

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Kompozit z recyklovaného betonu s příměsí z recyklovaných
pneumatik**

**The composite from recycled concrete with admixture of
recycled tires**

Bc. Václav Mauric

2020

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: MAURIC Jméno: VÁCLAV Osobní číslo: 438 455
 Zadávací katedra: KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ
 Studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ
 Studijní obor: KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: KOMPOZIT Z RECYKLOVANÉHO BETONU S PŘÍMĚSÍ
Z RECYKLOVANÝCH PNEUMATIK
 Název diplomové práce anglicky: THE COMPOSITE OF RECYCLED CONCRETE
WITH ADMIXTURE OF RECYCLED TIRES
 Pokyny pro vypracování: THE COMPOSITE OF RECYCLED CONCRETE
WITH ADMIXTURE OF RECYCLED TIRES
 - míra složení kompozita z betonového recyklatu frakce 0+32 s příměsí z recyklovaných pneumatik (tzv. vteky) ve dvou hmotnostních dávkách
 - vyhodnocení experimentálních zkoušek - materiálů
 Seznam doporučené literatury: charakteristiky kompozita
dostupné literatury k dané problematice
recyklovaného betonu
 Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Jan VODIČKA, Ph.D.
 Datum zadání diplomové práce: 30.8.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2020
 Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku
 Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.9.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Václav Mauric

Název diplomové práce: Kompozit z recyklovaného betonu s p ím sí z recyklovaných pneumatik

Základní část: K133 podíl: 100 %

Formulace úkolů: P edm tem úvodní ásti diplomové práce je vypracovat rešerši, v nující se obecnému tématu recyklace stavebního a demoli ního odpadu. Rešerše bude obsahovat poznatky z technických publikací a lánk zam ených k dané problematice. Druhá ást bude zam ena na návrh kompozitu z betonového recyklátu s p ím sí z recyklovaných pneumatik ve dvou hmotnostních dávkách. Záv rem práce budou vyhodnoceny výsledky experimentálních zkoušek a navrženy možnosti využití kompozitu v praxi.

Podpis vedoucího DP: Datum: 10.10.2019

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

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Jana Vodičky CSc. za použití pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

v Praze

.....

Bc. Václav Mauric

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu docentu Ing. Janu Vodičkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady, názory i věcné připomínky, které vedly k vypracování mé diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem betonového kompozitu, vyrobeného převážně z recyklátů. Věnuje se obecnému tématu recyklace stavebního a demoličního odpadu, kde obeznamuje s českou legislativou týkající se této tematiky, produkcí a nakládání se stavebním a demoličním odpadem v České republice a nejčastějšími druhy recyklátů. Druhá část práce je již zaměřena na konkrétní návrh betonové směsi, výrobu zkušebních vzorků a provedení laboratorních zkoušek. Cílem práce je využít materiál ne zcela běžně využívaný ve stavebnictví a jeho následná optimalizace týkající se množství v daném kompozitu mezerovitěho vláknobetonu.

Klíčová slova

stavební a demoliční odpad, recyklace, recyklát, produkce odpadu, nakládání se SDO, návrh betonového kompozitu, mezerovitý vláknobeton

Abstract

This thesis deals with the design of concrete composite, made mainly from recycled materials. It deals with the general issue of recycling of construction and demolition waste, where it acquaints readers with the Czech legislation on this topic, production and management of construction and demolition waste in the Czech Republic and the most common types of recyclates. The second part of the work is focused on the specific design of concrete mixture, test samples production and laboratory tests. The main task of this work is to use a material not quite commonly used in construction and optimize its amount in the concrete composite.

Key words

construction and demolition waste, recycling, recyclate, waste production, waste management, design of concrete composite, fibre reinforced concrete with open structure

Obsah

Vymezené pojmy	10
1 Cíl práce.....	12
2 Rešerše – obecně k recyklaci stavebního a demoličního odpadu.....	13
2.1 Úvod.....	13
2.2 Historie.....	13
2.3 Legislativa.....	14
2.3.1 Legislativa v praxi.....	14
2.4 Produkce a nakládání se SDO v ČR	16
2.4.1 Získávání dat.....	16
2.4.2 Produkce SDO v ČR	18
2.4.3 Nakládání se SDO v ČR.....	21
2.5 Rizika spojená s recyklací stavebního a demoličního odpadu.....	24
2.5.1 Hluk a doprava	24
2.5.2 Prach.....	25
2.5.3 Škodlivé látky obsažené v recyklátech.....	25
2.6 Druhy stavebních recyklátů	26
2.6.1 Betonový recyklát a jeho využití	26
2.6.2 Asfaltový recyklát a jeho využití.....	28
2.6.3 Cihelný recyklát a jeho využití.....	30
2.6.4 Recyklované struskové kamenivo	31
2.7 Mezerovitý vláknobeton	32
3 Experimentální část	34
3.1 Úvod	34

3.2	První etapa	34
3.2.1	Plnivo – recyklované kamenivo	34
3.2.2	Gumové noky z recyklovaných pneumatik	38
3.2.3	Návrh betonového kompozitu	39
3.2.4	Zkouška pevnosti v tahu a tlaku	40
3.2.5	Závěr k první etapě experimentu	43
3.3	Druhá etapa	44
3.3.1	Plnivo betonové směsi – recyklované kamenivo	44
3.3.2	Gumový granulát – příměs do betonu	48
3.3.3	Návrh betonové směsi	49
3.3.4	Výroba zkušebních vzorků	51
3.3.5	Průběhy laboratorních zkoušek a fotodokumentace	54
3.3.6	Výsledky laboratorních zkoušek	59
4	Závěr	63
	Seznam použité literatury a zdrojů	64
	Seznam tabulek	68
	Seznam obrázků a grafů	69

Vymezené pojmy

Druhotná surovina – za druhotnou surovinu je považován materiál či látka, která přestává být odpadem a dosud nevstoupila do procesu další výroby či využití. Termín druhotné suroviny, není dle platné legislativy přesně vymezen a vysvětlen. Není zcela zřejmý okamžik, kdy se z odpadu stává druhotná surovina. Podle směrnice o odpadech je tento pojem nahrazován termínem „stav, kdy odpad přestává být odpadem“ – jde o tzv. neodpad. Vymezení tohoto stavu je důležitý pro to, po jakou dobu se s odpadem musí nakládat dle zákona o odpadech a od jakého okamžiku se jedná o druhotnou surovinu – produkt / výrobek, který nepodléhá odpadovému režimu a je nadále využíván pro stavební výrobu a související činnost. Zjednodušeně řečeno je nutné se stavebním a demoličním odpadem zacházet jako s odpadem do doby, kdy projde recyklačním procesem – drcením a následným tříděním, separací [9].

Inertní odpad – je podle Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách opadů, „odpad, který nepodléhá žádným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám. Inertní odpady se nerozkládají, nehoří a nejsou fyzikálně ani chemicky reaktivní, nejsou biologicky rozložitelné a nenarušují jiné látky, se kterými jsou ve styku, způsobem schopným vyvolat znečištění životního prostředí nebo poškodit lidské zdraví“ [20]. Podle našich právních předpisů § 2 písmeno a) vyhlášky 294/2005 Sb., jde o „odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti a u něhož za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám“ [21]. Jedná se o téměř totožnou definici naší a evropské legislativy.

Odpad – každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. § 3, odst. 1 [22]. Podle Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008/ES o odpadech je odpad podle ustanovení článku 3 bodu 1) „jakákoliv látka nebo předmět, kterých se držitel zbavuje nebo má v úmyslu se zbavit nebo se od něho požaduje, aby se jich zbavil“ [25].

Nakládání s odpady – je jejich shromažďování, sběr, výkup, přeprava, doprava, skladování, úprava, využívání a odstraňování (novela zákona o odpadech č. 154/2010 Sb.) [24]. Všechny osoby, tj. občané musí nakládat s odpady podle zákona o odpadech.

Recyklace – je jakýkoliv způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů. Recyklací odpadů není myšleno energetické využití a zpracování na výrobky, materiály nebo látky, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál (novela zákona o odpadech č. 154/2010 Sb.) [24].

Recyklované kamenivo – se vyrábí zpracováním inertních minerálních stavebních a demoličních odpadů. Dle normy ČSN EN 12620 (Kamenivo do betonu) je definováno jako „*kamenivo získané zpracováním anorganického materiálu dříve použitého na konstrukci*“ [26]. Recyklované kamenivo však lze vyrábět nejen ze stavebních a demoličních odpadů, ale i z průmyslového komunálního odpadu.

Recyklát ze stavebního a demoličního odpadu – definován vyhláškou č. 294/2005 Sb.; materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě stavebních a demoličních odpadů kategorie ostatní odpad a odpadů podobných stavebním a demoličním odpadům, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztřídění na velikostní frakce recyklovaného umělého kameniva v zařízeních k tomu určených (recyklačních linkách), který může být uváděn na trh jako výrobek v souladu se zvláštními právními předpisy nebo využit jako upravený odpad na povrchu terénu v souladu se zákonem o odpadech a vyhláškou č. 294/2005 Sb [21].

Stavební a demoliční odpad (SDO) – odpady vznikají při různých stavebních činnostech, výstavbě, údržbě a rekonstrukci staveb, při různých stavebních úpravách dokončených staveb a odstraňování staveb, zařazených do skupiny 17 Katalogu odpadů (zejména vytěžené zeminy stavební výrobky a materiály) [16].

1 Cíl práce

Cílem práce je návrh složení kompozitu z betonového recyklátu frakce 0/32 s příměsí z recyklovaných pneumatik (tzv. noky) ve dvou hmotnostních dávkách.

Mezerovitý vláknobeton vyráběný z betonového recyklátu skýtá možný potenciál v možnosti využít pro jeho výrobu odpad vznikající ze stavební a průmyslové výroby. Právě tato skutečnost vedla k nápadu využít nestandardní materiál ve stavebnictví, tedy recyklované pneumatiky, jako příměs do mezerovitého kompozitu. Příměs má za úkol vyplňovat dané mezery a zároveň napomáhat materiálu ztuhit jeho strukturu. Z tohoto důvodu bude zkoumán a vyhodnocen vliv určitých dávek příměsí na celkové charakteristické vlastnosti vyrobeného materiálu.

Závěrem budou shrnuty výsledky laboratorních zkoušek, provedených na normových vzorcích. Výsledkem práce je navrhnout možné využití betonového kompozitu ve stavební praxi.

2 Rešerše – obecně k recyklaci stavebního a demoličního odpadu

2.1 Úvod

Problematice o recyklování stavebních a demoličních odpadů, je věnována pozornost již v mnoha publikacích. Tomuto tématu se hojně začalo dařit především na přelomu 20. a 21. století. Recyklace SDO je neodmyslitelně spjata se stavební činností. Během životního cyklu staveb, vzniká jejich nezměrné množství a druhů. Přitom jejich správná recyklace může plnohodnotně nahradit přírodní zdroje při výrobě stavebních hmot a výstavbě nových objektů.

Důraz na toto tzv. novodobé odvětví, je kladen hlavně z hlediska otázky životního prostředí, na které mají negativní vliv nejen odpadní skládky, ale také poptávka po čím dál větším množství primárních stavebních zdrojů. Recyklace má své opodstatnění i s ohledem na ekonomickou stránku věci. Náklady na primární zdroje surovin stále rostou, a to konkrétně vlivem postupného vyčerpávání zásob a nutnosti importu surovin z cizích zemí. Logickým důvodem je snaha o nastolení takzvaného oběhového přístupu, který umožňuje využívání právě druhotných surovin, v tomto případě vyrobeny ze stavebního a demoličního odpadu.

Díky již zmíněné zvýšené pozornosti, se většině zemí evropské unie, včetně České republiky, daří každoročně zvýšit množství vyprodukovaných recyklátů ze stavebního a demoličního odpadu. Tím ale najednou vyvstávají nové otázky, týkající se využití vyrobených recyklátů. Provádí se proto nové výzkumy, zabývající se návrhem

2.2 Historie

S pojmem recyklace, se můžeme setkat již od pradávna. Ve smyslu jak ji ale chápeme dnes, zažila největší rozvoj recyklace stavebního materiálu po druhé světové válce. Mohlo za to velké množství odpadu ze zničených měst a nutnost nové výstavby. To vše přispělo k prozkoumávání možností, jak znovu využít stavební a demoliční odpad. Touto otázkou se začali zabývat lidé po celém světě, neboť kapacita skladovacích ploch není nevyčerpatelná.

V České Republice sahají kořeny recyklace stavebních hmot k počátku osmdesátých let minulého století. Opravdu se ale touto otázkou začali lidé zabývat o něco později. A to kolem roku 1991, kdy u nás vzniká první zákon o odpadech. Postupem času se z prvotního nadšení k životnímu prostředí stala opravdová věda s působivými výsledky. Cílem celého snažení je v budoucnu nahradit přírodní zdroje surovin (především přírodní kamenivo) a využívat tak materiál v tzv. oběhovém hospodářství. Zásoby přírodního kamene pomalu ale jistě v mnoha státech začínají nebezpečně klesat a tak není divu, že tyto země již nyní mají ve svých normách uplatněno využívání právě recyklovaného kameniva na úkor přírodního materiálu.

