházelo ke zvýšení až o 46 % oproti referenčnímu betonu. V případě kapilární nasákavosti docházelo k postupnému zvýšení absorpce vody, což mohlo být způsobeno vyšší pórovitostí recyklovaného kameniva. Odolnost vůči karbonataci byla přímo závislá na velikosti náhrady, přičemž při 100% náhradě došlo až k 110% zhoršení oproti referenčnímu betonu.

Jagan Sivamani [60] využíval drobné recyklované kamenivo, které bylo zbaveno jemných částic s předepsanými náhradami 25, 50 a 100 %. Bylo zjištěno, že vyšší procento náhrad má negativní vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu, přičemž beton s náhradou 25 % předčil vlastnosti referenčního betonu, konkrétně vykazoval nižší nasákavost způsobenou nižší pórovitostí. Současně byly zjištěny shodné, případně vyšší pevnosti betonu v tlaku v 7, 28 a 90 dnech u výše zmíněné náhrady oproti referenčnímu betonu. Při vyšší náhradě již docházelo k negativnímu ovlivnění pevnosti v tlaku a jeho odolnosti.

Výzkum vedený Cheng-Chih Fan [46] zkoumal vliv recyklovaného drobného kameniva, které vzešlo ze dvou různých metod výroby, na vlastnosti výsledného betonu. První metodou byla výroba hrubé i drobné frakce (R1) a druhá spočívala v drcení betonového odpadu s cílem získání pouze drobné frakce (R2). Navržené náhrady byly 25, 50 a 100 %, přičemž zkoušky probíhaly po 7, 14 a 28 dnech. Byly zjištěny lepší vlastnosti při využití R2 oproti R1, tudíž kvalita recyklátu závisí na procesu výroby recyklovaného kameniva. Beton s využitím R2 převyšoval svou pevností v tlaku, objemovou hmotností a lepší zpracovatelností recyklát R1. Současně bylo pozorováno zhoršení vlastností betonu s vyšším procentem náhrad v obou případech.

JM. Khatib [41] nahrazoval drobné přírodní kamenivo 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 % drobným recyklovaným betonovým kamenivem. Vzniklé betonové vzorky byly následně testovány po 1, 7, 28 a 90 dnech. Přírodní plniva byla zbavena jemných částic a betonový recyklát byl vyroben v laboratorních podmínkách. Bylo zjištěno, že k největšímu smrštění betonových vzorků dochází do 10. dne od výroby, poté již není smrštění tak výrazné. Vyššího dynamického modulu pružnosti bylo docíleno při nižších náhradách, současně mělo toto nižší zastoupení pozitivní vliv na výslednou pevnost betonu v tlaku.

Minkwan Ju a kolektiv [61] využívali při svém výzkumu drobné přírodní kamenivo a drobný betonový recyklát v náhradách 15, 30, 50 a 100 %, který byl pro účely výroby betonu předem nasáknut. Nasáknutí se pozitivně projevilo na nutnosti menšího množství záměsové vody. Modul pružnosti a pevnost betonu klesaly s rostoucí náhradou, přičemž ideální náhrada byla stanovena na 15 %.

#### **4.2.2 Cihelný recyklát**

Farid Debieb [47] provedl návrh s náhradami tvořené cihelným recyklátem od 25 do 100 %. Debieb zjistil, že nasákavost se vlivem vzlínivosti a smrštění zvyšovala s vyššími procenty náhrad. Objemová hmotnost byla až o 17 % nižší ve srovnání s referenčním betonem. Modul pružnosti a pevnost ztvrdlého betonu v tlaku byla snižována v závislosti na velikosti náhrady drobné frakce. Pro srovnatelné vlastnosti referenčních a recyklovaných betonových vzorků by byly ideální náhrady 25 a 50 %.

Výzkum provedený Juntao Dang [62] posuzoval vliv rozdílného vodního součinitele ( $v/c$ ) a velikosti náhrad 50 a 100 %. Tímto výzkumníkem byla zjištěna vyšší nasákavost při vyšším  $v/c$ , která se v čase snižovala. Obecně měly vzorky s vyšším

množstvím náhrad vyšší nasákavost. Při měření pórovitosti betonu měl nižší v/c vliv na nižší procentuální hodnoty pórovitosti, přičemž pórovitost stoupala také s vyšší náhradou. Nebyl pozorován výrazný vliv na velikost smršťovacích trhlin při změně procentuálního zastoupení náhrad.

Ali A. Aliabdo [49] se zabýval využitím cihelného odpadu jako náhrady do betonu a vlivem v/c na jeho vlastnosti. Náhrady byly stanovené na 25, 50, 75 a 100 %, přičemž betonové vzorky byly testovány v 7, 28 a 90 dnech. Směsi s využitím 25 % náhrady měly buď vyšší nebo shodné vlastnosti s referenční směsí. Vyšší v/c měl obrovský vliv na snižující se pevnost betonu. Pevnosti byly až na výjimku se 100% náhradou a v/c 0,7 shodné s referenčním betonem. Při v/c 0,5 měl beton od 50 do 100 % klesající výsledné pevnosti v tlaku.

Ve svém článku se JM. Khatib [41] zabýval vlastnostmi betonu s využitím recyklovaného cihelného kameniva a zastoupením 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Konzistence čerstvého betonu byla tužší u vysokého procenta náhrad, neboť voda byla vysáta recyklátem během výroby. Se zvyšující se náhradou cihelného recyklátu klesala objemová hmotnost. Nejvyšších hodnot dynamického modulu pružnosti bylo dosaženo při nízkých náhradách. Pevnost v tlaku a dlouhodobé smrštění klesalo při využití vyššího procenta náhrad.

### **4.2.3 Směsný recyklát**

Taimí Castaño-Cardoza a kolektiv [51] ve svém výzkumu zjistili vliv drobné recyklované frakce s 6% zastoupením jemných částic a bez nich na vlastnosti betonu, avšak současně bylo nahrazeno i hrubé kamenivo. Jemné částice v recyklovaném drobném kamenivu měly pozitivní vliv na celkovou nasákavost betonu, neboť snižovaly jeho pórovitost, což se projevilo na jeho nižší nasákavosti. Přítomnost jemných částic měla za následek zlepšení pevnosti ztvrdlého betonu v tlaku.

## Experimentální část

V experimentální části této práce byly představeny výsledky rozsáhlého výzkumu recyklovaných drobných kameniv a jejich vlivů na vlastnosti betonu doplněných mými poznatky během prováděných zkoušek. V úvodní části byly popsány experimentální metody (kapitola 5), popis vstupních materiálů včetně složení vyráběného betonu (kapitola 6) a výsledky zjištěné během výzkumu, které obsahují porovnání s odbornými články a výzkumy jiných výzkumníků (kapitola 7) zabývajících se podobnou problematikou. Samotná experimentální část se zaměřuje na zjišťování vlastností recyklovaného drobného kameniva a jeho vlivu na vyrobený beton. Konkrétně u kameniva se jednalo o geometrické a fyzikální vlastnosti. V případě betonu byl zkoumán vliv různých procentuálních náhrad drobného frakce, přičemž nahrazováno bylo přírodní kamenivo. Vlastnosti vyrobených betonových těles z tohoto betonu byly zkoumány nedestruktivními a následně destruktivní metodami.

Výsledné hodnoty získané z prováděných zkoušek byly vyhodnoceny pomocí aritmetického průměru (1), který stanovil střední průměrnou hodnotu pro danou skupinu vzorků. Dalším krokem bylo zjištění směrodatné odchylky spočítané podle (2), ve kterém byla spočítána výsledná odchylka naměřených hodnot oproti jejich průměru. Takto vyhodnocené výsledky byly zaneseny do grafů a tabulek.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

ve kterém:

- $\bar{x}$  aritmetický průměr [-],
- $n$  počet měření [-],
- $x_i$  změřené hodnoty [-].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

ve kterém:

- $\sigma$  směrodatná odchylka [-],
- $n$  počet měření [-],
- $x_i$  změřené hodnoty [-],
- $\bar{x}$  aritmetický průměr [-].

## 5 Experimentální metody

### 5.1 Drobné kamenivo

#### 5.1.1 Křivka zrnitosti

U zkoumaného recyklovaného drobného kameniva bylo nutné stanovit jeho zrnitost a současně byla stanovena i pro kamenivo hrubé. Zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 933-1 [63]. Pro účely zkoušky byla navážena navážka v předepsané minimální velikosti, přičemž byla zbavena jemných částic pomocí praní (blíže v kapitole 5.1.2), dále byla vysušena v sušárně při teplotě 110°C do ustálení hmotnosti a zvážena. Poté byla na vibrační zařízení umístěna soustava zkušebních sít, zobrazeno na Obr. 8, ve složení (4,0 - 2,0 - 1,0 - 0,5 - 0,25 - 0,125 - 0,063 - dno), přičemž velikost oka síta je udávána v milimetrech. Navážka byla vsypána na síta a po dobu 20 minut a nejvyšší intenzitě prosévána. Poté byl zachycený propad na každém síti zvážen a zapsán.



Obr. 8 - Sada zkušebních sít během prosévání

Vstupními hodnotami byla hmotnost vzorku na každém síti přepočtena na procenta z celkové hmotnosti a následně vypočítán procentuální propad daným sítem. Podkladem pro vytvoření křivky zrnitosti je soustava dvou os, přičemž vodorovná osa X je tvořena velikostí oka zkušebního síta v logaritmickém měřítku a svislá osa Y, která popisuje procentuální propad daným sítem. Vynesením a spojením jednotlivých bodů vznikla křivka zrnitosti.

## 5.1.2 Obsah jemných částic

Pro získání procentuálního zastoupení jemných částic byla využita část normy ČSN EN 933-1 [63], ovšem provedená byla současně s přípravou kameniva pro tvorbu křivky zrnitosti v podkapitole 5.1.1. Navážku bylo nutné vysušit v sušárně při 110°C do ustálení hmotnosti a následně zvážit. Poté byla pro lepší oddělení jemných částic od zrn kameniva ponechána 24 hod ve vodě a průběžně míchána. Pro samotné mechanické oddělení bylo využito vibračního zařízení se síty s velikostí ok 0,063, 1,0 a 2,0 mm. Přičemž před začátkem bylo nutné síto 0,063 mm navlhčit z obou stran. Následně bylo vibrační zařízení zapnuto a zkušební navážka vлита na zkušební síta, na která byla v průběhu prosévání přidávána voda, což je znázorněno na Obr. 9. Voda protékající přes síta byla odváděna a vizuálně kontrolována, přičemž odpadní voda po odplavení jemných částic musela být čistá. Následně bylo prosévání ukončeno a síta vložena do sušárny při teplotě 110°C do ustálení hmotnosti, poté byl vzorek připraven pro prosévání viz kapitola 5.1.1. Výstupem z prosévání byla hmotnost propadlých zrn na dně. Následně byl použit vzorec (3), do kterého bylo vše dosazeno a vypočteno procento jemných částic.



Obr. 9 - Průběh praní zkušební navážky

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

ve kterém:

- $f$       procento jemných částic [%],
- $M_1$      hmotnost suché zkušební navážky [kg],
- $M_2$      hmotnost suché zkušební navážky po praní [kg],
- $P$       hmotnost na dně po prosévání [kg].