2.3 Legislativa

Naše tzv. vnitrostátní předpisy, týkající se nakládání s opady jsou velice ovlivněny tzv. mezinárodními právními předpisy, což jsou předpisy Evropské unie.

Hlavní evropskou směrnicí je č. 2018/851/EU, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech. Směrnice se zabývá předcházením vzniku odpadů, nepříznivými dopady vzniku odpadů a samotným nakládáním s nimi.

V České republice je hlavním vnitrostátním zákonem č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Paní Vytlačilová tvrdí v jedné ze svých prací, že „*legislativa v oblasti recyklace ve stavebnictví je poměrně nepřehledná*“ [9]. To potvrzuje fakt, že k platnému zákonu přiléhá velké množství vyhlášek a novel. Stejného názoru je i pan Škopán, který uvádí, že „*současná legislativa v ČR je v oblasti recyklace stavebních a demoličních odpadů nedostatečná a neúplná*“. Podle pana Škopána je hlavním problémem samotný přístup legislativy. Ta k recyklátům přistupuje jako k upraveným odpadům, nikoliv jako k výrobkům [7].

2.3.1 Legislativa v praxi

V praxi je důležitou vyhláškou č. 387/2016 Sb., kterou se mění 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů. Tím hlavním, proč je zde tato vyhláška zmíněna, je změna kterou tato vyhláška

přinesla. Nově byli definovány odpady, které mohli být využívány v neupravené podobě na povrchu terénu. V praxi to znamená, že na povrchu terénu se již nemohou využívat stavební a demoliční odpady s výjimkou zeminy, jalové horniny, hlušiny, sedimentů, recyklátu ze stavebního a demoličního odpadu a vybouraných betonových nebo železobetonových bloků využívaných jako náhrada za lomový kámen k účelům, pro které není technicky možné využít recyklát ze stavebního a demoličního odpadu. Tím byla podpořena snaha o co největší využití stavebního a demoličního odpadu k výrobě recyklátů.

Jeden z hlavních problémů využívání recyklátů ze stavebního a demoličního odpadu ve stavebnictví, spočívá v posuzování rizika na škodlivé účinky dle přílohy 10 zmíněné vyhlášky č. 294/2005 Sb. Limitní hodnoty pro různé škodlivé prvky v sušině jsou sepsány v tabulce 10.1. vyhlášky (vybrané hodnoty jsou pro příklad sepsány v Tabulce 1 níže). Tabulka v žádném případě nezohledňuje způsob a účel využití recyklátu, což je v mnoha ohledech nesprávné až nelogické. Příkladem mohou být limitní hodnoty škodlivin v podobě polycyklických aromatických uhlovodíků PAU (6mg/kg), obsaženy u všech asfaltů (například odfrézovaná vrstva vozovky). Vyhláška pak nedokáže zohlednit, zda bude materiál s vyšším obsahem této škodlivé látky použit v sypkém stavu a uložen v hydrogeologicky citlivém místě, nebo zda bude zpracován teplou cestou do nové asfaltové směsi pro novou vrstvu vozovky.

Pánové Ing. David Kotrba a Ing. Pavel Branský, se ve své práci zabývali porovnáním platné legislativy a tím, jak je skutečně uplatněná v praxi. Vyzdvihují zde několik základních otázek, které vyplívají z ne zcela správného pochopení daných zákonů a vyhlášek. Ty vznikají především z faktu, že podmínky jsou v různých zařízeních či regionech různé. Autoři dále rozebírají některá fakta, která v legislativě chybí. Příkladem může být, že některé stavební materiály nesplňují požadavky vyhlášky 294/2005 Sb. ani jako nově vyrobené. Problém tedy nastává, když se z nich stává SDO (při odstraňování staveb). Tento materiál nemůže dané limity v žádném případě splnit a tudíž se stává nevyhovujícím pro výrobu recyklátů. Nabízí se tedy otázka, zda by nebylo vhodné zavést pro určité typy materiálů takzvané „*sady parametrů*“, které by následně zohledňovaly jeho využití [1].

2.4 Produkce a nakládání se SDO v ČR

2.4.1 Získávání dat

Produkcí odpadů, zahrnujících stavební a demoliční odpady, v České republice mapují v podstatě dva relevantní zdroje. Bohužel je ale jejich publikování v některých ohledech poněkud nešťastně řešeno a mohou tak vznikat někdy nepřesné výsledky. Hlavním problémem jsou dvojí data o produkci a nakládání s odpady, které se mnohdy znatelně liší. Typickou odchylkou jsou nižší hodnoty pro ČSÚ, než je tomu u MŽP (viz. tabulka 1 níže). Proto je důležité čerpat informace a data pro odborný článek pouze z jednoho zdroje a zamezit tak nechtěným zkresleným výsledkům.

Tabulka 1 Porovnání zdrojů dat o produkci odpadů v ČR [14], [15]

Kód	Odpad	Ministerstvo životního prostředí (MŽP)		Český statistický úřad (ČSÚ)	
		2016	2017	2016	2017
		[t]		[t]	
z podniků					
1	Geologický průzkum, těžby,..	73179	72525	64 880	66 119
2	Zemědělství, zahradnictví, myslivost, rybářství	330 099	259 606	198 473	180 082
3	Zpracování dřeva a výroby desek, nábytku	175 806	175 475	185 794	224 410
4	Koždělný, kožesinový a textilní průmysl	103 033	100 145	93 798	94 217
5	Zpracování ropy, čištění zemního plynu	19 201	16 881	18 599	17 225
6	Anorganické chemické procesy	15 560	18 025	14 047	16 317
7	Organické chemické procesy	139 029	150 414	120 359	127 421
8	Výroba, zpracování, distribuce a používání nátěrových hmot	50 091	49 713	45 330	45 611
9	Fotografický průmysl	1 510	1 352	1 038	963
10	Tepelné procesy	1 807 099	1 755 342	1 730 476	1 705 676
11	Chemické povrchové úpravy	91 576	103 304	89 817	101 622
12	Fyzikální a mechanické úpravy povrchu kovů a	680 982	714 668	594 424	649 877
13	Oleje a odpady kapalných paliv	160 201	166 572	129 060	133 904
14	Organická rozpouštědla, chladiva a hnací média	3 850	3 908	3 287	3 300
15	Obaly, absorpční činidla, čisticí tkaniny	1 177 282	1 228 846	734 539	776 133
16	Odpad v tomto katalogu jinak neurčené	567 352	597 030	398 909	396 243
17	Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst)	20 669 215	20 742 812	13 866 888	12 700 341
18	Zdravotní a veterinární péče	41 010	42 417	35 325	36 072
19	Zařízení na zpracování odpadů, ČOV	2 682 860	2 771 043	2 605 694	2 721 051
20	Komunální odpad	5 453 139	5 542 537	870 607	887 002
50	Odpad vzniklý z lektroodpadů	x	x		
z obcí					
				3 955 977	4 041 882
Celkem		34 242 074	34 512 615	25 757 323	24 925 470

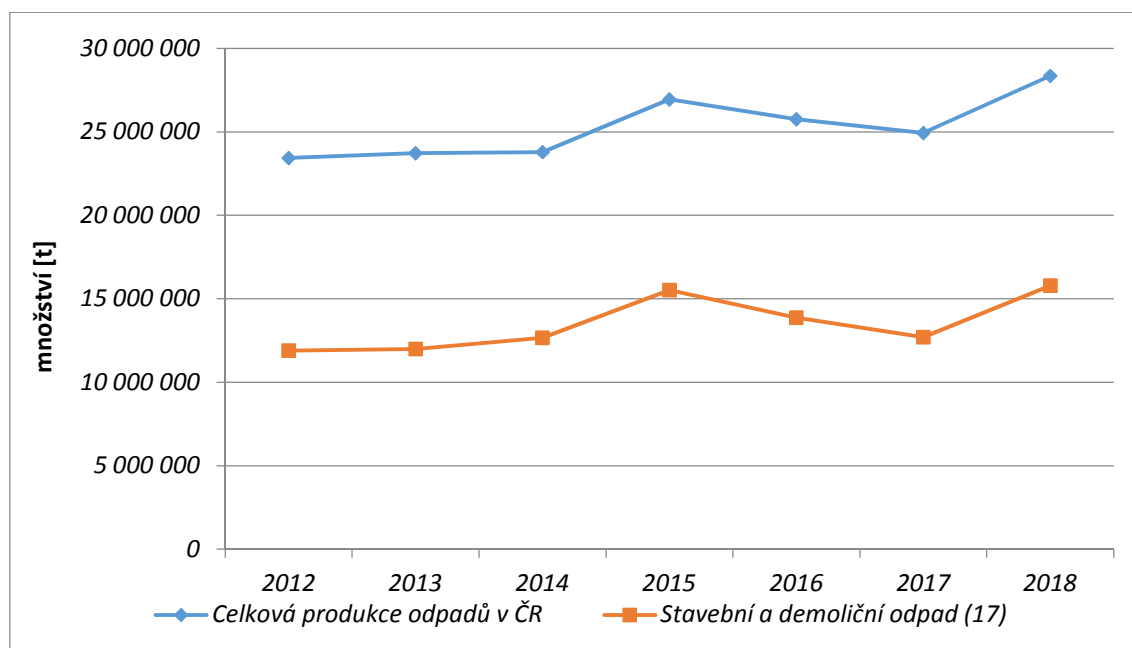
Prvním zdrojem, který shromažďuje data o produkci a nakládání s odpady je český statistický úřad (ČSÚ). Data získává ze statistických výkazů, které vypisují právnické i fyzické osoby. Jak už bylo zmíněno, jejich data vykazují menší hodnoty, co se týče produkce odpadů. Na druhou stranu nabízí mnohem lépe zpracované údaje, které jsou zcela veřejné a dostupné. Díky velkému počtu informací a jejich dobré dostupnosti, jsou tato data použita v této práci. Dle vlastního názoru je považuji za více vypovídající skutečnosti než je tomu u dat shromažďující MŽP.

Druhou databázi má pod svou správou již zmíněné Ministerstvo životního prostředí, které data získává na základě zákona č. 25/2008 Sb., týkající se ohlašování o nakládání s odpadem, které zajišťuje ISPOP (Integrovaný systém plnění ohlašovacích povinností). Tato povinnost o ohlašování a o nakládání s odpady vzniká na základě zákona o odpadech (č. 185/2001 Sb.). Shromážděná data pak zpracovává a publikuje CENIA (Česká informační agentura životního prostředí). Data z tohoto zdroje jsou poněkud strohá. Informují sice o množství vyprodukovaného odpadu, ale již nelze dohledat podrobnosti, týkající se jednotlivých složek dle Katalogu odpadu, stanovený vyhláškou 93/2016 Sb. Dle některých odborných článků, byla databáze MŽP více podrobná, a proto vhodnější při zpracování dat o recyklaci stavebních a demoličních odpadů. To se bohužel v posledních letech změnilo a podrobná data od roku 2017 již MŽP utajuje a nejsou tak zcela použitelná pro odbornou veřejnost. Osobně se domnívám, že se může jednat o poněkud zkreslená data, hlavně co se stavebního a demoličního odpadu týče. Může za to fakt, že se nejčastěji vychází z dat uveřejňována projektanty, kteří ohlašují SDO na základě studií a ne na základě skutečného stavu, který pak nastává při provádění stavby.

Problémem zůstává také ten fakt, že se hlavně v letech minulých neuváděli všechny vzniklé odpady. Na vině je stále nejednoznačná definice odpadů v zákoně o odpadech. Například, pokud se při demolici vzniklý stavební a demoliční odpad recykluje přímo na místě jeho vzniku a rovnou se zpětně využije na stejné stavbě (k zasypání, úprava terénu apod.), podle zákona 185/2001 Sb. o odpadech se tento materiál neobjeví v evidenci odpadů, jelikož nezměnil vlastníka – nestal se odpadem.

2.4.2 Produkce SDO v ČR

Produkce veškerých odpadů v letech 2012-2018, je názorným příkladem, že stavební a demoliční odpad zaujímá přibližně polovinu veškerých odpadů, vyprodukovaných v České republice (graf 1 a tab. 2 níže). To představuje potencionálně velkou možnost na recyklovaný materiál, který by bylo možno využít a nahradit tak primární nerostné suroviny. Realita je však jiná. Velkou část SDO (až 75%) zaujímá odpad skupiny 17 05 – zemina, kamení a vytěžená hlušina (tab. 3), který nelze považovat za materiál vhodný k recyklaci. Tento odpad je hojně využíván na místech vzniku k terénním úpravám a použití na zasypávání vzniklých jam. Do roku 2017 se na tento způsob využíval veškerý stavební a demoliční odpad. Od 1.1.2017, jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, se uvedla v platnost vyhláška č. 387/2017 Sb., která ukládá přesné znění odpadu, využitelné k tomuto účelu. Díky tomu je k dispozici větší množství SDO, které je možno technicky zpracovat a recyklovat jej.



Graf 1 Produkce odpadu v ČR (databáze ČSU) [13]

Tabulka 2 Produkce odpadů v letech 2012-2018 dle Katalogu odpadu (databáze ČSÚ) [13]

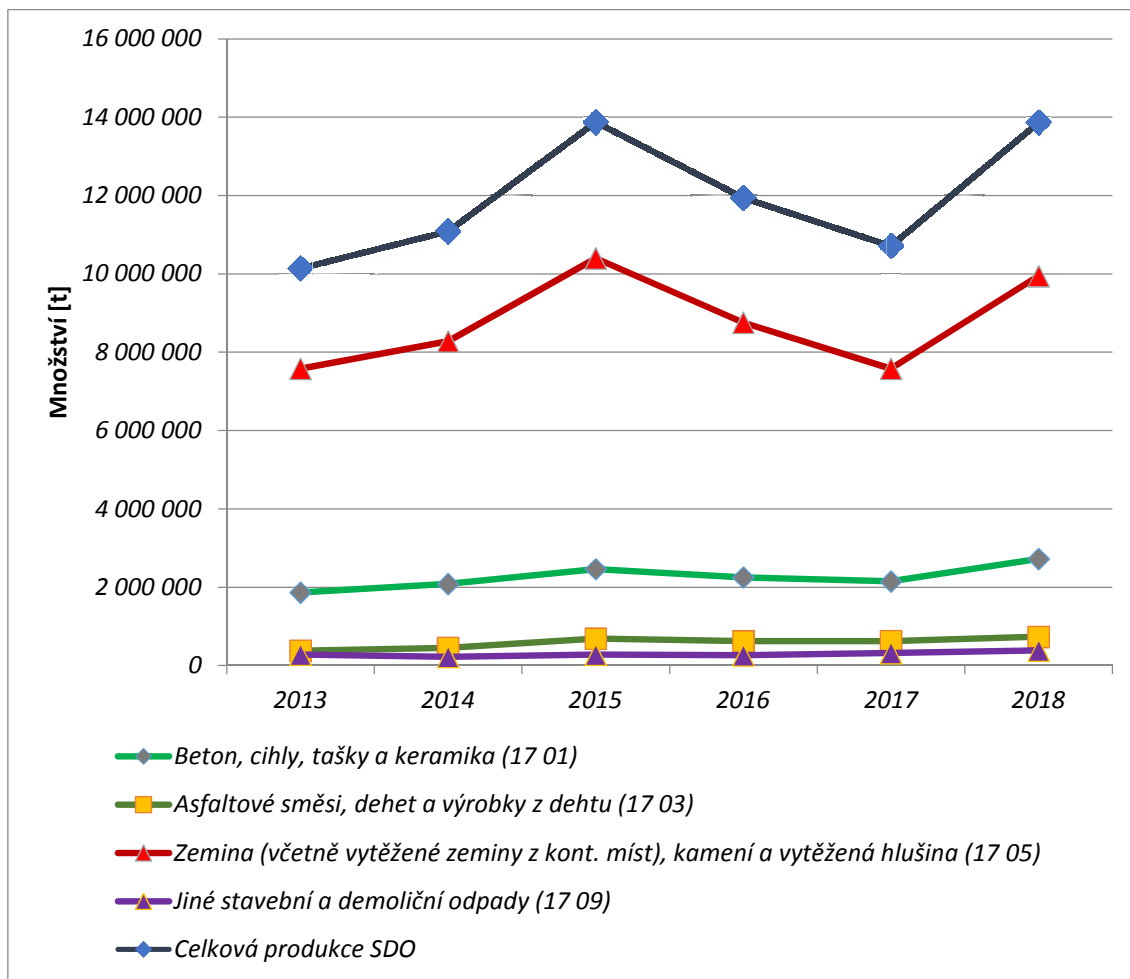
Kód	Odpad	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
		[t]						
Produkce odpadů z podniků								
1	Geologický průzkum, těžby	94 047	164 842	95 035	92 439	64 880	66 119	50 616
2	Zemědělství, zahradnictví, myslivost, rybářství	268 549	265 293	205 742	197 060	198 473	180 082	178 937
3	Zpracování dřeva a výroby desek, nábytku	276 727	275 644	188 508	157 017	185 794	224 410	212 279
4	Koždělný, kožešinový a textilní průmysl	56 325	71 777	77 781	96 183	93 798	94 217	90 258
5	Zpracování ropy, čištění zemního plynu	15 599	11 952	14 229	13 413	18 599	17 225	9 581
6	Anorganické chemické procesy	15 458	14 108	13 848	14 062	14 047	16 317	20 205
7	Organické chemické procesy	80 520	83 114	106 456	113 184	120 359	127 421	138 514
8	Výroba, zpracování, distribuce a používání nátěrových hmot	34 314	36 015	39 184	39 867	45 330	45 611	46 523
9	Fotografický průmysl	1 431	1 365	1 204	1 105	1 038	963	989
10	Teplé procesy	1 881 738	1 967 055	1 768 994	1 792 561	1 730 476	1 705 676	1 660 914
11	Chemické povrchové úpravy	68 763	69 989	76 315	80 129	89 817	101 622	98 655
12	Fyzikální a mechanické úpravy povrchu kovů a plastů	549 411	563 129	608 341	599 678	594 424	649 877	673 056
13	Oleje a odpady kapalných paliv	106 587	118 783	120 686	128 124	129 060	133 904	136 525
14	Organická rozpouštědla, chladiva a hnací média	2 969	3 876	3 405	3 156	3 287	3 300	3 498
15	Obaly, absorpční činidla, čistící tkaniny	627 417	667 482	689 552	688 037	734 539	776 133	755 395
16	Odpad v tomto katalogu jinak	531 442	522 193	431 204	374 500	398 909	396 243	411 682
17	Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných)	11 893 072	11 996 178	12 667 187	15 526 490	13 866 888	12 700 341	15 785 260
18	Zdravotní a veterinární péče	31 081	30 207	32 021	34 166	35 325	36 072	37 739
19	Zařízení na zpracování odpadů, čištění odpadních vod	2 457 706	2 351 719	2 212 362	2 395 545	2 605 694	2 721 051	2 961 828
20	Komunální odpad	944 759	910 881	880 874	899 202	870 607	887 002	916 741
Produkce odpadů z obcí								
		3 497 291	3 596 779	3 553 259	3 699 347	3 955 977	4 041 882	4 163 935
Celkem		23 435 207	23 722 382	23 786 188	26 945 266	25 757 323	24 925 470	28 353 131

Tabulka 3 Materiálové složení SDO v letech 2013 až 2018 (databáze ČSÚ) [13]

skupina	odpad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
		[t]					
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika	1 864 387	2 083 203	2 464 245	2 253 018	2 148 924	2 724 128
17 01 01	Beton, cihly, tašky a keramika	986 508	955 859	1 407 492	1 189 312	1 154 648	1 406 850
17 01 02	Cihly	343 013	334 941	333 858	371 013	369 035	308 735
17 01 03	Tašky a keramické výrobky	4 741	4 560	5 448	5 069	4 148	10 147
17 01 07	Směsi neuvedené pod č. 17 01 06	516 003	765 956	691 999	674 514	602 969	968 754
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu	381 268	454 506	687 792	622 971	624 757	734 973
17 03 02	Asfalt. směsi neudevné pod č. 17 03 01	373 350	452 476	681 681	622 203	616 289	723 086
17 05	Zemina (včetně vytěžené zeminy z kont. míst), kamení a vytěžená hlušina	7 578 985	8 278 504	10 397 907	8 757 062	7 581 651	9 944 862
17 05 04	Zemina a kamení neuvedené pod č. 17 05 03	7 116 324	7 878 481	9 531 192	7 731 821	7 141 740	9 340 462
17 05 06	Vytěžená hlušina neuvedená pod č. 17 05 03	84 303	52 430	102 447	513 746	37 116	9 652
17 05 08	Štěrka ze železničního svršku neuvedený pod číslem 17 05 07	67 356	117 676	539 593	358 222	279 670	290 193
17 06	Izolační a stavební materiály s azbestem	35 237	40 952	39 366	37 122	28 794	35 081
17 06 04	Izolační materiály neuvedené pod č. 17 06 01 a 03	28 463	30 679	29 994	30 294	21 168	25 926
17 08	Stavební materiál na bázi sádry	4 950	6 248	8 459	11 837	9 746	40 806
17 08 02	Materiály neuvedené pod č. 17 08 01	4 936	6 234	8 409	11 837	9 746	40 806
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady	277 637	225 609	277 891	264 224	322 576	390 222
17 09 04	Sm. SDO neuvedené pod č. 17 09 01, 02, 03	260 257	220 797	266 676	258 130	306 740	365 408
Celková produkce SDO		10 142 464	11 089 022	13 875 660	11 946 234	10 716 448	13 870 072
	z toho 1701 + 170302 + 170904	2 497 995	2 756 476	3 412 602	3 133 351	3 071 953	3 812 622
	což z celkového SDO činí v %	25%	25%	25%	26%	29%	27%
	podíl skupiny 1705 na celkové produkci SDO	75%	75%	75%	73%	71%	72%

Nejdůležitějšími podskupinami odpadů, které jsou součástí stavebního a demoličního odpadu, jsou 17 01 (Beton, cihly, tašky a keramika), 17 03 02 (Asfaltové směsi) a 17 09 04 (jiné stavební a demoliční odpady). Materiál v těchto skupinách je

nejvhodnější k následné recyklaci. Představuje přibližně 25% všech stavebních a demoličních odpadů. Z grafu číslo 2, je patrná závislost vyprodukovaného SDO na množství produkované skupiny odpadu 17 05 – Zeminy. V posledních letech se produkce významných materiálů pro recyklaci ustálila.



Graf 2 Materiálové složení SDO v letech 2013 až 2018 (databáze ČSÚ) [13]

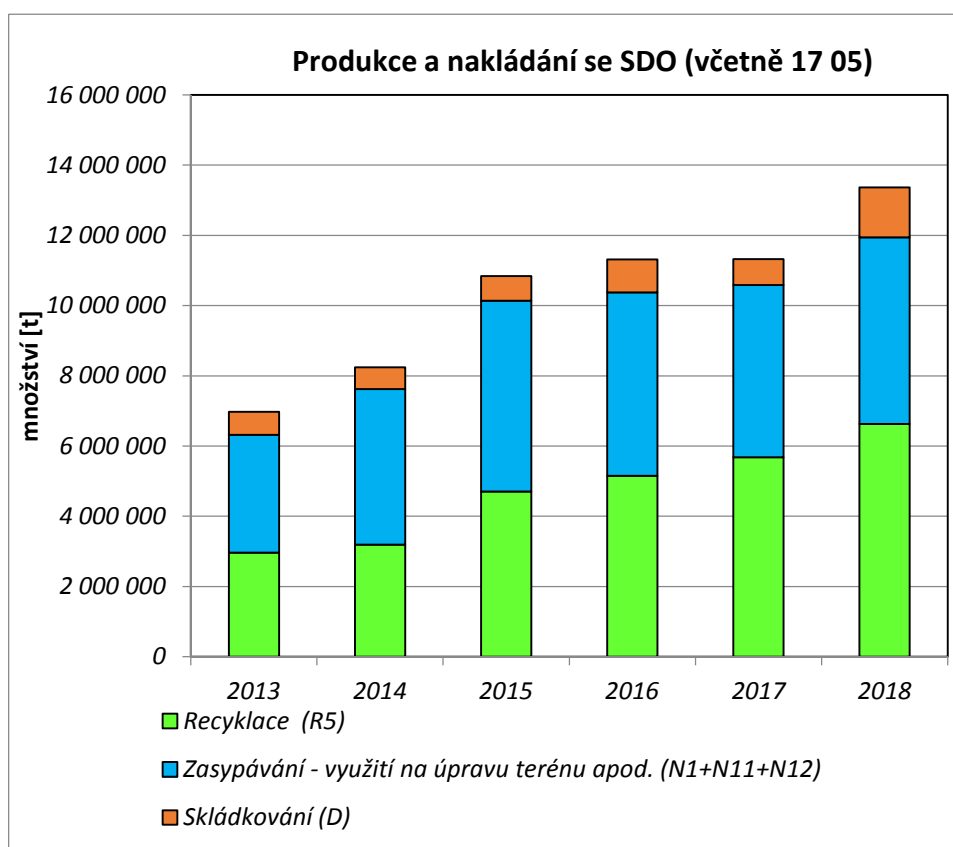
2.4.3 Nakládání se SDO v ČR

Již v několika předešlých letech bylo dokázáno, že recyklovaný materiál, konkrétně pak recyklované kamenivo, má výborné mechanické i fyzikální vlastnosti. Mohlo by tedy být hojně využíváno k nahrazení přírodních nerostných surovin.