### 5.1.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost různých druhů kameniv byla zkoušena na základě normy ČSN EN 1097-6 [64], ve které je stanoven postup pro drobné hutné kamenivo o velikosti zrna kameniva od 0 do 4 mm, pomocí pyknometrické metody. Pracovní postup pro získání objemové hmotnosti v tomto případě začínal odvážením zkušební navážky, která byla následně po dobu 24 hodin namočená ve vodě. Po uplynutí této doby bylo provedeno praní (viz. podkapitola 5.1.2), čímž byly odstraněny jemné částice, které by mohly negativně ovlivnit získané výsledky. Následně bylo kamenivo vysušeno v sušárně při 110 °C a přesypáno do připraveného a čistého pyknometru, do kterého byla následně přidána voda o teplotě  $22 \pm 3$  °C a třepáním odstraněn přebytečný vzduch a po dobu 24 hodin byl pyknometr s vodou ponechán v laboratoři (viz Obr. 10).



Obr. 10 - Pyknometr s kamenivem a vodou

Po nasáknutí byl pyknometr dolit vodou po rysku a zvážen. Následně byla většina vody z pyknometru vylita a kamenivo přemístěno na vysoušecí misky, na kterých bylo umístěno do sušárny, a při častém míchání a působení 40 °C zdroje tepla vysušeno do stavu povrchově osušeného (viz Obr. 11). Tento stav byl posuzován dle normou stanoveného rozpadu kameniva, které bylo umístěno do kuželové formy a zhutněno 25 pády hutnicího válce. V případě splnění tohoto stavu bylo kamenivo zváženo a vloženo na vysušení při teplotě 110 °C. Po ustálení hmotností bylo kamenivo znovu zváženo. V poslední řadě byla do prázdného pyknometru přidána voda o teplotě  $22 \pm 3$  °C, přičemž hladina dosahovala po rysku a takto vyplněný pyknometr byl zvážen. Výsledná objemová hmotnost zkoušeného kameniva byla stanovena jako zdánlivá viz (4), pro plně vysušené kamenivo podle (5) a pro povrchově osušené podle vzorce (6).



Obr. 11 - Předepsaný rozpad povrchově osušeného kameniva

$$\rho_a = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \times \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \times \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (6)$$

ve kterých:

$\rho_a$  objemová hmotnost zdánlivá pro zkoušené kamenivo [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_{rd}$  objemová hmotnost vysušeného kameniva [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_{ssd}$  objemová hmotnost povrchově osušeného kameniva [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_w$  objemová hmotnost vody při teplotě během zkoušky [ $\text{kg/m}^3$ ],

$M_1$  hmotnost povrchově osušeného kameniva [kg],

$M_2$  hmotnost pyknometru, kameniva a vody [kg],

$M_3$  hmotnost pyknometru s vodou [kg],

$M_4$  hmotnost vysušeného kameniva [kg].

### 5.1.4 Nasákavost

Zjišťování nasákavosti kameniva probíhalo souběžně se zkouškou objemové hmotnosti (viz podkapitola 5.1.3) a podle stejné normy ČSN EN 1097-6 [64]. Nasákavost kameniv byla stanovena na navážkách, které byly zbaveny jemných částic, a následně po dobu 24 hodin namočený ve vodě. Hmotnosti naměřené během předchozí zkoušky byly využity i v pro výpočet nasákavosti a pomocí vzorce (7) vypočítána nasákavost zkoušeného kameniva.

$$WA_{24} = \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \times 100 \quad (7)$$

ve kterém:

$WA_{24}$  nasákavost kamenivo po 24 hodinách [%],

$M_1$  hmotnost povrchově osušeného kameniva [kg],

$M_4$  hmotnost vysušeného kameniva [kg].



## 5.2 Čerstvý beton

### 5.2.1 Konzistence

Zkouška konzistence byla provedena pro každou vyrobenou směs ihned po namíchání podle normy ČSN EN 12350-2 [65]. Cílem této zkoušky bylo zatřídění čerstvé betonové směsi do skupiny podle normy ČSN EN 206+A2 [54], která popisuje velikosti poklesu pro jednotlivé skupiny znázorněné v Tab. 8. Pro zkoušku byl použit Abramsův kužel o výšce 300 mm, průměrem spodní základy 200 mm a horním 100 mm, podkladní deska, hutnicí tyč, zednická lžice a pravítko.

Tab. 8 – Zatřídění směsi podle sednutí kužele [54]

Skupina	Pokles [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

K míchačce byla umístěna podkladní deska, která byla společně se zkušební kuželovou formou navlhčena. Čerstvý beton z bubnu míchačky byl pomocí zednické lžice vložen do kuželové formy, přičemž každá 1/3 objemu formy byla zhutněna 25 vpichy hutnicí tyče. Současně bylo dbáno na propojení jednotlivých vrstev. Přebytečný beton z vrchu formy byl odstraněn pomocí zednické lžice, přičemž byla očištěna také podkladní deska. Poté byla zkušební forma zvednuta plynulým pohybem směrem nahoru. Po několika sekundách došlo k poklesu betonu a pomocí použité zkušební formy, která byla postavena do blízkosti zkoušeného betonu (viz. Obr. 12), změřen pokles oproti výšce formy a zařazena do skupiny podle Tab. 8.



Obr. 12 - Měření poklesu betonu

## 5.3 Ztvrdlý beton

### 5.3.1 Objemová hmotnost

Měření objemové hmotnosti zkušebních těles bylo provedeno na plně nasycených vzorcích podle normy ČSN EN 12390-7 [66] vždy před zkouškou pevnosti v tlaku, tzn. po 7 a 28 dnech od výroby. Zkušební vzorky bylo nutné po vyndání z nádrží s vodou povrchově osušit a změřit pomocí posuvného měřidla, přičemž délka s šířkou byly měřeny několikrát na každé podstavě a zprůměrovány. Výška vzorků byla měřena na každé straně a opět zprůměrována. Poté bylo těleso zváženo pro zjištění hmotnosti. Z naměřených rozměrů byl dopočtem celkový objem tělesa a následně veškeré známé hodnoty dosazeny do vzorce (8) pro výpočet objemové hmotnosti betonu.

$$D = \frac{m}{V} \quad (8)$$

ve kterém:

$D$  objemová hmotnost zkušebního tělesa plně nasyceného [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$m$  hmotnost plně nasyceného zkušebního tělesa [kg],

$V$  objem zkušebního tělesa [ $\text{m}^3$ ].

### 5.3.2 Nasákavost

Podkladem pro provedení této zkoušky byla norma ČSN EN 13369 [67], která byla pro tento účel částečně pozměněna vzhledem k menšímu počtu plnohodnotných vzorků předepsaných normou. Zkoušenými tělesy byly odřezky tvaru krychlí o velikosti  $50 \times 50 \times 50$  mm, které byly nařezány pomocí pily s diamantovým kotoučem, z betonových krychlí o proměnné výšce (poslední betonované zkušební těleso z každé směsi) a stáří 12 týdnů, viz Obr. 13.



Obr. 13 - Zkušební vzorky pro provedení zkoušky nasákavosti

Zkušební vzorky byly zbaveny prachu, nečistot a vloženy do sušárny, ve které byly vysoušeny při teplotě  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  až do ustálení hmotností. Následně byly vzorky ponořeny do nádoby s vodou o teplotě  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , přičemž výška hladiny nad vzorky byla min. 20 mm. Vzorky byly před každým vážením osušeny pomocí vlhké houby (povrchové osušení) až do ustálení jejich hmotností v řádu několika dnů. Výsledná nasákavost byla spočítána podle vzorce (9).

$$WA = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \quad (9)$$

ve kterém:

$WA$  nasákavost zkoušeného tělesa [%],

$M_1$  hmotnost vodou nasyceného tělesa [kg],

$M_2$  hmotnost vysušeného tělesa [kg].

### 5.3.3 Pórovitost

Vlastní pórovitost byla zkoušena na stejných tělesech, které byly zmíněny v kapitole 5.3.2. Tělesa bylo nutné změřit posuvným měřidlem a vypočítat jejich skutečný objem. Poté byla vložena do sušárny a ponechána při teplotě  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , dokud nebylo docíleno ustálení jejich hmotností. Následně byla ponořena do nádoby s vodou a ponechána v ní do maximálního nasycení při teplotě vody  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ . Do exsikátoru byl vložen podkladní rošt, na který byla zkušební tělesa položena, současně byla přidána voda o teplotě  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  (viz Obr. 14). Poté byl pomocí vývěvy z exsikátoru a zkušebních těles odveden pomocí podtlaku vzduch. Po uplynutí 1 hodiny byla zkušební tělesa vyjmuta, povrchově osušena pomocí vlhké houby a zvážena. Následně byly naměřené hodnoty dosazeny do vzorce (10) a vyhodnoceny.



Obr. 14 - Exsikátor se zkoušenými vzorky

$$P = \frac{(M_2 - M_1)}{\frac{\rho_v}{V}} \times 100 \quad (10)$$

ve kterém:

- $P$  pórovitost zkoušeného tělesa [%],
- $M_2$  hmotnost vodou nasyceného tělesa včetně pórů [kg],
- $M_1$  hmotnost vysušeného tělesa [kg],
- $\rho_v$  objemová hmotnost použité vody [kg/m<sup>3</sup>],
- $V$  objem zkušební tělesa [m<sup>3</sup>].

### 5.3.4 Pevnost v tlaku

Zkušební tělesa tvaru krychle 150 × 150 × 150 mm byla zkoušena podle normy ČSN EN 12390-3 [68] po 7 a 28 dnech od výroby. Pro provedení zkoušky byl použit zkušební lis s potřebným vybavením. Zkušební tělesa byla před samotnou zkouškou vyndána z nádob s vodou, povrchově osušena a změřeny jejich rozměry, neboť pro vyhodnocení zkoušky je nutné znát dosedací plochu lisu, která významně souvisí s výslednou pevností zkoušeného betonu. Poté byla tělesa jednotlivě vkládána hladkými stranami na dosedací plochu lisu a zatěžována konstantním nárůstem síly až do výsledného porušení (viz Obr. 15). Hodnota zatěžovací síly byla následně přepočtena na pevnost v tlaku podle vzorce (11).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (11)$$

ve kterém:

- $f_c$  pevnost v tlaku [MPa],
- $F$  síla v momentě porušení [N],
- $A_c$  zatěžovaná plocha [mm<sup>2</sup>].



Obr. 15 - Zkušební lis a porušená zkušební tělesa

## 6 Vstupní materiály a zkušební vzorky

Materiály využitě pro výrobu zkušebních těles v této práci jsou specifikovány v podkapitole 6.1, konkrétně se jedná o recyklovaná kameniva, přírodní kameniva a cement. Tyto vstupy byly následně využity při výrobě betonu podle výrobních receptur popsaných v podkapitole 6.2, ve které je popsán i pracovní postup během samotné výroby. Popis zkušebních těles a následné zacházení s nimi je blíže popsáno v podkapitolách 6.3 a 6.4.