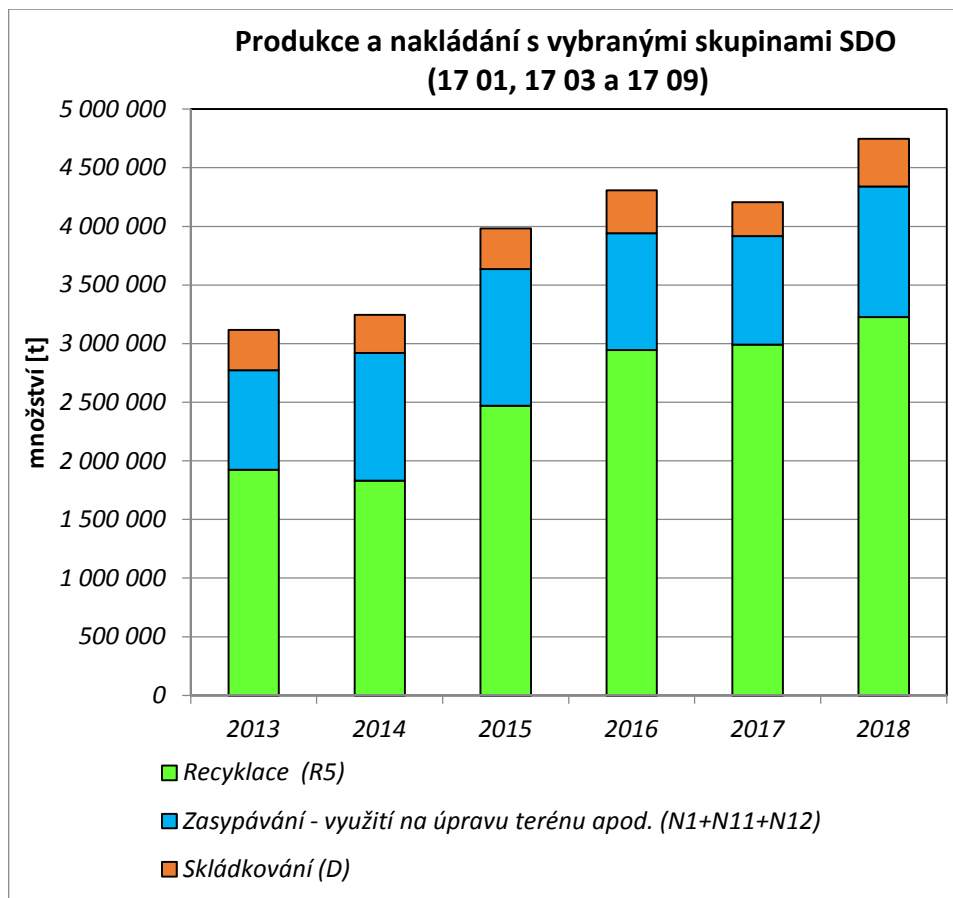
Faktem ale zůstává, že se dnes recykláty stále nejvíce používají pro zasypávání výkopových jam a pro výrobu betonových směsí, které jsou uplatněny na podkladní vrstvy, především pro inženýrské stavby.

Velký potenciál má uplatnění recyklovaného kameniva ve výrobě prefabrikovaných betonových dílců. Tento záměr byl již mnohokrát zkoumán a bylo dosaženo výborných výsledků. Je však nutné, aby SDO byl zpracován na vysoké úrovni a k tomu je zapotřebí, aby již vstupní materiál byl kvalitní – selektivní a důsledná demolice objektů. Toto opatření by mohla zajistit příslušná norma, která ale bohužel v České republice prozatím není.

V posledních letech se daří navyšovat množství stavebního a demoličního odpadu a hodnotu recyklátu, která je zřejmá z grafu č.3. Recyklace představuje přibližně 40% nakládání z celkového množství stavebního a demoličního odpadu. Budeme-li mluvit o celkovém množství SDO, pak přibližně 50% tohoto materiálu připadne na zasypávání a úpravu terénu. Je ale nutné podívat se na tuto skutečnost poněkud blíže. Více vypovídající je graf č. 4, znázorňující pouze vybrané skupiny SDO. Zde je patrné, že vyřadíme-li materiál spadající do podskupiny 17 05 – zeminy, zbudou nám zde materiály vhodné k recyklaci, které se recyklují až ze 65%. Zbýlých 35% materiálu podskupin 17 01, 17 03 a 17 09 se pak skladuje a využívá na úpravu terénu.



Graf 3 Celková produkce a nakládání se SDO v letech 2013 až 2018 [13]



Graf 4 Produkce a nakládání se SDO vhodnými k recyklaci [13]

S přibývajícím množstvím recyklátu vyvstává ale nový problém a to konkrétně s jeho využitím. V dnešní době je velmi těžké jeho uplatnění na českém trhu. Pan Škopán upozorňuje na skutečnost, že z důvodu neprodaných zásob museli „někteří provozovatelé recyklačních linek museli omezit z prostorových důvodů příjem nových stavebních odpadů k recyklaci“. Jak pan Škopán dále uvádí, jedním z řešení by mohlo být zavedení povinnosti využívat ve stavbách určité množství recyklovaného materiálu. Přitom je tato skutečnost v jiných zemích Evropské unie již standardem pro investory [6].

2.5 Rizika spojená s recyklací stavebního a demoličního odpadu

Abychom recyklaci stavebního a demoličního odpadu jen a pouze nevychvalovali, je důležité zmínit i zápory této činnosti. Je zde hned několik důležitých ekologických rizik, které při nakládání se SDO a následně jeho recyklací vzniká. Těmi nejdůležitějšími riziky je prašnost, hluk a znečištění vznikající při dopravě materiálů. Každá výrobní linka, zabývající se recyklací stavebního a demoličního odpadu, musí mít zpracovány studie na vznik polétavého prachu (především PM10) a hlukové studie, které hodnotí hlukovou zátěž před a po spuštění drtící linky.

2.5.1 Hluk a doprava

Hlukem se rozumí takový zvuk, který je nechtěný, který ruší, obtěžuje nebo má dokonce škodlivý účinek na lidské zdraví. V nadměrné míře může způsobovat poškození sluchového aparátu, kardiovaskulární účinky, rušení spánku, obecné obtěžování, zhoršení poznávacích schopností aj. Hygienické limity pro hluk a vibrace jsou v České republice stanoveny v Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací ve znění pozdějších předpisů.

Hluk vzniká během výroby recyklátu v podstatě dvojím způsobem. Tím prvním je samotná doprava surovin na výrobní linku. Jde především o hluk způsobený pohybem nákladních automobilů, jejich nakládání a vykládání. Pro přepravu stavebního a demoličního odpadu je využívána především silniční doprava, kde vznikající hluk ovlivňují například i technické stavy komunikací – nerovnosti na cestách. Druhým zdrojem hluku je výroba recyklátu. Nejedná se pouze o hluk výrobních linek – motory drtičů a třídících sít. Důležitou roli hraje přesun materiálu v těchto zařízeních. Například dopad materiálu do zásobníků nebo průchod materiálu skrze jednotlivá síta.

Z těchto důvodů, je nejdůležitější zvažovat umístění recyklačního centra, ideálně co nejdále od měst. Leckdy ale není možné vždy umístit recyklační linky v dostatečné vzdálenosti, aby bylo zamezeno vzniku hluku, proto se navrhuje i jiná řešení. Příkladem mohou být protihlukové stěny nebo řešení vhodné dopravní infrastruktury, kde svou roli bude hrát stav příjezdových cest a správně vyřešená

2.5.2 Prach

V České republice jsou emisní limity pro prachové částice PM10 stanoveny zákonem č. 201/2012 Sb., zákon o ochraně ovzduší. Označením PM10 je chápána skupina prachu (poléťavý prach) s částicemi menšími než 10 nanometrů. Dále jsou stanoveny limitní hodnoty pro frakce PM2,5 a PM 1,0. Platí zde úměra čím menší, tím nebezpečnější. U částic PM10 hraje velkou roli to, že jsou schopny pronikat bez problému do dolních cest dýchacích. To může způsobovat závažné zdravotní problémy dýchacích cest jako je například chronická obstrukční choroba plic, nebo rakovina. Dalším rizikem těchto částic je jejich působení v ovzduší. Konkrétně pak jejich dopad na energetickou bilanci Země, jelikož rozptylují sluneční záření zpět do prostoru.

Všechny výrobní linky musí splňovat emisní limity a z tohoto důvodu můžeme vyzorovat nejrůznější „chytače prachu“, které prach zachycují a následně filtrují. Napříč tomu, zůstává stále nejběžnějším opatřením skrápění materiálu vodou, kde voda pomáhá snížit koncentraci prachových částí v ovzduší. Další možný způsob, jak zabránit vysoké prašnosti, je snižování dopadové výšky materiálu – například na síta nebo do drtičů.

2.5.3 Škodlivé látky obsažené v recyklátech

Při výrobě recyklátů ze stavebního a demoličního odpadu je třeba dbát na posuzování vstupních materiálu z hlediska obsahu škodlivých látek a jejich vliv na životní prostředí. Pro použití recyklátů jsou stanoveny maximální dovolené hodnoty škodlivých látek zákonem o odpadech (§6) a vyhláškou 294/2005 Sb. Problém u recyklátů, týkající se právě škodlivin, byl uveden již v kapitole 2.3.1. Zde bylo poukázáno na dosavadní problém legislativy, která nezohledňuje přesné využití daných recyklátů. Z toho vzniká problém s jeho následným využitím v praxi.

2.6 Druhy stavebních recyklátů

Tato kapitola je věnována nejčastěji se vyskytujícím recyklátům ve stavebnictví. Recyklátů, jako takového, vzniká nepřeberné množství. Veškeré vyrobené recykláty ze stavebního a demoličního odpadu musí podléhat mechanickým a fyzikálním vlastnostem stanovené nařízením vlády č. 312/2005 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. Druhy recyklátů jsou závislé na inertních materiálech, podle kterých je lze uspořádat do následného rozdělení:

- betonové recykláty
- asfaltový recyklát / recyklát z materiálu z podkladních vrstev vozovek, především pro pozemní komunikace
- recyklát z kameniva kolejového lože
- recyklát z hornin
- recyklát ze zdiva a/nebo betonových částí staveb



Obrázek 1 Charakterizující způsob, jak lze získat vhodný recyklát k výrobě mezerovitého vláknobetonu [2]

2.6.1 Betonový recyklát a jeho využití

Betonový recyklát je velmi žádaný, dalo by se říct, že ze všech recyklátů nejvíce. Je tomu tak na základě jeho vysokých kvalit, jelikož obsahuje převážně přírodní kamenivo a cementový tmel. Jako betonový recyklát je možné označit recyklát, který obsahuje pouze drcený beton (alespoň 90%). Vhodným zdrojem takového recyklátu je například demolice betonových silnic a dálnic či železničních pražců (betony s vyšší pevností). Nejčastěji se tento materiál využívá pro podkladní vrstvy při stavbě silničních

komunikací nebo železničních staveb. Své uplatnění nachází jako tzv. zásypový materiál do výkopových jam a na zpevnění zemin, jenž je ideální díky své dobré nasákavosti. Dále se využívá jako plnivo do betonu s nižšími požadavky na pevnostní vlastnosti. Jak publikuje paní Vytlačilová „využití betonového recyklátu je možné i do živičných směsí pro výstavbu a opravu živičných vozovek za předpokladu dodržení receptur a pracovních postupů předepsaných příslušnými normami – ČSN 73 6121 - Hutněné asfaltové vrstvy" [9].



Obrázek 2 Betonový recyklát [11]

Je důležité zmínit výsledky laboratorních testů, které byly uskutečněné, právě na téma betonového recyklátu. Díky jejich závěrům můžeme uplatňovat tento materiál. Závěry jsou publikovány již v mnoha knihách a mimo ně také na internetových stránkách ARSM (asociace pro rozvoj recyklace a stavebních materiálů v České republice). Zde budou vypsány ty nejpodstatnější [19].

- obsah drceného betonu nepříznivě ovlivňuje konzistenci betonové směsi a pro zachování její potřebné konzistence je nutné zvýšit dávku záměsové vody – nižší pevnost betonu
- pevnosti betonu v tlaku jsou poněkud ovlivňovány oproti použití přírodního kameniva

- snižuje se objemová hmotnost zatvrdlého betonu
- pevnost v tlaku se snižuje cca o 10-15%
- modul pružnosti je nižší o 15-20%
- zvyšuje se součinitel dotvarování až o 50%
- zvyšuje se smršťování a to o 20-40%

Podobnému problému se věnovaly Ing. Magdaléna Šefflová a Ing. Tereza Pavlů, Ph.D, ve své práci týkající se „*Trvanlivosti betonu s recyklovaným kamenivem*“. Zde poukazují na problém betonu s recyklovaným kamenivem – takový beton trpí na úbytek mechanických a fyzikálních vlastností cca o 15%. Velkým poznatkem je také fakt, že u betonu s recyklovaným kamenivem dochází k výrazně pomalejšímu nárůstu pevnosti. Zatímco u betonu s přírodním kamenivem je největší nárůst pevnosti v prvních 28 dnech (zhruba na hodnotu 70% maximální pevnosti), u betonu s recyklátem je tomu tak v prvních 100 dnech. Tato studie se dále zabývala smršťováním a dotvarováním betonové směsi. Směs obsahující recyklované kamenivo dosahovala obecně horších výsledků, například kvůli větší nasákavosti materiálu a tím i vyšším nároku na záměsovou vodu [5].