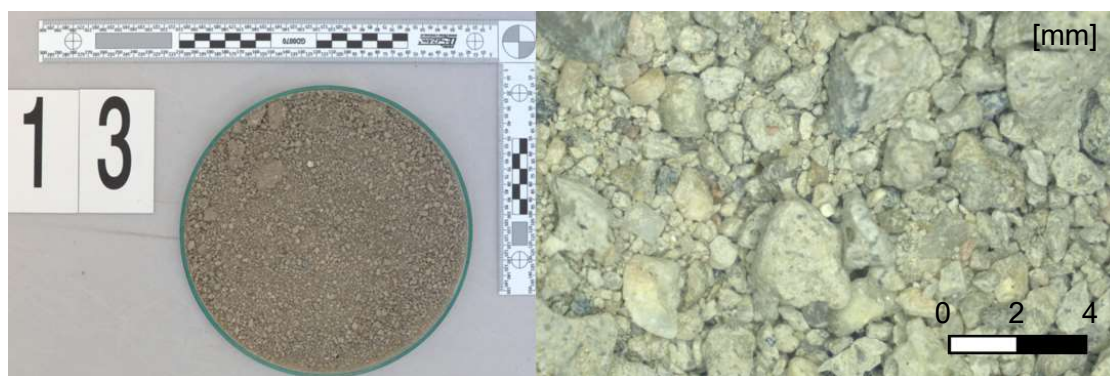
### 6.1 Popis materiálu

Při výrobě bylo využito několik druhů vstupních materiálů, jejichž popis vychází z informací, které byly dodány výrobcí, případně distributory. Z toho důvodu se jedná o obecné seznámení s těmito materiály, přičemž další vlastnosti některých těchto materiálů byly v souvislosti s touto výzkumnou prací dále zkoumány. Vstupními materiály pro výrobu betonu byly tyto:

#### Betonový recyklát

Tento druh recyklátu byl dodán společností Moravostav Brno, konkrétně z jejich recyklačního zázemí. Recyklovanému kamenivu předcházela svoz více druhů betonového odpadu, u kterého bylo dbáno na jeho čistotu z pohledu jiných znečištění. Následně byl podrcen pomocí čelistového drtiče a zbaven kovového odpadu.

Pro účely tohoto výzkumu byl využit recyklát o frakci 0 – 4 mm zobrazeného na Obr. 16, včetně jeho mikroskopické struktury zobrazující menší zastoupení větších zrn v porovnání s drobnějšími. Dále bylo prokázáno jeho krystalické složení, podle kterého tento recyklát obsahoval 57 % křemenu, 16 % albitu, 13 % orthoklasu, 3 % kalcitu a zbytek zastoupen dalšími minerály.

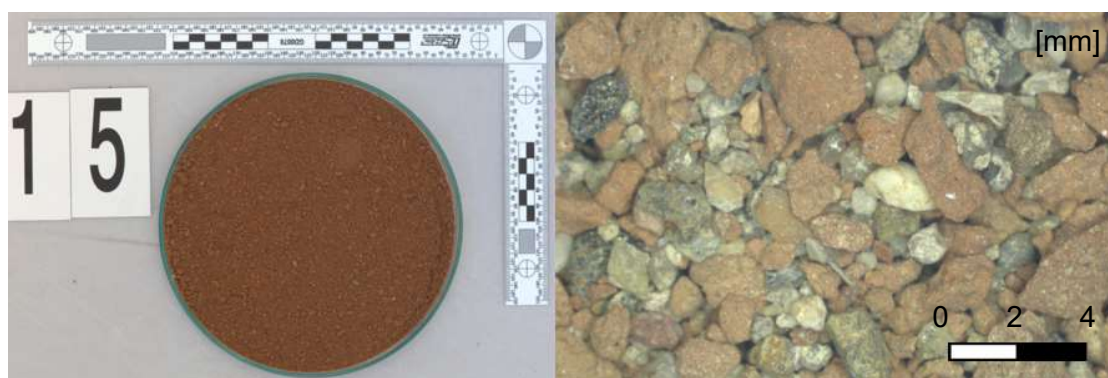


Obr. 16 - Drobné betonové recyklované kamenivo

### Cihelný recyklát

Společnost Moravostav dodala cihelný recyklát, jenž se skládal primárně z čisté cihelné suti, která byla získána během ruční demolice. Tato suť byla doplněna o cihelný odpad s maximálním 10% zastoupením omítkových směsí. Poté byl tento získaný odpad rozdrčen čelistovým drtičem.

Využitý cihelný recyklát byl tvořen zrny o velikosti 0 – 4 mm, přičemž se jednalo o velice jemný materiál s vysokým podílem jemných částic. Recyklát v petriho misce společně se snímkem z mikroskopu je zobrazen níže na Obr. 17, přičemž při pohledu na mikroskopickou strukturu bylo největší zastoupení zrn o velikosti 1 mm. Z pohledu zastoupení minerálů bylo dominantní zastoupení křemene s 50 %, následováno 16 % albitu, 10 % orthoklasu a muscovitu.

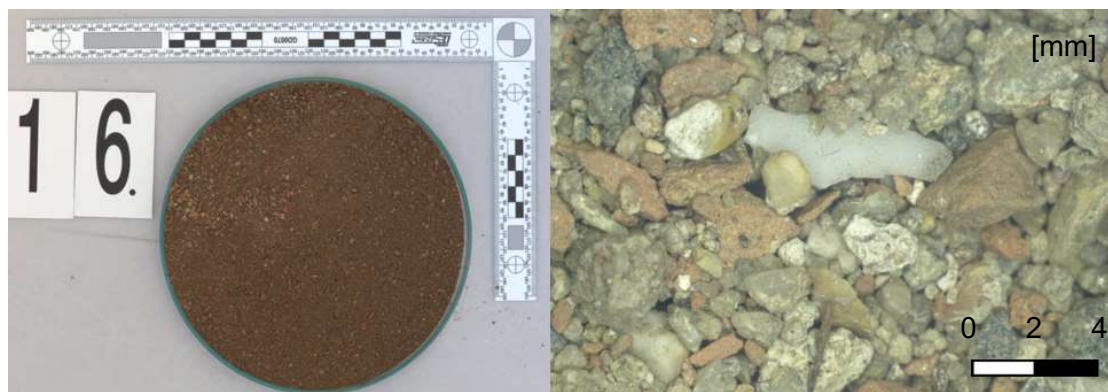


Obr. 17 - Drobné cihelné recyklované kamenivo

### Směsný recyklát

Tento druh recyklátu byl pro účely zkoušek dodán společností Moravostav. Jednalo se o směs betonového, cihelného a keramického odpadu, společně se zbytky dřeva, kovu a zemin. Pro drcení byl použit čelistový drtič RESTA.

Recyklát byl podrcen na velikost zrna 0 – 4 mm. Jeho vzhled je zobrazen na Obr. 18 společně se snímkem z mikroskopu, na kterém je možné pozorovat různé druhy zrn podle barevnosti, přičemž místy se nachází malé kousky dřevin a skla. Recyklát je tvořen z 55 % křemenem, 16 % albitem a 11 % orthoklasem.



Obr. 18 - Drobné směsné recyklované kamenivo

## Portlandský cement

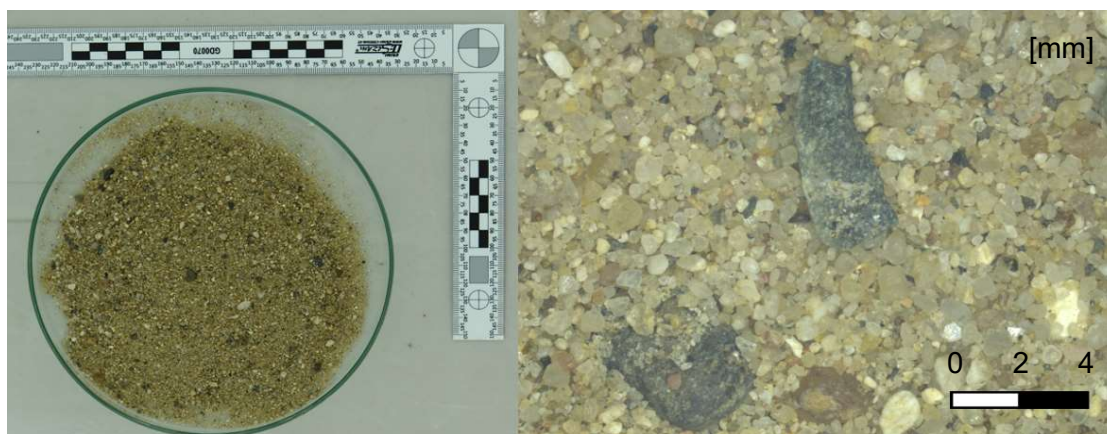
Pro výrobu betonu byl jako pojivo použit pytlovaný portlandský cement s označením CEM I 42,5 R dodaného společností Českomoravský cement ze závodu Mokrý. Pevnost tohoto cementu a jeho fyzikální vlastnosti jsou popsány v Tab. 9.

Tab. 9 - Mechanické a fyzikální vlastnosti [69]

Parametr		Průměrné dosahované hodnoty	Metoda
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16,2	EN 196-1
	2 dny	30,3	EN 196-1
	7 dní	50,3	EN 196-1
	28 dní	59,5	EN 196-1
	56 dní	65,6	EN 196-1
	90 dní	67,8	EN 196-1
Normální konzistence [%]	27,2	EN 196-3	
Počátek tuhnutí [min]	211	EN 196-3	
Konec tuhnutí [min]	276	EN 196-3	
Objemová stálost [mm]	0,7	EN 196-3 Le Chatelier	
Měrný povrch [m <sup>2</sup> ×kg <sup>-1</sup> ]	410	EN 196-6 Blaine	
Měrná hmotnost [kg×m <sup>3</sup> ]	3130	EN 196-6	

## Přírodní drobné kamenivo

Referenční drobné kamenivo s velikostí zrna od 0 do 4 mm (Obr. 19) bylo dodáno společností Cemex, konkrétně ze štěrkovny Dobříň nacházející se v Ústeckém kraji. Toto kamenivo bylo delší dobu uskladněno v zásobnících určených pro kamenivo na Fakultě stavební ČVUT a v současné době štěrkovna Dobříň nedodává tento druh kameniva z důvodu ukončení těžby [70].



Obr. 19 - Drobné přírodní kamenivo

## Přírodní hrubé kamenivo

Použité hrubé kamenivo bylo dodáno z kamenolomu Zbraslav a uloženo v zásobnících znovu na Fakultě stavební ČVUT, ze kterých bylo následně použito při samotné výrobě betonu. Konkrétně byla použita dvojice frakcí, přičemž první byla o velikost od 4 do 8 mm a druhá zmíněná s velikostí zrn od 8 do 16 mm.

## 6.2 Navržená betonová směs a výroba

Pro výrobu bylo využito navržených směsí (Tab. 10), které měly být použity pro zjištění vlivu na výsledný beton při 33, 66 a 100% hmotnostního nahrazení přírodního drobného kameniva. Pro samotné nahrazení byly využity recykláty zmíněné v podkapitole 6.1, konkrétně betonový, cihelný a směsný. Jako kontrolní směs byla vyžita 0% náhrada pojmenována jako referenční (REF). Navržená směs s betonovým recyklátem byla označena jako R1, se směsný R2 a cihelný jako R3. Vodní součinitel u referenčního betonu byl stanoven na 0,55 a pro další směsi byla přidávána voda navíc pro dosažení shodné zpracovatelnosti podle postupu v podkapitole 5.2.1.