Z důvodů, které jsou zmíněné výše jako závěry vypovídajících laboratorních prací, je zřejmé, že při použití betonového recyklátu do betonových směsí je velmi důležitá kázeň a propracovaný návrh směsi. Je na místě zmínit, že se stále doporučuje nevyužívat do betonu pouze recyklát, ale jeho kombinaci s přírodním kamenivem. U pozemních staveb se tak beton z recyklovaného kameniva používá nejčastěji v místech, kde stavba není ovlivňována klimatickými podmínkami a nejsou pro směs požadovány vysoké pevnosti – v zemině.

2.6.2 Asfaltový recyklát a jeho využití

Velká výhoda asfaltového recyklátu spočívá v možnosti jej až ze 100% recyklovat a znovu využít. Tedy až na případy, kde může obsahovat nebezpečné materiály (například dříve využívaná azbestová vlákna nebo černouhelné dehty). Tento recyklát,

nazývaný též R-materiálem, je získáván především z rekonstruovaných vozovek různého stáří. „*Tím, že recykláty z vozovek pochází z různých typů starých asfaltových vrstev, bývají nehomogenní a jejich chování nemusí být vždy předvídatelné*“ [4].

R-materiál se především uplatňuje pro technologii za studena, kde dochází ke spojení tohoto materiálu s určitou emulzí, popřípadě jsou ekologicky závadné částice asfaltového recyklátu obalovány pomocí cementu. Tento proces zamezuje případné ekologické závadnosti daného materiálu [8]. Proto jsou využívány pro technologii za studena především asfaltové recykláty, jenž nesplňují TP 210 s požadavkem na znovuvyužití do asfaltových směsí. Velká pozornost je věnována k uplatnění R-materiálu v horkých asfaltových směsí. Je snaha navrhovat tyto směsi s co největším podílem asfaltového recyklátu. Aktuálně se daří dávkovat jej v přibližné míře 20-40% v závislosti na typu vozovky [4].

Ing. Jan Valentin, PhD., a Ing. Monika Chmelíková se zabývali využívání většího množství R-materiálu v nízkoteplotních asfaltových směsích. Závěrem tohoto výzkumu byl výsledek, že přítomnost R-materiálu v asfaltové směsi nijak nezhoršuje její kvalitu, naopak může mít pozitivní vliv na některé charakteristiky. Obecně je zřejmé, že trend snižování teploty při výrobě i pokládce asfaltových směsí má velkou budoucnost, stejně jako využívání vyššího množství R-materiálů [8].

Využití materiálu se pak liší na způsobu zpracování. Materiály vyrobené technologií za studena se zpravidla využívají pro málo zatížené vozovky, kde nedochází k zatížení těžkou dopravou nebo pro spodní podkladní vrstvy. Směsi s přidáním hydraulického pojiva, především cementu, nachází své uplatnění především ve stmelěných podkladních vrstvách.



Obrázek 3 Asfaltový recyklát [10]

2.6.3 Cihelný recyklát a jeho využití

Cihelný recyklát je nejvíce vyskytujícím se recyklátem v České republice. Avšak není tak vhodný pro výrobu směsí, například pro betonové směsi, jako je tomu u betonového recyklátu. Označit materiál za ryze cihelný recyklát lze tehdy, pokud obsahuje převážně cihelné úlomky či zbytky cihelného zdiva. Maximální množství příměsí, jako je sklo, keramika, nebo kovy, je pak dovoleno z 10% hmotnosti materiálu.

Nejčastěji je tento materiál využíván jako zásypový materiál v dopravním stavitelství pro nestmelené vrstvy vozovek, zřízení provizorních cest, násypy nebo zásypy inženýrských staveb a stabilizaci podkladů [9]. I přes jeho nevýhody, spočívající ve vysoké nasákavosti, které mohou přispět k riziku potrhání konstrukce mrazem, je recyklát možné využít jako příměs do betonu. Taková směs je známá pod pojmem cihlobeton. Cihlobeton je vhodný používat jako výplňové zdivo ve skupině monolitických konstrukcí. Své uplatnění ale najde i ve výrobě prefabrikovaných prvků k přípravě vibrolisovaných tvárnic nebo stěnových prvků [18]. Cihelný recyklát slouží také jako příměs do zdících malt – především frakce 0/4. Malta s touto příměsí vykazuje lepší zateplovací vlastnosti a je tak vhodná pro výstavbu pozemních staveb, s vyšším nárokem na tepelný odpor (domy s pasivním standardem).



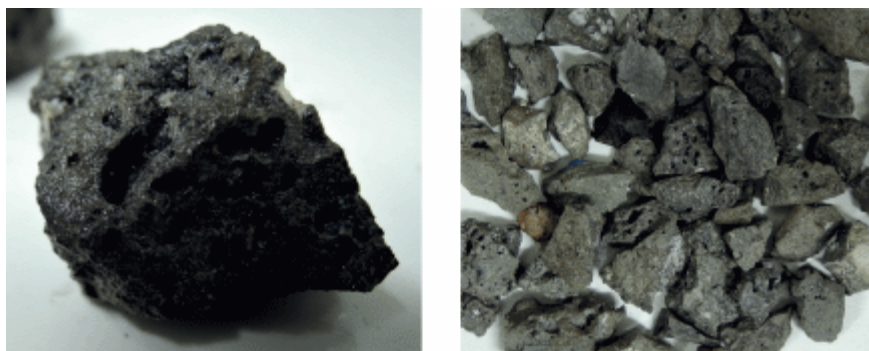
Obrázek 4 Cihelný recyklát [12]

2.6.4 Recyklované struskové kamenivo

Struskové kamenivo není zcela obvyklým recyklátem, jako je tomu u předchozích zmíněných. Představuje v sobě však velký potenciál na výrobu recyklovaného kameniva a nahrazení tak primárního zdroje surovin. Konkrétně jde pak o drcené umělé kamenivo ze vzduchem chlazené vysokopecní strusky. Tento recyklát vzniká jako odpadní produkt při výrobě železa. Tekutá struska se ochlazuje vodou a tím vzniká granulát. Následně se větší kusy strusky drtí a třídí podle frakce.

Hlavní devízou recyklátu je ta, že splňuje náročné požadavky normy na kamenivo do betonu (ČSN EN 12620+A1). Je tedy možné využít jej ve většině betonů. Má ovšem vlastnosti, které znevýhodňují jeho použití v určitém prostředí. Dle normy se nesmí využívat v provozech, kde je požadována zvýšená odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám a to pro konstrukce s projektovanou zvýšenou životností 100 let [3]. Důvodem je jeho vysoká nasákavost u všech frakcí. Ta má také vliv na návrh betonové směsi, kde je nutné s tímto faktem počítat a vyvarovat se případným obtížím. Ing. Rucki zároveň zmiňuje zajímavý fakt. Nevýhoda jako je vysoká nasákavost může v jistém ohledu působit jako pozitivní vlastnost. Může totiž sloužit při hydrataci betonové směsi, kde bude voda v pórech napomáhat k ošetřování tvrdnoucího betonu. Tuto vlastnost je možné využít například u betonů vyšších tříd, kde je kladen důraz na nízký

vodní součinitel [3]. Důležitou vlastností tohoto materiálu je ostrost hran jednotlivých zrn strusky. Ta na jednu stranu přispívá k jeho zhutnitelnosti, ale zároveň je jeho nevýhodou při zpracování tekutého betonu. Obtížné zpracování může snižovat jeho širší uplatnění na trhu a konkurovat tak těženému přírodnímu kamenivu.



Obrázek 5 Zrna vzduchem chlazené vysokopecní strusky [17]

2.7 Mezerovitý vláknobeton



Obrázek 6 Mezerovitý vláknobeton

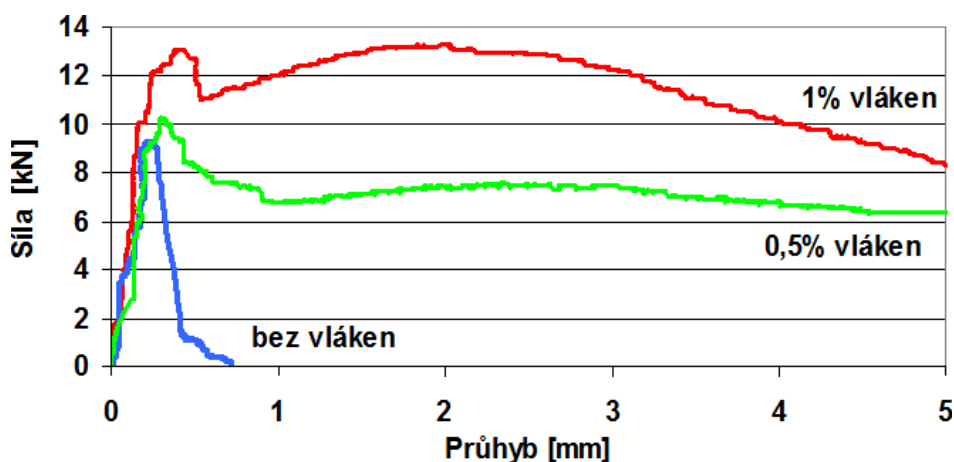
Mezerovitý vláknobeton je vhodný kompozit pro příměsi získané z odpadu vznikajícího ze stavební a průmyslové výroby. Užitím betonového recyklátu, přímo odebraného z deposit recyklačních středisek, tzv. široké čáry zrnitosti, vede při výrobě kompozitu k velké mezerovitosti. Právě tyto mezery mohou být vyplněny jinými

odpadovými materiály a nabízí tak možnost vzniku novým kompozitům z netradičních materiálů. Pro jeho další využití, je nezbytné ztuhit jeho strukturu rovnoměrně rozptýlenými syntetickými vlákny. Níže jsou v tabulce uvedeny získané charakteristiky mezerovitého vláknobetonu z prvních průkazných zkoušek (tab.4).

Tabulka 4 Základní charakteristiky mezerovitého vláknobetonu [2]

Charakteristiky		Betonový recyklát	Cihelný recyklát
Objemová hmotnost	[kg/m ³]	2000-2200	1800-2100
Pevnost v tlaku 150x150x150 mm	[MPa]	12-30	12-28
Pevnost v příčném tahu 150x150x150 mm	[MPa]	1,6-2,5	1,5-3,3
Pevnost v tahu za ohybu 150x150x700 mm	[MPa]	1,6-2,5	1,5-2,8
Modul pružnosti 150x150x150, válec 150x300 mm	[GPa]	13-18	11-15

Tento materiál je využitelný především v zemních konstrukcích, kde nevznikají nároky na vysokou pevnost materiálu. Z grafu je patrné, že syntetická vlákna přenášejí v kompozitu tahové síly a zvyšují tak duktilitu daného materiálu (graf 5).



Graf 5 Záznam ze zkoušky čtyřbodovým ohybem na trámcích 150x150x700 mm [2]

3 Experimentální část

3.1 Úvod

Podle zadání projektu, bylo odzkoušeno na výsledných normových tělesech pomocí destruktivní zkoušky možnost využití příměsi gumového recyklátu v kompozitu mezerovitého vláknobetonu. Mezerovitý vláknobeton je vyroben výhradně s využitím betonového recyklátu, omezeným objemem cementového tmelu a příměsí rovnoměrně rozptýlených syntetických vláken ztužujících strukturu kompozita. Díky onomu množství cementu je kompozit značně mezerovitý a právě gumový recyklát je zde navržen pro vyplnění těchto mezer. Materiál, použitý zde jako příměs, není běžně využíván ve stavební praxi a představuje tak velkou neznámou.

3.2 První etapa

Nejprve bylo zapotřebí samotnou teorii s gumovými noky otestovat, zda je reálné tento materiál použít. K tomuto účelu byly vytvořeny dva druhy vzorků (vláknobetonové trámce). První směs, obsahující pouze recyklované kamenivo a syntetická vlákna bez přidané příměsi, sloužila pro korekci výsledků. V druhé směsi bylo již obsaženo značné množství gumového granulátu. Navržené množství granulátu, nemělo v této směsi pokrýt plnou mezerovitost kameniva, nýbrž bylo především zapotřebí určit vliv této příměsi na betonový kompozit.

3.2.1 Plnivo – recyklované kamenivo

Recyklované kamenivo použité jako plnivo do betonových vzorků bylo nejdříve separátně testováno. Pro samotný návrh betonové směsi, bylo zapotřebí nejprve stanovit jeho základní fyzikální a mechanické vlastnosti. Jednalo se především o betonový recyklát s nižším obsahem cihelné složky. Frakce kameniva byla 0/64 mm.