Tab. 10 - Popis materiálu na výrobu 1m<sup>3</sup> betonu

[kg/m <sup>3</sup> ]	REF	R1_33 R2_33 R3_33	R1_66 R2_66 R3_66	R1_100 R2_100 R3_100
<b>Cement [kg]</b>	300	300	300	300
<b>Písek 0/4 [kg]</b>	700	466	233	0
<b>Kamenivo 4/8 [kg]</b>	538	538	538	538
<b>Kamenivo 8/16 [kg]</b>	601	601	601	601
<b>Recykláty</b>	0	233	466	700
<b>Voda [kg]</b>	165	165 167 163	165 167 163	165 183 163

Před samotnou betonáží bylo nutné odvážit cement, písek, hrubá kameniva, vodu a recyklát, přičemž navážky byly vždy vkládány do samostatných plastových kbelíků. Buben míchačky bylo nutné před prvním použitím částečně navlhčit pomocí mokré houby. Následně byly vloženy sypké navážky a po dobu 60 sekund proběhlo promíchání vsypaného materiálu. Po promíchání sypkých složek byla do míchané směsi přidána postupně voda a míchání pokračovalo dalších 60 sekund. Poté byla míchačka vypnuta a přilepený cement s kamenivem pomocí zednické lžice odstraněn z bubnu míchačky. Následně byla míchačka opět zapnuta na 60 sekund a proběhlo finální domíchání betonu, které bylo po tomto čase zastaveno a lopatky míchačky důkladně očištěny od přilepených zbytků betonu za pomoci zednické lžice.





Obr. 20 - Výroba betonu v míchačce

Po domíchání byl beton vkládán do forem, které byly předem opatřeny odfomovacím nátěrem a následně rozděleny podle druhu vyráběné směsi a zakryty nepropustnou fólií (viz Obr. 21), aby bylo zabráněno nadbytečnému výparu vody z betonových zkušebních těles.



Obr. 21 - Plastové formy s betonem během tuhnutí

### 6.3 Zkušební vzorky

Pro účely zkoušek byla použita zkušební tělesa tvaru krychle o velikosti 150 × 150 × 150 mm, která byla po 24 hodinách po betonáži vyndána z plastových forem pomocí hadice se stlačeným vzduchem, který byl do formy foukán malým otvorem ve spodní části formy. Již odbedněná a vyskládaná zkušební tělesa lze vidět na Obr. 22.



Obr. 22 - Zkušební krychlová tělesa krátce po odbednění

### 6.4 Skladování

Zkušební vzorky byly po odbednění skladovány v nádržích s vodou (viz Obr. 23), ve kterých byl zajištěn přístup vody k těmto tělesům ze všech stran. Voda v nádržích dosahovala vždy minimálně 50 mm nad horní okraj posledního zkušebního tělesa a v průběhu zrání byla doplňována.



Obr. 23 - Uskladnění betonových zkušebních těles

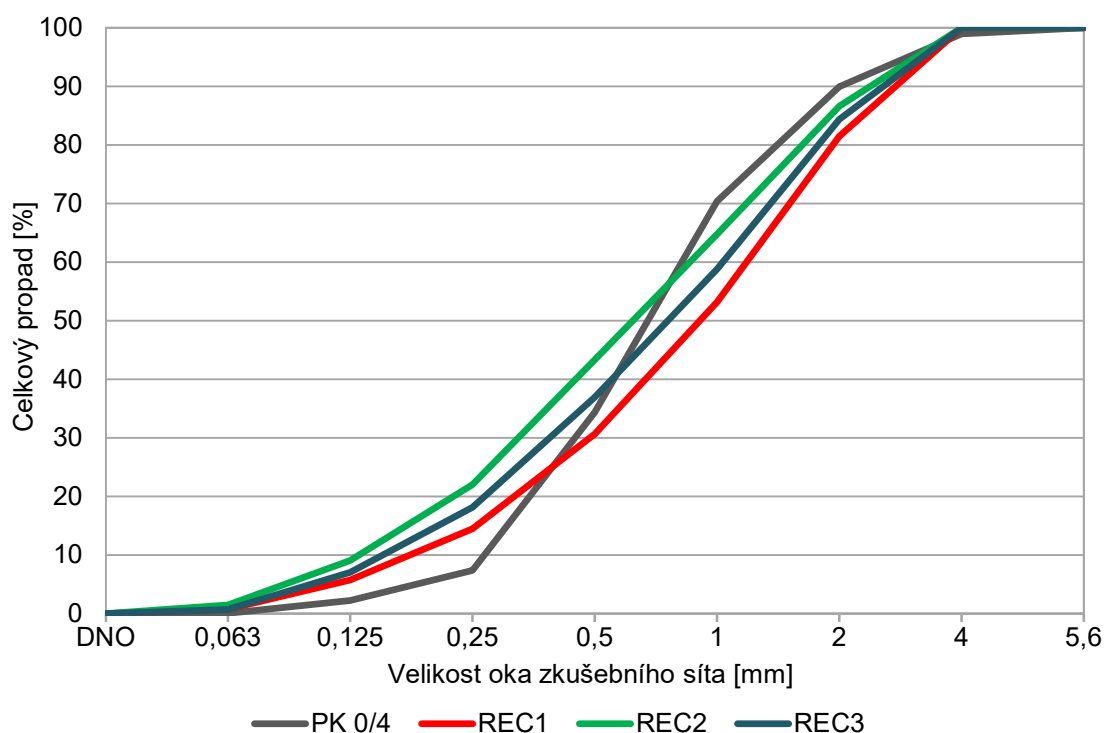
## 7 Výsledky a diskuze

### 7.1 Drobné kamenivo

Nejdůležitějšími kamenivy této výzkumné práce z pohledu vlastností byly recykláty s velikostí zrn od 0 do 4 mm, konkrétně betonový (REC1), směsný (REC2) a cihelný (REC3) doplněný o přírodní písek (PK 0/4) o stejné frakci. Kromě těchto kameniv byly zjišťovány vlastnosti u hrubého přírodního kameniva, ovšem jen při některých zkouškách. Konkrétně se jednalo o kameniva s velikostí zrn od 4 do 8 mm (PK 4/8) a od 8 do 16 mm (PK 8/16).

#### 7.1.1 Křivka zrnitosti

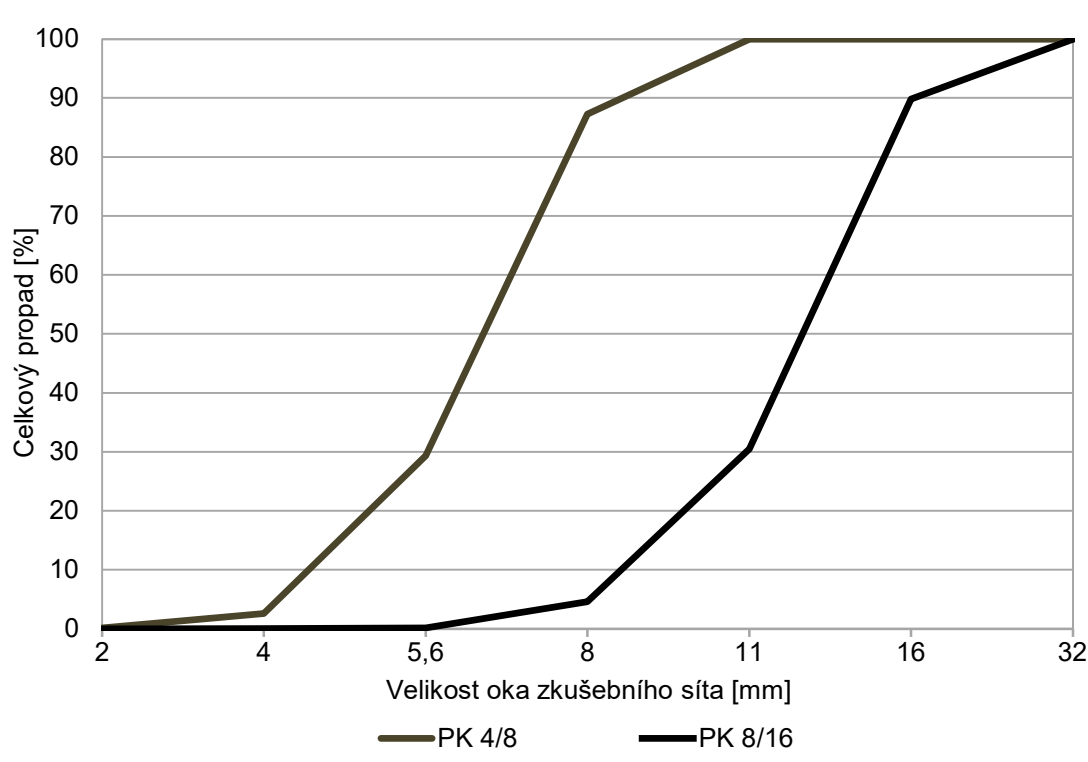
Pro výše uvedené druhy kameniv o neznámém granulometrickém složení bylo nutné stanovit jejich křivku zrnitosti podle postupu stanoveném v podkapitole 5.1.1. Výsledky jednotlivých měření pro drobné kamenivo jsou zobrazeny v jednotném grafu označeném jako Obr. 24. Pro přehlednost byly výsledky pro hrubá kameniva shrnuty na jiném grafu, konkrétně na Obr. 25.



Obr. 24 - Křivky zrnitosti pro drobná kameniva

Na grafu zobrazeném na Obr. 24 lze pozorovat u PK 0/4 nižší zastoupení drobnějších částic (0,063 – 0,25 mm), což může být způsobeno následným tříděním, které probíhá během těžby. V případě REC1 je zastoupení jednotlivých frakcí rovnoměrně rozprostřeno v celém předepsaném spektru. Množství menších částic

je mírně vyšší oproti PK 0/4, což může být způsobeno rozpadem cementové matrice během procesu drcení. Při pohledu na REC2 je poměr mezi většími zrny (0,25 – 2 mm) velmi podobný, ovšem z grafu je vidět výrazně vysoké zastoupení drobnějších zrn, které může mít spojitost s obsahem jemných částic (< 0,063 mm). U REC3 je z průběhu křivky patrný velmi podobné zastoupení větších zrn jako u REC2. V případě drobných částic jsou propady překvapivě nižší oproti REC2. Při výsledném pohledu pouze na recyklovaná kameniva lze pozorovat průběhy křivek kopírující shodný trend, avšak propady se v některých případech liší až v řádech desítek procent.

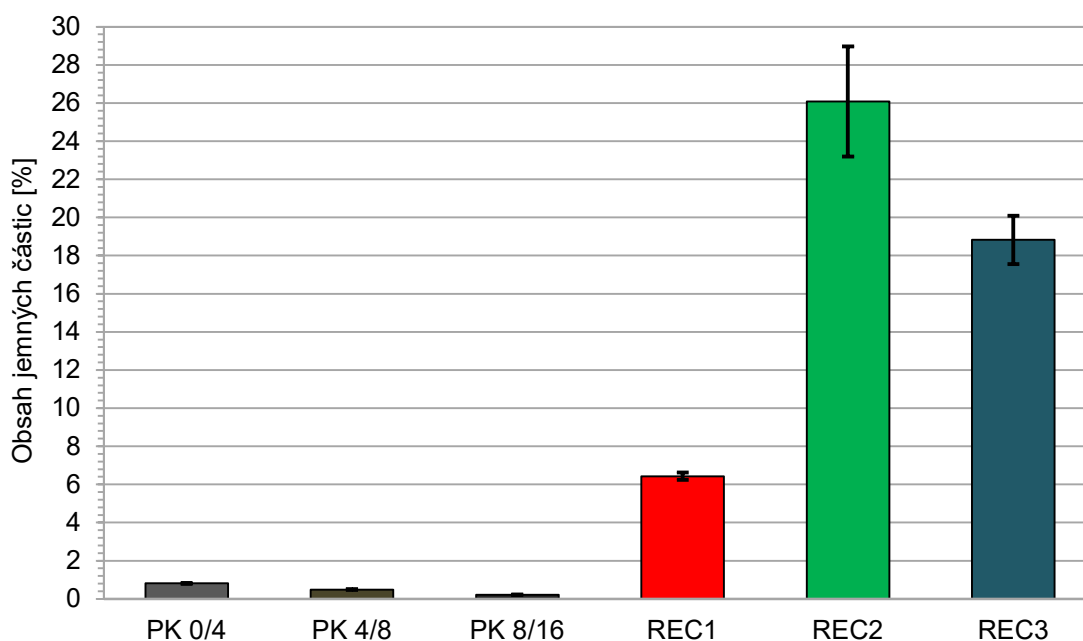


Obr. 25 - Křivka zrnitosti pro hrubá kameniva

Na Obr. 25 lze pozorovat u PK 4/8 vysoké zastoupení zrn zachycených na síti o velikosti oka 5,6 mm, přičemž poměrově tato zrna ku celkové hmotnosti tvoří majoritní zastoupení. Po přičtení zrn zachycených na síti 4 mm se dá tato frakce považovat za plně převládající a plně odpovídá předepsané frakci 4/8 mm. Průběh křivky zrnitosti u PK 8/16 z pohledu celkových propadů na klíčových sítích (vymezeno výrobcem kameniva) odpovídá propadům u PK 4/8, až na malé odchylky. Vyšší propady sítím 16 mm lze přisuzovat kvalitnějšímu procesu třídění během výroby PK 8/16. Pro obě zkoušená hrubá kameniva však nadsítné a podsítné netvoří převládající množství, a tudíž je můžeme považovat za velice kvalitní kameniva z pohledu obsahu předepsaných velikostí zrn.

## 7.1.2 Obsah jemných částic

Vzhledem k původu recyklovaného kameniva bylo předpokládáno vysoké zastoupení jemných částic (< 0,063 mm), které jsou mnohdy v betonu nežádoucí. Z toho důvodu byla provedena zkouška pro stanovení procentuálního podílu těchto částic (podkapitola 5.1.2) u recyklátů a současně pro porovnání také u přírodních kameniv, u kterých bylo předpokládáno toto znečištění minimální. Výstupní hodnoty z provedené zkoušky byly následně zpracovány do sloupcového grafu (viz Obr. 26).

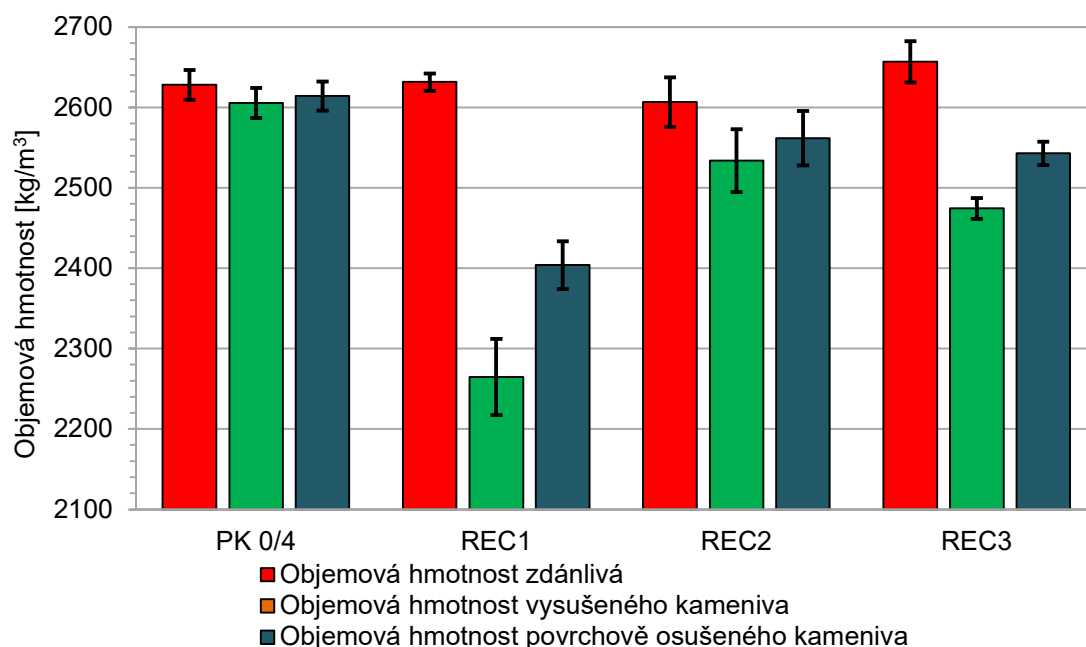


Obr. 26 - Obsah jemných částic u různých druhů kameniva

Na grafu (viz Obr. 26) lze pozorovat u PK 4/8 a PK 8/16 dosažení znečištění jemnými částicemi v řádu desetin procent, avšak tyto hodnoty byly vzhledem k jeho původu očekávány. Kamenivo označené PK 0/4 vykazovalo toto znečištění v podobném rozmezí a nemá výrazný vliv na vyráběný beton. Samotné recykláty již obsahují podstatně vyšší zastoupení jemných částic oproti přírodnímu kamenivu. Při posouzení REC1 bylo odhadnuto nižší zastoupení těchto částic již ze samotné křivky zrnitosti pro daný materiál. Mírně vyšší obsah jemných částic byl zjištěn v článku od Gómez-Soberón [44] zabývající se jiným betonovým recyklátem. Nadměrně vysoké znečištění obsahoval REC2, přičemž důvodem mohlo být dodání velmi znečištěného odpadu (konkrétně zrna zeminy a snadno drtitelný a rozpadavý odpad), ze kterého byl tento recyklát vyroben. Křivka zrnitosti vyšší obsah drobnějších zrn potvrzuje. Taimí Castaño-Cardoza [51] zjistil pro směsný recyklát nižší zastoupení jemných částic, ovšem velmi záleží na druhu dodaného recyklátu. U REC3 bylo výsledné znečištění taktéž odhadnuto správně, a to nižší než u REC2, avšak výzkum vedený Ali A. Aliabdo [49] zjistil procentuální znečištění výrazně nižší, a to pouhých 5,9 % pro cihelný recyklát oproti námi zjištěnému obsahu jemných částic 18,8 %.

### 7.1.3 Objemová hmotnost

Pro drobná kameniva bylo nutné stanovit jejich objemové hmotnosti, které jsou popsány včetně postupu zkoušky v podkapitole 5.1.3, avšak předepsaný normový postup je určen pouze pro přírodní kamenivo do betonu, tudíž pro recyklovaná kameniva byl tento postup zkoušen pro porovnání výsledných hodnot, které byly následně vypočteny a vyneseny do grafu na Obr. 27.

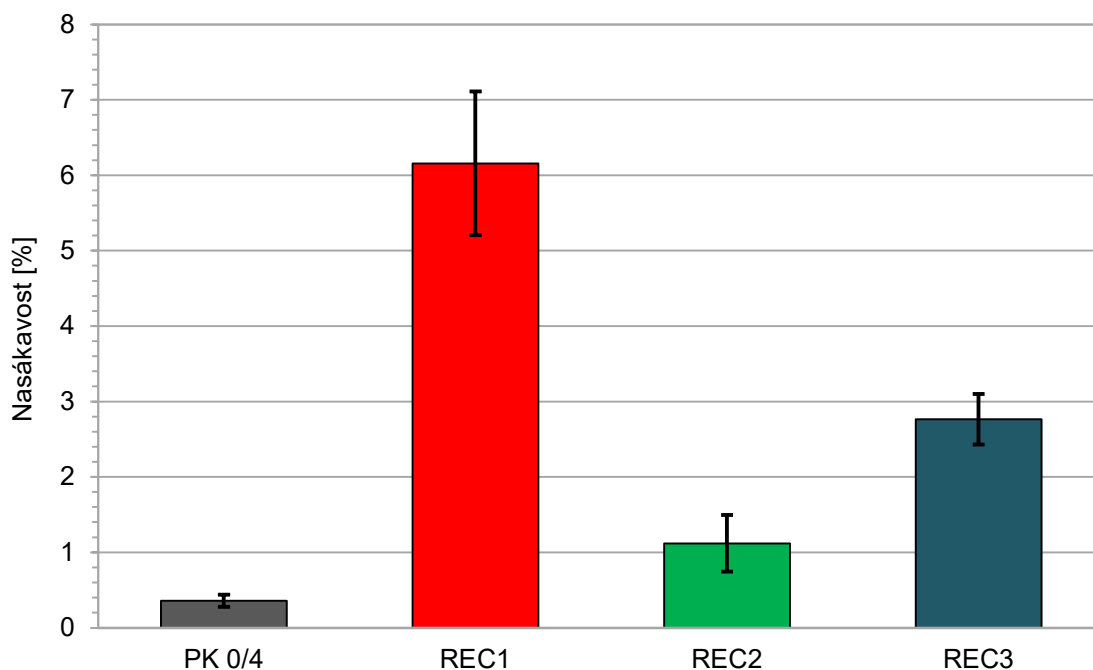


Obr. 27 - Porovnání různých objemových hmotností drobných kameniv

Na grafu lze pozorovat několik objemových hmotností pro různá kameniva. Jako nejpřesnější a pro účely porovnání bylo využito objemové hmotnosti zdánlivé, neboť pro její zjištění není nutné zjišťovat hmotnost povrchově osušených zrn, která je u některých recyklovaných drobných kameniv nezjistitelná, což může být způsobeno vysokým obsahem drobnějších částic (0,063 – 0,25 mm) a vysokou předpokládanou nasákavostí (REC2 a REC3). Konkrétně jsou zrna během vysoušení stále vlhká a při jejich zhutnění podle příslušné zkoušky nedochází k požadovanému rozpadu. Pro PK 0/4 bylo docíleno velmi přesných výsledků, které potvrzují například Khatib [41] a Gómez-Soberón [44]. V případě REC1 byla zkouška průkazná, ačkoliv se jedná o recyklát. Na grafu lze vidět výrazný pokles objemových hmotností oproti PK 0/4, avšak výsledky potvrzuje např. Cheng-Chih Fan [46]. Zjištěné výsledné hodnoty objemových hmotností pro REC2 a REC3 byly při porovnání s články od Khatib [41], Atyia [48] a Chen [50] zcela vyvráceny. Z toho důvodu směsný a cihelný recyklát není pro daný typ zkoušky vhodný a objemová hmotnost u těchto recyklátů musí být zkoušena jiným způsobem. Například na základě nasákavosti vyšších frakcí dopočítat povrchově osušený stav, ze kterého by byly výsledné hodnoty objemových hmotností stanoveny.

## 7.1.4 Nasákavost

Pro použitá drobná kameniva bylo v souvislosti s jejich využitím pro betony nutné stanovit jejich nasákavost, přičemž postup zkoušení byl popsán v podkapitole 5.1.4. Samotná zkouška je určena opět pouze pro přírodní kamenivo do betonu, avšak pro porovnání byla provedena i na kamenivu recyklovaném. Zkouška nasákavosti probíhala současně se zkouškou objemové hmotnosti a její výsledky byly zaneseny do grafu (viz Obr. 28).