V návrhu směsi hraje důležitou roli objemová hmotnost a sypaná hmotnost setřeseného kameniva. Objemová hmotnost se stanovila pomocí odměrného válce na vysušeném vzorku kameniva (viz tabulka níže).

Tabulka 5 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva (frakce 0/64)

	m hmotnost kameniva [g]	V_1 objem vody v odměrném válci [ml]	V_2 objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml]
Vzorek 1	1000	1000	1400
Vzorek 2	1000	1000	1410
Vzorek 3	1000	1000	1405
Průměrná hodnota z měření	1000	1000	1405

Výpočet objemové hmotnosti recyklovaného kameniva:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} = \frac{1,000}{0,001405 - 0,001} = 2469,14 \text{ kg.m}^{-3}$$

Objemová hmotnost recyklátu je menší než je tomu u průměrného přírodního těžného kameniva (okolo 2800 kg/m³). To naznačuje vyšší pórovitost a tedy vyšší možnost nasákavosti materiálu. Pro recyklát dále byla provedena zkouška sypané hmotnosti volně sypaného kameniva. Zkouška sypané hmotnosti setřeseného kameniva byla stanovena pomocí vibračního stolu (viz Obr.7). Zkouška proběhla dle technické normy ČSN EN 1097-3, Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3. Záznam z měření, ze kterých je dále vypočtena sypaná hmotnost a mezerovitost, je uveden v tabulce 6. Tyto výsledky jsou základem pro návrh betonové směsi.



Obrázek 7 Zkouška mezerovitosti setřeseného kameniva (pro frakci 0/64)

Tabulka 6 Zkouška hmotnosti a mezerovitosti volně/setřeseného kameniva (frakce 0/64)

	m_1 hmotnost prázdné nádoby [g]	m_2 hmotnost kameniva volně sypaného s nádobou [g]	m_3 hmotnost kameniva setřeseného s nádobou [g]	V_2 objem nádoby [l]
Vzorek 1	4340	17920	20320	9,1
Vzorek 2	4340	17890	19820	9,1
Vzorek 3	4340	17960	19910	9,1
Průměrná hodnota z měření	4340	17923,3	20016,67	9,1

Volně sypaná hmotnost:

$$\rho_b = \frac{(m_2 - m_1)}{V} = \frac{(17,9233 - 4,340)}{0,0091} = 1492,67 \text{ kg/m}^{-3}$$

Mezerovitost volně sypaného recyklátu:

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \cdot 100 = \frac{(2469,14 - 1492,67)}{2469,14} \cdot 100 = 39,55 \%$$

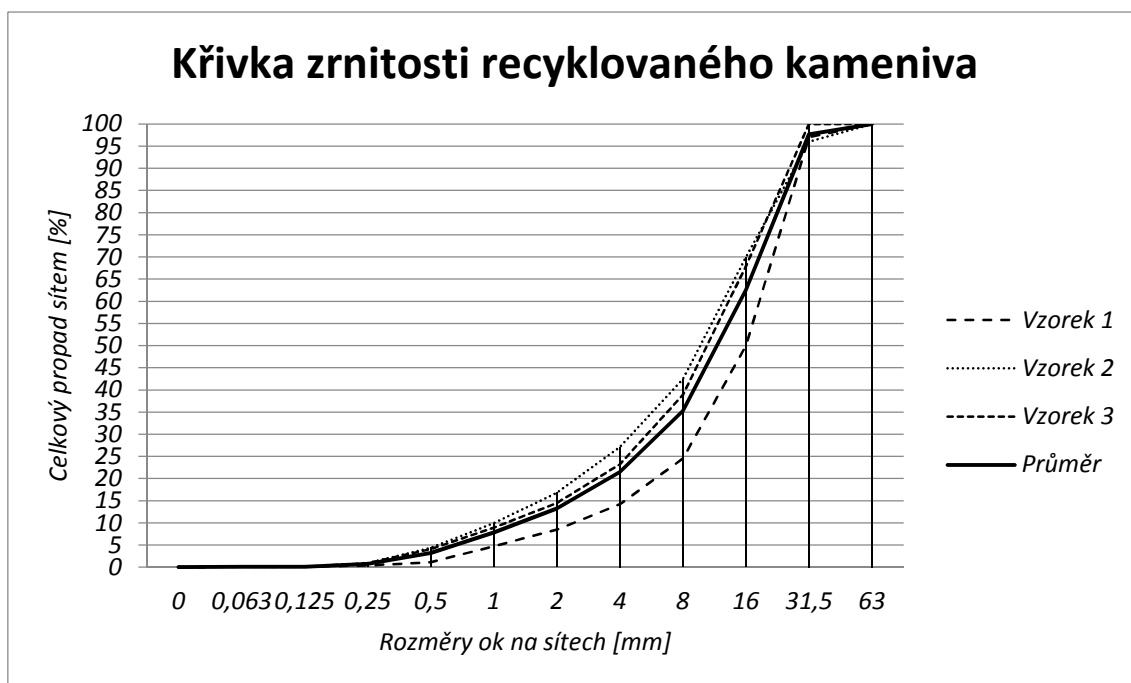
Hmotnost setřeseného kameniva:

$$\rho_b = \frac{(m_3 - m_1)}{V} = \frac{(20,0017 - 4,340)}{0,0091} = 1721,07 \text{ kg/m}^{-3}$$

Mezerovitost setřeseného recyklátu:

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \cdot 100 = \frac{(2469,14 - 1721,07)}{2469,14} \cdot 100 = 30,3 \%$$

Vhodnost recyklátu je třeba ověřit sestavením čáry zrnitosti. Díky této křivce můžeme zjistit, zda je v recyklátu vhodné zastoupení všech velikostí frakce. Tato skutečnost je nejvíce zřejmá ve výsledném grafu, který by neměl příliš strmě narůstat nebo naopak spět k vodorovnému průběhu. Znamenalo by to buďto úplnou absenci některé frakce nebo její nežádoucí velké množství.



Graf 6 Křivka zrnitosti recyklovaného kameniva (frakce 0/64)

Výsledná křivka vykazuje vyšší obsah hrubých částic v recyklovaném kamenivu (Graf 6). Odchylka křivky od doporučeného průběhu není příliš velká a proto lze považovat recyklát za vhodný k výrobě mezerovitého vláknobetonu.

3.2.2 Gumové noky z recyklovaných pneumatik

Gumový granulát pochází z opotřebovaných pneumatik (Obr. 8). Tento materiál lze využít v širokém spektru výrobků. Hlavní využití gumovému granulátu se dostává v automobilovém průmyslu, kde se drtí na velmi jemné částice (0,2mm) a je přidáván například do směsí na nové pneumatiky nebo na výrobu interiérových podlah. Účelem experimentu je ověřit možnost využít ho v mezerovitém, betonovém kompozitu jako dodatečnou příměs zajišťující potřebnou duktilitu. Druhotná surovina vzniká drcením nebo kryogenní redukcí. Materiál kromě gumy obsahuje také textilní vlákna. Jedná se o odpad netoxický a inertní.

Pomocí odměrného válce byla stanovena objemové hmotnost, obdobně jako tomu bylo v případě recyklovaného kameniva (tab.7).

Tabulka 7 Objemová hmotnost recyklátu z pneumatik (gumové noky)

	m_1 hmotnost gumových noků [g]	V_1 objem vody v odměrném válcí [ml]	V_2 objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml]
Vzorek 1	200	1000	1200
Vzorek 2	205	1000	1205
Vzorek 3	195	1000	1995
Průměrná hodnota z měření	200	1000	1200

Výpočet objemové hmotnosti gumového granulátu:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} = \frac{0,200}{0,001200 - 0,001} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

V rámci této etapy experimentu nebude natolik podstatné množství přidané příměsi, jako samotný vliv gumových noků na chování celého kompozitu. Zda je možné použít jej v kombinaci s ostatními použitými materiály a zda bude mít pozitivní vliv na výsledné charakteristiky směsi.



Obrázek 8 Recyklované pneumatiky – gumové noky

3.2.3 Návrh betonového kompozitu

Návrh betonového kompozitu byl proveden dle zásad mezerovitého kompozitu. Množství betonového recyklátu je stanovené na základě výsledků ze zkoušky sypné hmotnosti setřeseného kameniva, kde byla určena i výsledná mezerovitost recyklovaného kameniva. Dávka cementového tmelu je vypočtena tak, aby došlo akorát k obalení zrn recyklátu (podrobný výpočet množství cementu je popsán v následující druhé etapě). Do směsi jsou dále přidány syntetická vlákna, ztužující strukturu kompozitu, v rozmezí 0,3-1,0% objemu dané směsi. V našem případě byla zvolena nejnižší hodnota vyztužení, tedy 0,3% objemu. Základní materiál byl v obou směsích navržen ve stejném množství. Rozdílem tedy zůstávalo použití příměsi pouze v jedné ze směsí. Objem gumového granulátu byl navržen tak, aby pokryl přibližně poloviční mezerovitost v kamenivu. Níže v tabulce jsou uvedeny výsledná množství jednotlivých složek, pro výrobu jednoho zkušebního vzorku (tab.8).

Tabulka 8 Množství jednotlivých složek pro výrobu jednoho zkušebního tělesa – Etapa 1

	<i>Směs č. 1</i>	<i>Směs č.2</i>
Kamenivo frakce 0/64 m_k [kg]	27,107	27,107
Cement m_c [kg]	2,363	2,363
Vlákna m_{VL} [kg]	0,043	0,043
Voda m_V [l]	1,9	1,9
Gumový granulát (noky) m_N [kg]	–	1,575

3.2.4 Zkouška pevnosti v tahu a tlaku

Navrženy a vyrobeny byly dva zkušební trámce, na nichž byla provedena zprvu zkouška pevnosti v tahu za ohybu a posléze zkouška pevnosti v tlaku. Trámce byly vyrobeny o standardních rozměrech 150x150x700mm. Jak už bylo řečeno, experiment měl ověřit zda je možné využít navrhovaný materiál pro výrobu kompozitu. Výroba zkušebních vzorků byla tedy omezena pouze na trámce. K této skutečnosti přispělo i samotné množství dostupného materiálu a časová náročnost projektu. Zkouška pevnost v tlaku byla proto odzkoušena nestandardně na zlomených trámcích, namísto normalizovaných krychlích či válcích. Vypovídajícím výsledkem bylo zda samotné chování směsi bude odpovídat homogennímu materiálu či naopak by došlo k nekompaktnosti jednotlivých složek.



Obrázek 9 Detail vláknobetonového kompozitu s gumovými noky

Vyrobená tělesa byla po 7 dnech odbedněna. Celkem po 28 dnech tvrdnutí a ošetřování, byly trávce připraveny ke zkoušení. Před samotnou zkouškou byly zkušební tělesa zváženy a přeměřeny. Po této proceduře mohla být postupně umístěna do zkušebního zařízení – lisu, který vyhovuje normě EN 12390–4.

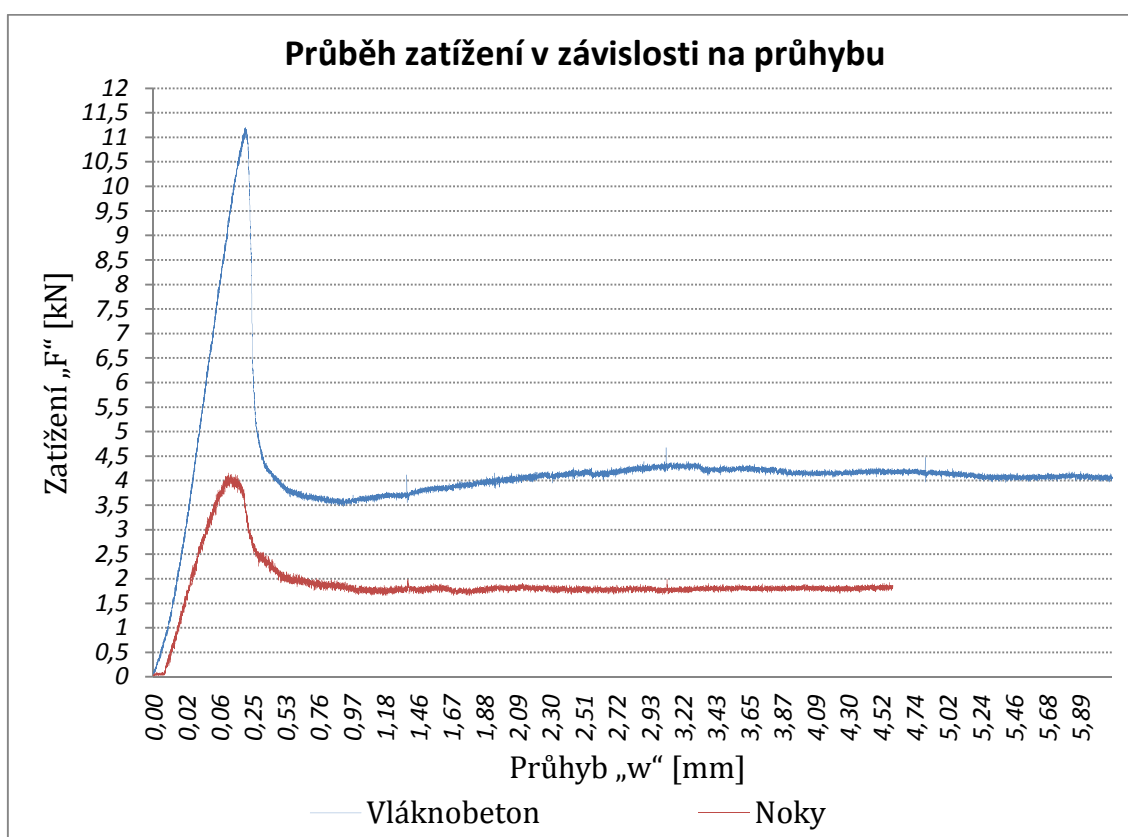


Obrázek 10 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu – mezerovitý kompozit