Obr. 28 - Nasákavost drobných kameniv

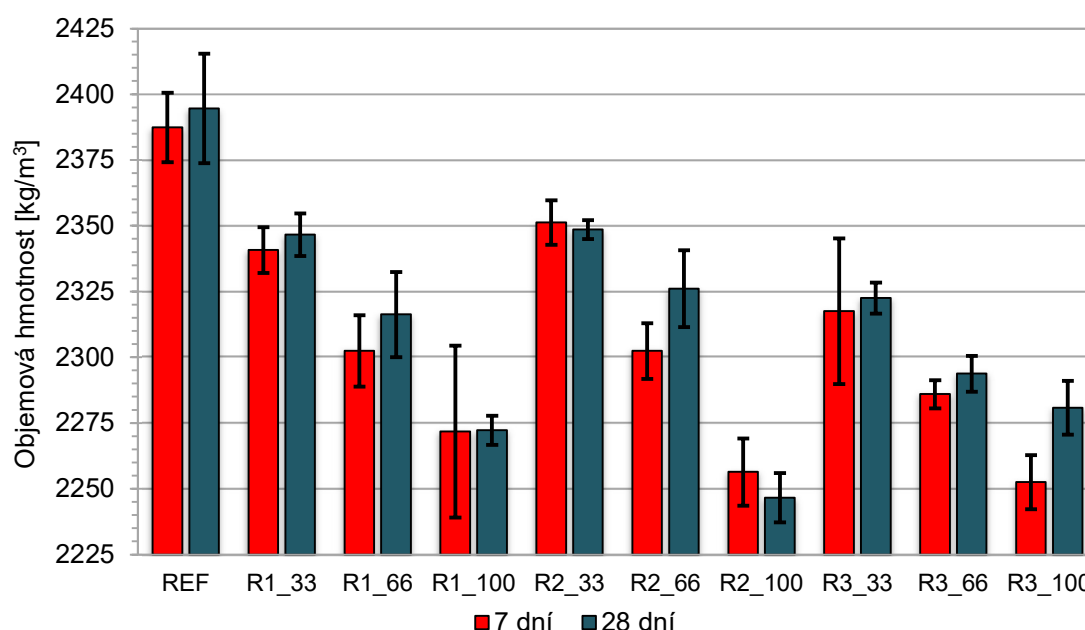
Na grafu (Obr. 28) lze pozorovat výsledné nasákavosti u použitých drobných kameniv. Při porovnání PK 0/4 a REC1 je vidět vysoký nárůst nasákavosti, což je způsobeno vyšší pórovitostí REC1, kterou lze pozorovat na rozdílných objemových hmotnostech daných kameniv v suchém stavu (Obr. 27), přičemž vlastní nasákavost betonových recyklátů potvrzují např. Gómez-Soberón [44] a Cheng-Chih Fan [46]. V případě REC2 a REC3 nebylo dosaženo hmotností povrchově osušeného kameniva, a tudíž výsledky ze sloupcového grafu u těchto dvou recyklátů nelze považovat za určující. Případné řešení tohoto problému je zmíněno v odstavci komentujícím výsledky pro objemovou hmotnost kameniva (podkapitola 7.1.3). U REC2 by se výsledná nasákavost měla pohybovat na hranici kolem 10 %, přičemž tuto hodnotu potvrzuje i How-Ji Chen [50] ve svém článku. U REC3 tvořeného primárně cihelným odpadem a prachem se dá nasákavost očekávat výrazně vyšší než u dříve zmíněných recyklátů, např. výzkumy provedené Debieb [47] a Aliabdo [49] se shodují na 14 – 17% nasákavosti.

## 7.2 Ztvrdlý beton

Pro vyrobená zkušební tělesa, jejichž složení bylo popsáno v podkapitole 6.2, bylo nutné stanovit jejich fyzikální a mechanické vlastnosti v závislosti na jejich hmotnostní náhradě přírodního drobného kameniva.

### 7.2.1 Objemová hmotnost

Jednou z nejnáze zjistitelných vlastností byla objemová hmotnost, která byla stanovena podle postupu v podkapitole 5.3.1. Zkušební tělesa byla měřena po 7 a 28 dnech ve stavu plného nasycení a výsledné hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 29.



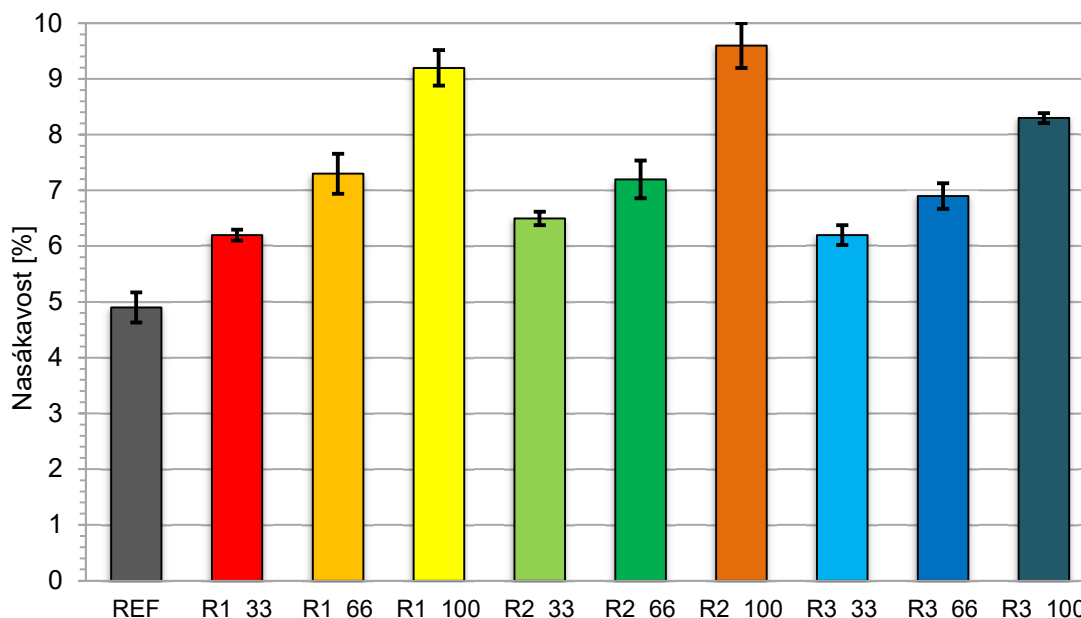
Obr. 29 - Srovnání objemových hmotností vyrobených betonů

Graf znázorňující objemové hmotnosti betonových těles představuje u směsi R1 v porovnání s REF snižující se objemovou hmotnost s narůstajícím procentem náhrady, přičemž úbytek hmotnosti je tvořen lineární závislostí, kterou ve své práci popisuje Cheng-Chih Fan [46]. Podobných objemových hmotností bylo dosaženo u směsí R2\_33 a R2\_66, které vykazují téměř identické výsledky, což může ukazovat na vyšší nasákavost těchto vzorků, neboť vykazují vyšší pórovitost (Obr. 31). V případě směsí R3 dochází k výraznému úbytku objemové hmotnosti již při 33% nahrazení, přičemž s rostoucí náhradou dochází k jejímu lineárnímu poklesu, což potvrzují Debieb [47] a Khatib [41]. Lze pozorovat, že výsledné objemové hmotnosti po 28 dnech jsou shodné, případně vyšší než měření provedená po 7 dnech, současně u směsi REF je dosaženo nejnižší pórovitosti, což se projevuje na vysoké objemové hmotnosti tohoto betonu. V některých měřeních došlo k výraznému rozptýlu hodnot ztvrdlého betonu, což mohlo být způsobeno špatným otřením vzorku během vážení od povrchové vody, konkrétně lze tuto anomálii vidět u R1\_100 a R3\_33.



## 7.2.2 Nasákavost

U navržených betonů bylo nutné stanovit jejich nasákavost, neboť množství vody, které je do svých otevřených pórů beton schopný nasáknout, přímo ovlivňuje jeho prostředí použití a životnost. Postup zkoušky je popsán v podkapitole 5.3.2 a výsledná nasákavost je popsána pomocí sloupcového grafu (viz Obr. 30).

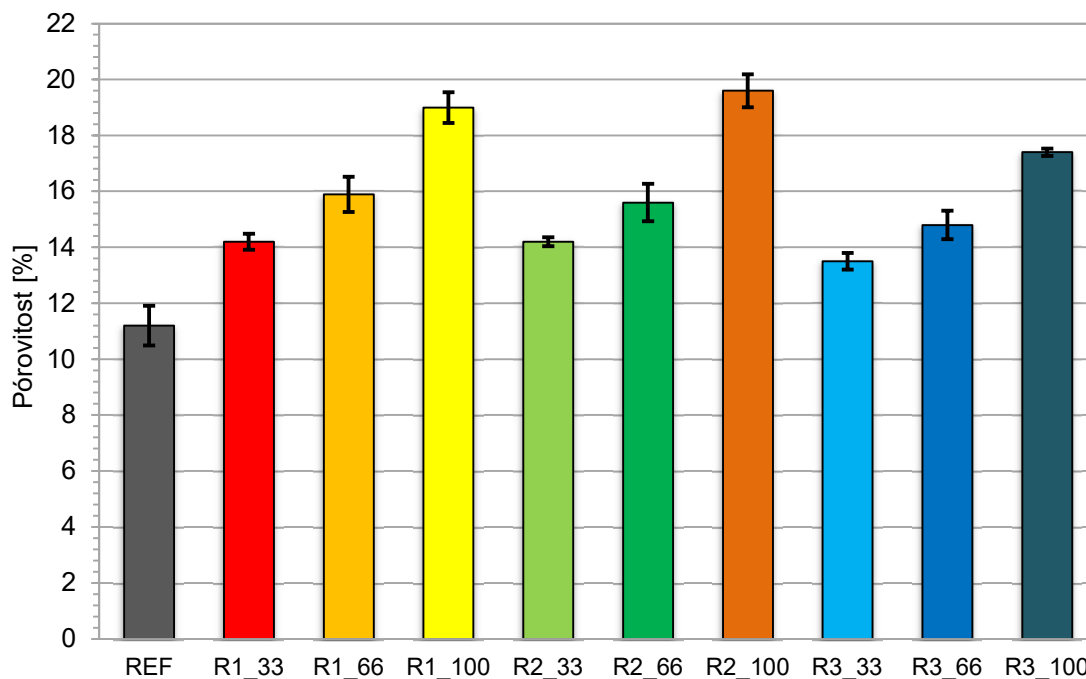


Obr. 30 - Nasákavost betonových těles

Na Obr. 30 byla zjištěna nejnižší nasákavost u betonu s užitím recyklované náhrady 33 %, konkrétně R1, která má spojitost s vysokou objemovou hmotností (Obr. 29) a současně nejnižší pórovitostí (Obr. 31). Pro betonový recyklát platí, že nasákavost betonu stoupá s rostoucím množstvím náhrady, přičemž při 100% nahrazení je nasákavost přibližně o 50 % vyšší než u referenčních betonů, což potvrzuje článek od L. Evangelista [42]. Nejhůře dopadly vzorky R2, které v porovnání s ostatními vykazují maximální nasákavost, což může být způsobeno vlastnostmi použitého recyklátu (vysoký obsah jemných částic), přičemž extrémní nárůst nasákavosti je pozorován u 100% náhrady. Taimí Castaño-Cardoza [51] se ve svém článku zmiňuje, že obsah jemných částic v řádu několika procent u směsného recyklovaného kameniva má výrazný vliv na snížení nasákavosti, což provedená zkouška nepotvrzuje. U vzorků označených jako R3 byla nasákavost s různými procentuálními náhradami dokonce nejnižší v porovnání s použitými recykláty. Trend u těchto betonů je lineárně rostoucí v závislosti na zvyšující se náhradě cihelného recyklátu, což potvrzuje Juntao Dang [62]. Obecně se dá z trendu usuzovat, že s rostoucími náhradami roste také nasákavost výsledného betonu, přičemž rozhodujícími faktory jsou použité recyklované kamenivo, případně zhutnění betonu, které je spojeno s objemovou hmotností betonu a jeho pórovitostí.

### 7.2.3 Pórovitost

Jelikož nasákavost betonu je závislá přímo na pórovitosti bylo nutno provést zkoušku popsanou v podkapitole 5.3.3, která měla potvrdit a případně provázat výsledky dosažené při zkoušce nasákavosti betonových zkušebních těles. Výsledné hodnoty pórovitosti v procentech byly zaneseny do grafu, který je zobrazen na Obr. 31.

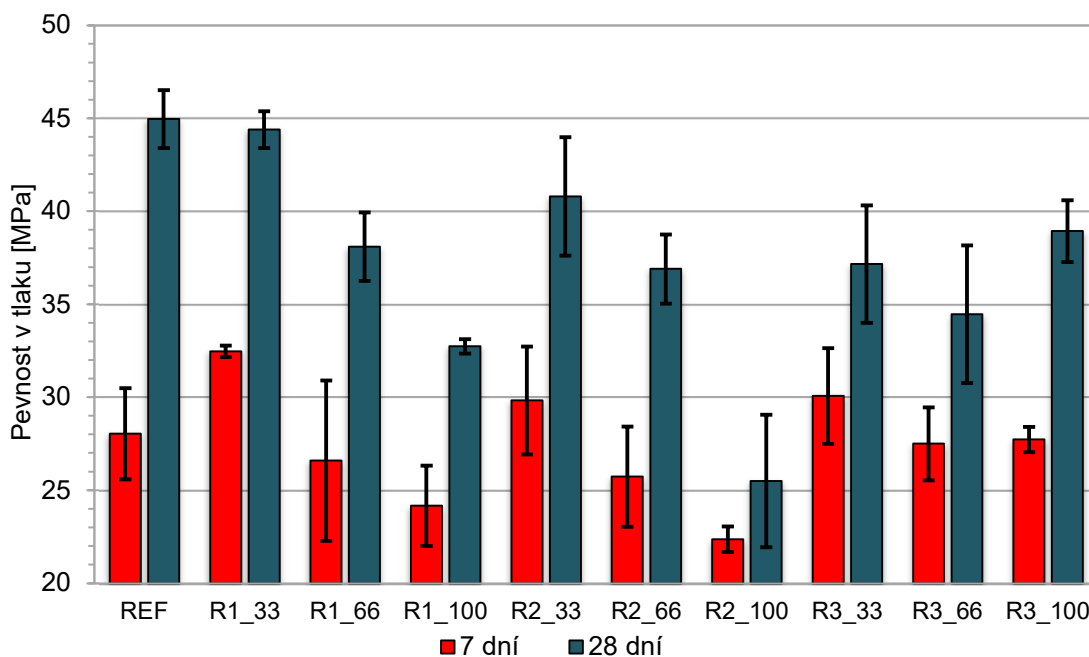


Obr. 31 - Pórovitost betonových těles

Samotná pórovitost (Obr. 31) u vyrobených betonových těles je přibližně dvojnásobkem jejich nasákavosti (Obr. 30), což neplatí u betonu označeného jako REF. Beton označený jako R1 vykazuje při náhradě 33 % zvýšení pórovitosti, které lineárně pokračuje až do 100% nahrazení. Toto tvrzení potvrzuje také L. Evangelista [42]. Při posouzení R2 dochází při nejnižší náhradě ke shodné pórovitosti jako u R1, případně R3. Vzhledem k množství zjištěných jemných částic ve směsném recyklátu byla očekávána nižší hodnota pórovitosti, neboť bylo předpokládáno lepší vyplnění mezer v betonu, které mohlo mít také vliv na zvýšenou objemovou hmotnost tohoto betonu. Shodného názoru byl i Taimí Castaño-Cardoza [51], avšak pro tento druh betonu a směsného recyklátu není z uvedených výsledků možno tento názor potvrdit. U betonu R3 s využitím cihelného recyklátu byla pórovitost nejnižší z výše uvedených betonů, čemuž nasvědčují i výsledky nasákavosti (Obr. 30). Lze tvrdit, že rozdíl v pórovitosti při 33 a 66% nahrazení není výrazný, což je překvapivé vzhledem k celkově nízké objemové hmotnosti tohoto betonu, přičemž shodné vlastnosti potvrzuje i článek Debieb [47]. Obecně se pórovitost zvyšuje v závislosti na snižující se objemovou hmotností vodou nasyceného betonu, která má taktéž spojitost s použitým druhem kameniva.

## 7.2.4 Pevnost v tlaku

Pro betonová zkušební tělesa byla jako závěrečná destruktivní metoda provedena tlaková zatěžovací zkouška v 7 a 28 dnech, která je popsána v podkapitole 5.3.4, včetně vzorce, podle kterého byly dopočítány výsledné pevnosti betonu v tlaku. Tyto výsledky včetně směrodatných odchylek pro každý navržený beton jsou vloženy do grafu (viz Obr. 32).



Obr. 32 - Pevnost v tlaku betonových těles

Referenční beton označen jako REF překvapivě po 7 dnech vykazoval nižší pevnost v tlaku oproti betonům s 33% náhradou, avšak po 28 dnech již překonával pevnosti těchto náhrad, tudíž mohly tyto vzorky obsahovat trhliny, které výslednou pevnost snižovaly. U betonu R1 je možné pozorovat lineárně klesající trend, který je vidět pro oba termíny zkoušek, přičemž po 28 dnech se dá považovat náhrada 33 % jako vhodná pro budoucí využití betonového recyklátu. Podobných výsledků docílil také Sivamani [60], ovšem v jeho případě se jednalo o 25% náhradu. Při nižší objemové hmotnosti betonu R1 dokáže v delším časovém horizontu odolávat podobnému tlaku, jako beton REF. V případě R2 je pevnost betonu znovu klesajícího charakteru při rostoucích náhradách až v řádu vyšších jednotek procent, avšak objemová hmotnost tohoto betonu blízké kopíruje R1. Beton s využitím cihelného recyklátu R3 se vyznačuje nejhoršími pevnostmi, které klesají s rostoucí náhradou, přičemž nižší hodnoty jsou způsobeny také nízkou objemovou hmotností těchto betonů. Podobné výsledky byly zjištěny také Khatib [41]. V případě vzorků sady R3 mohou být výsledné pevnosti ovlivněny přírůstkem jemných částic (zvýšení pevnosti) na úkor objemové hmotnosti (snížení pevnosti), tudíž jsou pevnosti u R3 různých procentuálních náhrad podobné.

## 8 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala zjišťováním základních fyzikálních a granulometrických vlastností drobného recyklovaného kameniva, které bylo následně využito jako 33, 66 a 100% náhrada přírodního drobného kameniva v betonu a zjišťován vliv těchto náhrad na jeho vlastnosti. Součástí byl také návrh směsí potřebných pro výrobu zkušebních těles a popis experimentálních metod, podle kterých byly zkoušky v této práci prováděny.

Pro drobné betonové recyklované kamenivo bylo dosaženo závěru, podle kterého lze tento druh kameniva zkoušet podle normy ČSN EN 1097-6 s dosažením velmi přesných výsledků. V případě směsného a cihelného drobného recyklovaného kameniva je tato norma nepoužitelná a je nutné jejich vlastnosti stanovit jiným způsobem.

Při tvorbě křivky zrnitosti recyklovaných kameniv lze vzhledem k množství drobnější frakce (0,063 – 0,25 mm) odhadnout míru znečištění jemnými částicemi, přičemž nejvyšší zastoupení těchto částic bylo u REC2, konkrétně 26,1 %. V případě REC1 byla zjištěna nasákavost 6,2 %, pro REC2 a REC3 nebylo možno tento údaj zjistit.

Pórovitost betonu s použitím vyšších náhrad lineárně stoupá, avšak REC1 a REC2 vykazují vyšší hodnoty pórovitosti než REC3, který při plném nahrazení má 17,4 % obsah pórů. Mezi pórovitostí a nasákavostí byla zjištěna závislost, přičemž nasákavost tvoří přibližně polovinu hodnoty pórovitosti.

Betony s vyšším procentuálním zastoupením recyklovaného kameniva vykazují nižší objemové hmotnosti, které mají přímý vliv na pevnost těchto betonů v tlaku. Nejvhodnějším recyklátem pro nahrazení přírodního drobného kameniva je betonový recyklát REC1, kterého je možno vložit až 33 %, a pevnost tohoto betonu v tlaku se svými hodnotami blíží betonu referenčnímu. Zbylé recykláty dosahují nižších hodnot pevnosti v tlaku a v některých případech horších vlastností spojených s pórovitostí, avšak jejich využívání je v současné době komplikované z důvodu chybějících norem, které by předepisovaly, do jakých prostředí by betony s těmito recykláty mohly být používány.

## Reference

- [1] Stavební a demoliční odpady. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, c2008-2022 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/stavebni\\_demolicni\\_odpady](https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady)
- [2] GHISELLINI, Patrizia, Xi JI a Sergio ULGIATI. Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2018, **195**(), 418-434.
- [3] WANG, Bo, Libo YAN, Qiuni FU a Bohumil KASAL. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021, **171**(), 105565. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2021.105565
- [4] Biodegradace, dekontaminace. In: *Marius Pedersen* [online]. Hradec Králové: Marius Pedersen, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.mariuspedersen.cz/cs/o-marius-pedersen/sluzby/14.shtml>
- [5] Stavební a demoliční odpady. In: *Třídění odpadu* [online]. Praha: Concept 42, c2007-2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/stavebni-odpad>
- [6] *Katalog odpadů 2022* [online]. Brno: Webotvůrci, 2022 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.katalogodpadu.cz>
- [7] MIKLASOVÁ, Markéta. Nakládání se stavebními a demoličními odpady – Recykláty. In: *Třetí Ruka* [online]. Praha: České ekologické manažerské centrum [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/nakladani-se-stavebnimi-a-demolicnimi-odpady-recyklaty/>
- [8] WALBERG, Dietmar. Solid and timber construction in residential buildings / Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. *Mauerwerk: European Journal of Masonry*. 2016, **20**(1), 16-31. ISSN 14323427. Dostupné z: doi:10.1002/dama.201600685
- [9] Global cement production. In: *Statista* [online]. New York: Statista, 2019 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/373845/global-cement-production-forecast/>