Záznam výsledků laboratorní zkoušky:

Tabulka 9 Výsledné pevnosti vláknobetonového vzorku z recyklátu

Vzorek č.	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
	šířka	výška	délka				
1	149,9	150,3	700	33000	2032,45	1,992	10,65
2	149,8	151,2	700	29800	1879,55	0,739	4,05



Graf 7 Průběh zkoušky – tah za ohybu

Výsledky referenčního vzorku (směs bez příměsí v podobě gumového granulátu) byly v souladu s teoretickým průběhem napětí a odpovídaly praktickému chování vláknobetonového kompozitu vyztuženého syntetickými vlákny (Graf 7). Z toho lze usoudit, že návrh směsi a technologie výroby byly provedeny v pořádku a nemohli tím pádem negativně ovlivnit výsledky zkoušky. Betonová směs s gumovým granulátem

dosáhla znatelně menších maximálních pevností jak v tahu tak v tlaku. Je tedy zřejmý vliv zvolené příměsi na celkovou pevnost materiálu. Vzhledem k možnému využití je ale důležité také zjistit jak velké množství lze použít.

3.2.5 Závěr k první etapě experimentu

Cílem této etapy, bylo ověřit možnost využití materiálu ne zcela běžný ve stavebnictví a použít ho pro výrobu betonového kompozitu. Prvotní experiment otestoval kompatibilitu materiálů, potřebných pro výrobu mezerovitého kompozitu za použití recyklovaného kameniva. Recyklované pneumatiky (gumové noky) zde posloužili pro vyplnění mezer, které jsou charakteristické pro betonový kompozit vyrobený pouze z recyklovaného kameniva a omezeným objemem cementového tmelu.

Dle očekávání, beton s příměsí nedosáhl takových pevností, jako samotný beton bez přidané příměsi. I přes tento fakt, zkoušky potvrdily možnost využít recyklovaný materiál a proto se bude nadále pokračovat v optimalizaci směsi. Otázkou je, jaký vliv bude mít vzrůstající počet gumového granulátu na pevnost betonu a na jeho schopnost přenášet tahové zatížení. V tomto experimentu obstaraly syntetické vlákna hlavní ztužení celé struktury vyrobeného vzorku, ale otázkou je jakou vahou přispěl právě gumový recyklát. Proto se v nadcházející fázi ustoupí od vláknobetonu a bude vytvořen pouze prostý beton s příměsí tvořenou recyklovanými pneumatiky. To zodpoví položenou otázku na jejich celkový vliv v betonovém kompozitu.

3.3 Druhá etapa

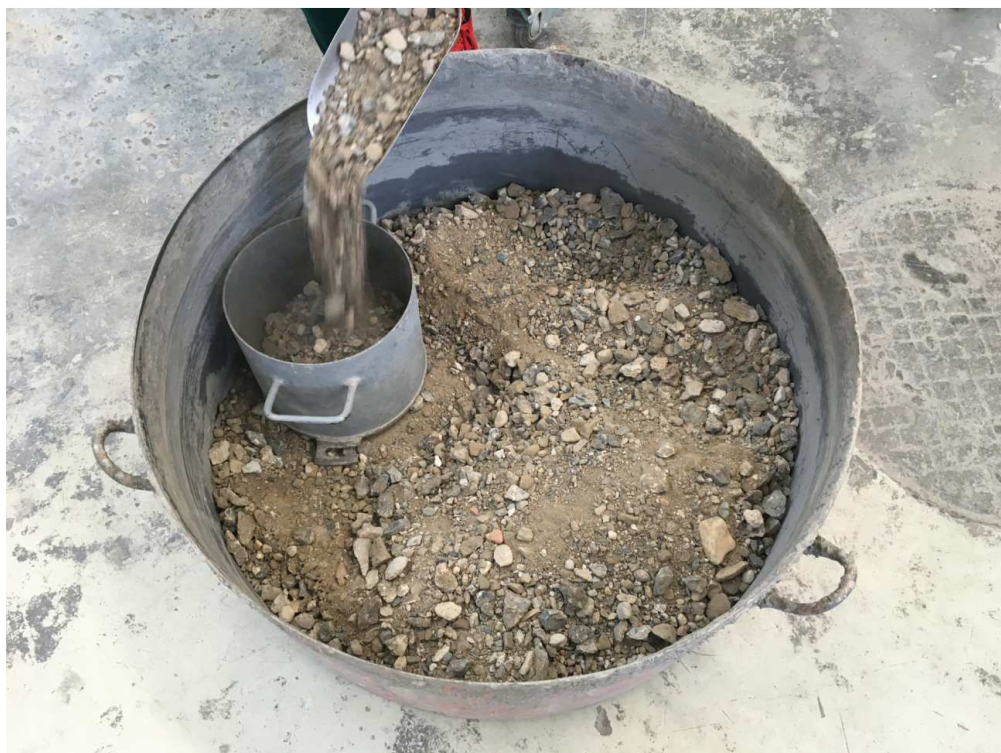
Následující experiment vychází z předešlé etapy a jejích výsledků. Kompozit, který zde bude navrhován, není primárně určen pro hlavní nosné prvky. Oproti předchozí zkoušce bude vytvořen pouze betonový kompozit bez vyztužení syntetickými vlákny. Na základě zjištěných dat z prvotního návrhu budou vytvořeny dvě směsi s rozdílným množstvím gumového granulátu, díky čemuž bude možné sledovat vliv příměsi na charakteristické vlastnosti vzniklého mezerovitého kompozitu. Vypovídajícím výsledkem bude jak pevnost v tlaku, tak chování materiálu v tahu.

Úmyslem je tedy zaplnit mezery v kompozitu, ale také přispět ke ztužení celé směsi. Přirozeně se předpokládá, že pevnost betonu bude v závislosti s vyšším obsahem gumových noků klesat. Úkolem je ale odhalit pozitiva, která daný materiál může přinést. Cílem je také určit optimální množství recyklovaného materiálu, aby mohla být směs využívána ve stavební praxi.

3.3.1 Plnivo betonové směsi – recyklované kamenivo

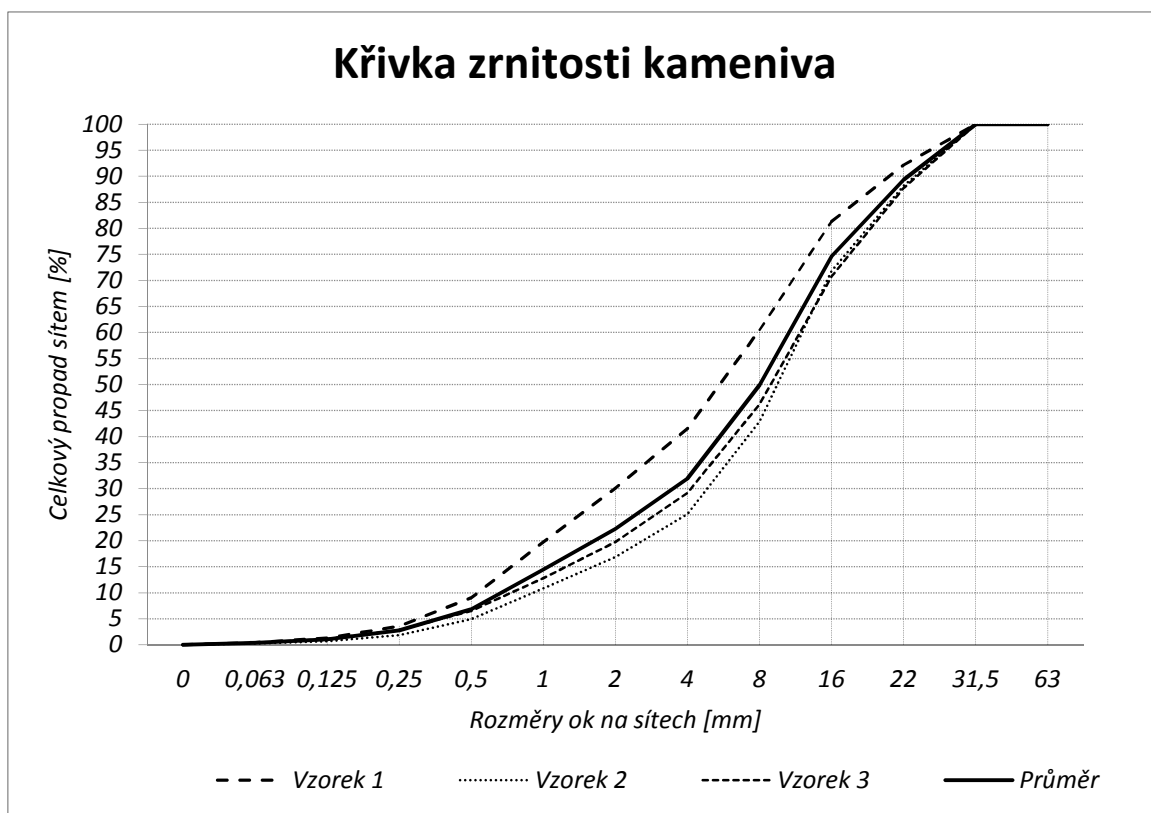
Pro návrh a výrobu vzorku byla nyní použita široká frakce recyklovaného kameniva 0/32mm. Recyklát pocházel ze stejné recyklační linky a deposita jako kamenivo pro výrobu vláknobetonového kompozita v předešlé etapě.

Pro kamenivo byly znovu stanoveny jeho fyzikální vlastnosti. Důvodem je odlišná frakce (křivka zrnitosti) a také fakt že se jedná o recyklované kamenivo a nelze se vždy spolehnout na konstantní veličiny. Příčinou může být vcelku pochopitelná různorodost materiálu během samotné demolice objektu. Výhodou navíc může být ověření výsledků, pro objemovou a sypanou hmotnost, vycházejících z předešlých zkoušek kameniva.



Obrázek 11 Recyklované kamenivo frakce 0/32mm

Dodaný materiál, pro naše zkoušky, obsahoval již napohled větší množství drobného kameniva (zrna do 4 mm). Pro prosévací zkoušku byl použit takový vzorek kameniva, který byl získán smícháním většího množství recyklátu (Obr.11). Tím bylo zamezeno nechtěnému měření na nevypovídajícím vzorku recyklovaného materiálu, což by mohlo mít za následky poněkud zkreslující výsledky. Výsledná křivka zrnitosti znázorněná na obrázku 19, částečně svým průběhem koresponduje s křivkou provedenou pro frakci 0/64 mm. Normová řada sít pro hrubé kamenivo byla rozšířena o doplňkovou velikost 22 mm. Díky tomu mohl být proveden přesnější návrh množství cementu v betonové směsi, který je blíže rozepsán v podkapitole 3.3.3. Pro tento návrh je rozhodujícím údajem poměr mezi hmotnostním podílem frakce a velikosti dolního síta frakce. Z křivky je patrné, že navzdory prvnímu předpokladu recyklát obsahuje poněkud vyšší množství hrubého kameniva (Graf 8). Z průběhu křivky je patrné, že recyklované kamenivo je vhodné pro výrobu mezerovitého kompozitu. Její průběh nenaznačuje absenci nebo naopak příliš velké množství některé frakce.



Graf 8 Křivka zrnitosti recyklovaného kameniva frakce 0/32mm

Sypná hmotnost volně sypaného a setřeseného recyklátu byla znovu určena pomocí vibračního stolu (Obr. 12). Z výsledných hodnot byla stanovena mezerovitost recyklátu, viz výpočet níže.

Sypná hmotnost volně sypaného recyklátu:

$$\rho_{b,k} = \frac{(m_2 - m_1)}{v} = \frac{(17,817 - 4,340)}{0,0091} = 1480,99 \text{ kg/m}^3$$

Mezerovitost volně sypaného recyklátu:

$$\mu_{b,k} = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \cdot 100 = \frac{(2564,10 - 1480,99)}{2564,10} \cdot 100 = 42,24 \%$$

Sypná hmotnost setřeseného recyklátu:

$$\rho_{t,k} = \frac{(m_2 - m_1)}{v} = \frac{(20,300 - 4,340)}{0,0091} = 1753,85 \text{ kg/m}^3$$

Mezerovitost setřeseného recyklátu:

$$\mu_{t,k} = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \cdot 100 = \frac{(2564,10 - 1753,85)}{2564,10} \cdot 100 = 31,60 \%$$



Obrázek 12 Vibrační stůl – zkouška sypné hmotnosti setřeseného kameniva (frakce 0/32mm)

Objemová hmotnost recyklovaného kameniva byla stanovena klasickou zkouškou provedenou v odměrném válci (Obr.13). Zkouška byla provedena na referenčním vzorku o váze 1kg.