- [10] THE FREEDONIA GROUP. Global demand for construction aggregates to exceed 48 billion metric tons in 2015. In: *Concrete Construction* [online]. Zonda Media, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://www.concreteconstruction.net/business/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015\\_o](https://www.concreteconstruction.net/business/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015_o)
- [11] KABIRIFAR, Kamyar, Mohammad MOJTAHEDI, Changxin WANG a Vivian TAM. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: a review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, **263**(), 121265 [cit. 2022-05-11]. ISSN 09596526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2020.121265](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265)
- [12] Nový zákon o odpadech mění pohled na skládkování a černé skládky. *Odpady* [online]. 2021, (6) [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/casopis-odpady-novy-zakon-o-odpadech-meni-pohled-na-skladkovani-a-cerne-skladky/>
- [13] SINGH, Jagdeep, Kyungeun SUNG, Tim COOPER, Katherine WEST a Oksana MONT. Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses: the case of textile and wood upcycling businesses in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019, **150**(), 104439. ISSN 09213449. Dostupné z: [doi:10.1016/j.resconrec.2019.104439](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104439)
- [14] CAMPBELL-JOHNSTON, Kieran, Walter VERMEULEN, Denise REIKE a Sabrina BRULLOT. The circular economy and cascading: towards a framework. *Resources, Conservation & Recycling: X*. 2020, **7**(), 100038. ISSN 2590289X. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rcrx.2020.100038](https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100038)
- [15] ŠKOPÁN, Miroslav. Recyklované stavební a demoliční odpady jako jeden z pilířů cirkulární ekonomiky ve stavebnictví. *TZB-info* [online]. 2021 [cit. 2022-04-14]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/21891-recyklovane-stavebni-a-demolicni-odpady-jako-jeden-z-piliru-cirkularni-ekonomiky-ve-stavebnictvi>
- [16] ŠKOPÁN, Miroslav. Recyklace SDO v ČR - Úspěchy i bariéry. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *Recycling 2019*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2019, s. 9-14, 157 s. ISBN 978-80-214-5728-7.
- [17] České stavebnictví se připravuje na nápor cirkulární vlny. In: *EnviWeb* [online]. Brno: Enviweb, 2022 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/121365>

- [18] Construction and demolition waste management in Czech republic: V2 – September 2015. In: *European Commission* [online]. Deliotte, 2022 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z:  
[https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/deliverables/CDW\\_Czech%20Republic\\_Factsheet\\_Final.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/deliverables/CDW_Czech%20Republic_Factsheet_Final.pdf)
- [19] BROŽOVÁ, Lucie a Kamila KUNTOVÁ. Recyklace stavebního demoličního odpadu a jeho využití u pozemních staveb. *Business & IT*. 2016, (2), 32-50. ISSN 25707434. Dostupné z: doi:10.14311/bit.2016.02.05
- [20] SILVA, R.V., J. DE BRITO a R.K. DHIR. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2017, **143**(), 598-614.
- [21] PEDRO, D., J. DE BRITO a L. EVANGELISTA. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*. 2014, **71**(), 141-151. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030
- [22] SILVA, R.V., J. DE BRITO a R.K. DHIR. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. 2014, **65**(), 201-217. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117
- [23] SÖDERHOLM, Patrik. Taxing virgin natural resources: lessons from aggregates taxation in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011, **55**(11), 911-922. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2011.05.011
- [24] ESTANQUEIRO, Bruno, José DINIS SILVESTRE, Jorge DE BRITO a Manuel DUARTE PINHEIRO. Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016, **22**(4), 429-449. ISSN 1964-8189. Dostupné z: doi:10.1080/19648189.2016.1197161
- [25] Podstata recyklace stavebních odpadů. In: *ARSM* [online]. Brno: ARSM, c2002-2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <http://arism.cz/podstata.php>
- [26] Jak se recyklují stavební a demoliční odpady. In: *Třídění odpadu* [online]. Praha: Concept, c2007-2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-stavebni-odpad>

- [27] ŠKOPÁN, Miroslav. Vývojové trendy v technologiích pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů. In: *Stavební technika* [online]. Hradec Králové: Vega, c2002-2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/trendy-v-technologiich-pro-recyklaci-odpadu>
- [28] HANSEN, T.C., ed. *Recycling of demolished concrete and masonry: report of Technical Committee 37-DRC demolition and reuse of concrete* [online]. 1st ed. London: Taylor & Francis, 2014 [cit. 2022-03-19]. ISBN 9780429081675. Dostupné z: doi:10.1201/9781482267075
- [29] Odpady z demolic a rekonstrukcí. In: *Třídění odpadu* [online]. Praha: Concept, c2007-2022 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/stavebni-odpad>
- [30] VANĚK, Antonín. *Strojní zařízení pro stavební práce*. 2., přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 1999. ISBN 80-859-2061-1.
- [31] KUMBHAR, Snehal, Anilkumar GUPTA a Dadaso DESAI. Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. *OIDA International Journal of Sustainable Development*. 2013, **6**(7), 84-96.
- [32] O'MAHONY, Margaret Mary. *Recycling of materials in civil engineering*. Oxford: Oxford University, 1990, 233 s. PhD Thesis.
- [33] DETR. *Controlling the environmental effects of recycled and secondary aggregates production: good practice guidance*. Rotherdam: Cambertown House, 2000. ISBN 1851123520.
- [34] STEHLÍK, Dušan. Technické podmínky pro užití recyklovaných stavebních materiálů do pozemních komunikací. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *RECYCLING 2011*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, s. 29-31, 145 s. ISBN 978-80-214-4253.
- [35] MÜLLER, Anette. Možnosti a limity recyklování betonu. *Beton*. Praha: Beton TSK, 2014, **14**(1), 64-69. ISSN 12133116.
- [36] ČERMÁK, Jan. Beton s využitím recyklovaného kameniva. In: *Časopis Stavitelství* [online]. Praha: Informační centrum ČKAIT, c2007-2022 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-beton-s-vyuzitim-recyklovaneho-kameniva.html>
- [37] Základní druhy recyklátů a možnosti jejich využití. In: *ARSM: Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice* [online]. Brno: ARSM, c2002-2021 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/recyklaty.php>



- [38] Recyklát směsný. In: *Recyklujeme stavby: Webový katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin* [online]. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://www.recyklujmestavby.cz/pojmy/recyklat-smesny/>
- [39] PAVLŮ, Tereza. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu. In: *TZB-info* [online]. Praha: TZB-info, c2001-2021 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>
- [40] ČSN EN 12620+A1 *Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [41] KHATIB, J.M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2005, **35**(4), 763-769. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.017
- [42] EVANGELISTA, L. a J. DE BRITO. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2010, **32**(1), 9-14. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005
- [43] SINGH, Rahul, Dheeresh NAYAK, Arunabh PANDEY, Rajesh KUMAR a Veerendra KUMAR. Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study. *Journal of Building Engineering* [online]. 2022, **45** [cit. 2022-03-28]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2021.103442
- [44] GÓMEZ-SOBERÓN, José M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2002, **32**(8), 1301-1311. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(02)00795-0
- [45] AKONO, Ange-Therese, Jiaxin CHEN, Mimi ZHAN a Surendra SHAH. Basic creep and fracture response of fine recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **266** [cit. 2022-03-29]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121107
- [46] FAN, Cheng-Chih, Ran HUANG, Howard HWANG a Sao-Jeng CHAO. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **112**, 708-715 [cit. 2022-03-28]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154

- [47] DEBIEB, Farid a Said KENAI. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, **22**(5), 886-893 [cit. 2022-03-29]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- [48] ATYIA, May, Mohamed MAHDY a Mohamed ABD ELRAHMAN. Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **304** [cit. 2022-03-29]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124655
- [49] ALIABDO, Ali, Abd-Elmoaty ABD-ELMOATY a Hani HASSAN. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2014, **53**(1), 151-168 [cit. 2022-03-30]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2013.12.003
- [50] CHEN, How-Ji, Tsong YEN a Kuan-Hung CHEN. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, **33**(1), 125-132 [cit. 2022-03-29]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(02)00938-9
- [51] CASTAÑO-CARDOZA, Taimí, Stefan LINSEL, Adrián ALUJAS-DIAZ, Rubén OROZCO-MORALES a José MARTIRENA-HERNÁNDEZ. Influence of very fine fraction of mixed recycled aggregates on the mechanical properties and durability of mortars and concretes. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2016, (81), 81-92. ISSN 01206230. Dostupné z: doi:10.17533/udea.redin.n81a08
- [52] PROŠEK, Zdeněk. Současné možnosti zvyšování využití stavebního a demoličního odpadu ve stavebnictví. *Waste forum* [online]. 3. 2021, **2021**(3), 176-186 [cit. 2022-03-18]. ISSN 1804-0195. Dostupné z: [http://www.wasteforum.cz/cisla/WF\\_3\\_2021.pdf](http://www.wasteforum.cz/cisla/WF_3_2021.pdf)
- [53] BROŽOVSKÝ, Jiří, Rudolf HELA a Adam HUBÁČEK. *Technické kvalitativní podmínky staveb ŘVC ČR: kapitola 1: Provádění betonových konstrukcí*. Vyd. 3. Praha: Ředitelství vodních cest ČR, 2017. Dostupné také z: <http://www.rvccr.cz/public/files/userfiles/Technicko%20kvalitativn%C3%AD%20podm%C3%ADnky/tkp-rvc-kapitola-1-2017-3-vydani-.pdf>
- [54] ČSN EN 206+A2 Beton - *Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.

- [55] ZHENG, Chaocan, Cong LOU, Geng DU, Xiaozhen LI, Zhiwu LIU a Liqin LI. Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics* [online]. 2018, **9**(), 1317-1322 [cit. 2022-03-15]. ISSN 22113797. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinp.2018.04.061
- [56] DE BRITO, Jorge a Luis EVANGELISTA. *Using Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Concrete Production: A State-of-the-Art Review* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.4286.0566
- [57] LEDEREROVÁ, Miriam. Vplyv betónového recyklovaného materiálu na vybrané vlastnosti betónu. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *RECYCLING 2011*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, s. 56-60, 145 s. ISBN 978-80-214-4253.
- [58] BU, Changming, Lei LIU, Xinyu LU et al. The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review. *Materials* [online]. 2022, **15**(3) [cit. 2022-03-29]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15031110
- [59] EVANGELISTA, L. a J. DE BRITO. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2007, **29**(5), 397-401. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004
- [60] SIVAMANI, Jagan a Neelakantan RENGANATHAN. Effect of fine recycled aggregate on the strength and durability properties of concrete modified through two-stage mixing approach. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. [cit. 2022-03-30]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-021-14420-5
- [61] JU, Minkwan, Kyoungsoo PARK a Won-Jun PARK. Mechanical Behavior of Recycled Fine Aggregate Concrete with High Slump Property in Normal- and High-Strength. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2019, **13**(1) [cit. 2022-03-30]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1186/s40069-019-0372-x
- [62] DANG, Juntao, Jun ZHAO, Sze PANG a Shunbo ZHAO. Durability and microstructural properties of concrete with recycled brick as fine aggregates. *Construction and Building Materials*. 2020, **262**. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120032

- [63] ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [64] ČSN EN 1097-6 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [65] ČSN EN 12350-2 *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [66] ČSN EN 12390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [67] ČSN EN 13369 *Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [68] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [69] Balený portlandský cement CEM I 42,5 R. In: *Heidelbergcement* [online]. Beroun: Českomoravský beton [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: [https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r?fbclid=IwAR1xTDrpZSaz9HIZmcMZh3vNQhZhYJocUO95ky7jmLkRS3FclPydsYVL\\_w](https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r?fbclid=IwAR1xTDrpZSaz9HIZmcMZh3vNQhZhYJocUO95ky7jmLkRS3FclPydsYVL_w)
- [70] Štěrkovna Dobříň. In: *Cemex* [online]. Praha: CEMEX Czech Republic, 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/-/sterkovna-dobrin>