Tabulka 10 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva (frakce 0/32)

	<i>m</i> hmotnost kameniva [g]	<i>V₁</i> objem vody v odměrném válci [ml]	<i>V₂</i> objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml]
Vzorek 1	1000	1000	1400
Vzorek 2	1000	1050	1430
Vzorek 3	1000	1050	1440
Průměrná hodnota z měření	1000	1033	1423

Vzorec pro výpočet objemové hmotnosti:

$$\rho_{v,k} = \frac{m}{V_2 - V_1} = \frac{1,000}{0,001423 - 0,001033} = 2564,10 \text{ kg/m}^3$$

Fyzikální vlastnosti jako jsou hodnoty mezerovitosti a objemové hmotnosti mohly být teoreticky převzaty ze zkoušky prováděné u frakce 0/64 použité při výrobě vláknobetonu. Nasvědčovaly tomu již výsledky objemových hmotností. Nicméně, nově provedené zkoušky zaručují eliminaci případných chyb a zároveň lze z výsledků potvrdit správnost provedení zkoušek. Odchylka obou testovaných recyklátů je zanedbatelná a lze tedy považovat výsledky za správné.



Obrázek 13 Měření objemové hmotnosti recyklátu v odměrném válci

3.3.2 Gumový granulát – příměs do betonu

Recyklovaný gumový granulát (pracovně též „gumové noky“), použitý pro vyplnění mezerovitosti kameniva, je totožný jako při návrhu prvotního experimentu (Obr. 14). Objemová hmotnost tohoto materiálu byla již dříve stanovena a je rovna hodnotě 1000 kg/m^3 . Nyní byla pro přesný návrh provedena navíc zkouška na vibračním stole, kde byla zjištěna sypaná hmotnost setřeseného vzorku. Díky této hodnotě lze stanovit v návrhu směsi přesné hmotnostní zastoupení daného materiálu.

Sypná hmotnost setřesených gumových noků:

$$\rho_{t,n} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} = \frac{(8,3 - 4,340)}{0,0091} = 435,2 \text{ kg/m}^3$$

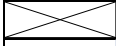


Obrázek 14 Recyklát z pneumatik – detail gumových noků

3.3.3 Návrh betonové směsi

Návrh betonové směsi byl proveden stejným způsobem jako v první etapě, tedy dle zásad mezerovitého kompozitu. Objem cementového tmelu, potřebného pouze k obalení zrn recyklátu je zde opět vypočten dle součtu poměrů mezi hmotnostním podílem frakce a velikosti dolního síta frakce, určeného právě během prosévací zkoušky. Tento součet je proveden pouze u frakce vyšší než 0,25 mm (včetně). Menší zrna kameniva jsou blíže velikosti zrn cementu a jsou tudíž pro výpočet irelevantní. V tabulce níže jsou znázorněny jednotlivé poměry pro dané velikosti zrn (tab.11). Rozdílem pro tuto etapu experimentu je celková absence syntetických vláken a přesně specifikované množství příměsi, tedy gumových noků. Konkrétně zde budou navrženy dvě směsi, které se skládaly ze stejného množství cementu, kameniva a vody, ale z různého množství gumového recyklátu. Do první směsi bylo přidáno takové množství příměsi, aby pokrylo přibližně 1/3 mezerovitosti použitého kameniva. Ve druhé směsi byla zjištěná mezerovitost zcela vyplněna. Tyto dvě různé hmotnosti gumového granulátu mají za úkol, zjistit vliv této složky na celkovou pevnost a chování betonu.

Tabulka 11 Měrný povrch recyklovaného kameniva (frakce 0-32mm)

	32	22	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
p/d [m-1]	0,00	4,84	9,19	30,92	45,00	48,32	77,82	152,70	161,98	139,88	104,24	0,00
p/d ₃₂ +p/d ₂₂ +p/d ₁₆ +p/d ₈ +p/d ₄ +p/d ₂ +p/d ₁ +p/d _{0,5} +p/d _{0,25} = 530,770												

$$V_{tm} = \left(k \times \frac{\rho_{t,k}}{\rho_{v,k}} \times \sum p/d \right) \times t = 13 \times \frac{1753,85}{2564,1} \times 530,77 \times 0,00003 = 0,141$$

kde: V_{tm} množství tmelu, které potřebujeme na 1 m³ betonu

k součinitel závislý na zrnitosti původu kameniva

$\rho_{t,k}$ sypaná hmotnost kameniva v setřeseném stavu

$\rho_{v,k}$ objemová hmotnost kameniva

$\sum p/d$ měrný povrch kameniva

t tloušťka cementové tmelu

Níže v této kapitole budou rozepsány výpočty a množství jednotlivých složek, potřebných na výrobu 1 m³ betonu.

$$m_c = \frac{V_{tm}}{V_{tm,1kg}} = \frac{0,141}{0,0006715} = 210,84 \text{ kg}$$

m_c hmotnost cementové složky

$V_{tm,1kg}$ množství tmelu, které vyrobíme z 1kg cementu při daném "w"

$$m_v = m_c \times w = 210,84 \times 0,35 = 73,79 \text{ l}$$

m_v hmotnostní podíl vody při daném vodním součiniteli

w vodní součinitel pro navrhovanou betonovou směs

$$m_k = \rho_{t,k} = 1753,85 \text{ kg}$$

m_k hmotnost recyklovaného kameniva

$\rho_{t,k}$ hodnota sypané hmotnosti kameniva v setřeseném stavu)

Přidané gumové noky pro směs č.1:

$$m_{n,10} = \rho_{t,n} \times \mu_1 = 435,2 \times 0,1 = 43,52 \text{ kg}$$

$m_{n,10}$ množství gumových noků, vyplňující 1/3 zjištěného objemu mezer

$\rho_{t,n}$ sypaná hmotnost setřesených gumových noků

μ_1 požadované procentuální zaplnění mezerovitosti
kameniva

Přidané gumové noky pro směs č.2:

$$m_{n,30} = \rho_{t,n} \times \mu_2 = 435,2 \times 0,3 = 130,56 \text{ kg}$$

$m_{n,30}$ množství gumových noků v plném vyplnění mezer v kompozitu

Tabulka 12 Množství jednotlivých složek pro betonový kompozit (množství na 1m^3) – Etapa 2

Materiál		Směs č.1	Směs č.2
Recyklované kamenivo frakce 0/32	m_k [kg]	1753,85	1753,85
Cementový tmel	m_c [kg]	210,84	210,84
Záměsová voda	m_v [l]	73,79	73,79
Gumové noky	m_n [kg]	43,52	130,56

3.3.4 Výroba zkušebních vzorků

Výroba betonových vzorků probíhala v laboratoři fakulty stavební. Veškeré materiálové složky byly jednotlivě a pečlivě naváženy. Byl použit cement CEM I 42,5R. Míchání směsí probíhalo v laboratorní míchačce. Maximální množství betonu, které se zde mohlo vyrobit, bylo $0,02 \text{ m}^3$. Toto množství odpovídalo právě jedné zkušební krychli ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) a jednomu trámci ($150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$). Pro každou navrhovanou směs byly vytvořeny minimálně tři zkušební trávce a tři krychle.



Obrázek 15 Betonová směs s příměsí gumových granulátů

Během výroby vyvstal problém, který byl způsobený zápornou charakteristickou vlastností recyklovaného kameniva. Konkrétně jeho nasákavostí. Ta je oproti přírodnímu kamenivu velmi vysoká. Jak už bylo řečeno v teoretické části této práce, nasákavost je především způsobena výskytem cementových částí v recyklátu kameniva, které je převážně tvořené betonovým recyklátem. Z tohoto důvodu nebylo použito dostatečné množství záměsové vody, jenž byla vypočtena dle vodního součinitele na použité množství cementu. Směs, již na omak, nebyla dostatečně hydratována. Z tohoto důvodu byla dávka vody zvýšena a to konkrétně na hodnotu 120 l/m^3 (oproti plánovanému množství $73,8 \text{ l/m}^3$). Po této úpravě obsahovala směs již dostatek vody k vytvoření cementové pasty, potřebné k obalení zrn kameniva a vytvoření tak betonového kompozitu.

Hutnění směsi nebylo prováděno na vibračním stole, jak je tomu standardně při výrobě betonových vzorků v laboratoři. Bylo tak rozhodnuto kvůli obavám o dostatečné zhutnění daného materiálu. Pro zhutnění směsi tak bylo zvoleno ruční pýchovadlo, jímž bylo docíleno maximálního požadovaného účinku (Obr. 16). Vzorky byly odbedněny po sedmi dnech. Celková doba tuhnutí a tvrdnutí směsi do zkoušek činila 28 dní, což je normová doba pro zrání betonu. Beton byl po tuto dobu ošetřován kropením.



Obrázek 16 Hutnění zkušebního trámce

Jak je vidět na obrázku č. 17, struktura betonu byla velmi pórovitá a již na pohled velmi mezerovitá. Vzhledem k relativně malému obsahu cementu vykazoval jemné známky poruch, především v oblasti rohů a ostrých hran.



Obrázek 17 Betonový kompozit z recyklovaného kameniva – Etapa 2

3.3.5 Průběhy laboratorních zkoušek a fotodokumentace

Před provedením jednotlivých zkoušek, byly všechny vzorky přeměřeny a převáženy (viz tab. 13 a tab. 14). Z těchto hodnot byly dále vypočteny objemové hmotnosti kompozitů, jenž se ve výsledku pohybují okolo 1900-2000 kg/m³ pro směs s menším množstvím gumového granulátu. Směs s vyšším obsahem příměsi má o něco menší objemovou hodnotu a to konkrétně 1800-1900 kg/m³. Nicméně obě varianty mají výrazně nižší objemovou hmotnost v porovnání s prostým betonem (cca 2300-2400 kg/m³). To je způsobeno převážně použitým kamenivem, jehož objemová hmotnost je také nižší než u těžného kameniva.

Již na první pohled je směs č.1 kompaktnější, s menším množstvím poruch. Směs č.2 vykazuje vyšší známky drolení, na což může mít vliv vyšší množství příměsi z recyklovaných pneumatik. Vzhledem k cílenému využití, jenž je stmelování povrchu a kladení této směsi do podkladních vrstev pozemních komunikací a při zakládání budov, není jemné drolení natolik vypovídajícím faktorem jako výsledná pevnost. Je ale patrné, že tento materiál není příliš vhodný pro konstrukční prvky.



Obrázek 18 Mezerovitý betonový kompozit – Etapa 2

Tabulka 13 Zkušební trávce – přeměření

Zkušební trávce – geometrie a hmotnost								
Označení	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]			
Směs č. 1 – mezerovitost zaplněna z 10%	1.1	150,8	153,5	701	30,55	1893,11	Průměrná objemová hmotnosti – směs č. 1 [kg/m ³]	1953,65
		151,4	153,2	700				
		150,8	151,1	700				
		151,0	152,6	700,3				
	1.2	150,6	152,9	700	32,13	1993,44		
		151,2	151	699,5				
		150,3	154,8	699				
		150,7	152,9	699,5				
	1.3	150,4	155,3	699	32,4	1974,41		
		150,9	156,9	700				
		150,8	154,7	700				
		150,7	155,6	699,7				
Směs č. 2 – mezerovitost zaplněna z 30%	2.1	151,7	157,3	699	31,2	1893,01		
		151,5	158,3	698				
		150,6	152,7	697				
		151,3	156,1	698,0				
	2.2	150,7	156,1	696	30,53	1855,97		
		151,2	157,9	697				
		150,7	155,3	698				
		150,9	156,4	697,0				
	2.3	151,5	153,1	701	30,1	1863,44		
		151,1	154,6	701				
		150,5	150	701				
		151,0	152,6	701,0				

Tabulka 14 Zkušební krychle – přeměření

Označení	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost – směs č. 1 [kg/m ³]		
Směs č. 1 – mezerovitost zaplněna z 10%	1.1	149,4	149,2	151,6	6,453	1908,74	Průměrná objemová hmotnost – směs č. 1 [kg/m ³]	1964,56
		149,5	149,3	150,9				
		149,2	149,6	152,1				
		149,4	149,4	151,5				
	1.2	149,2	149,4	149,2	6,699	2009,35		
		149,2	149,6	149,4				
		149,7	149,2	149,6				
		149,4	149,4	149,4				
	1.3	149,5	149,4	149,5	6,561	1958,77		
		149,6	149,5	149,9				
		149,5	149,6	150,1				
		149,5	149,5	149,8				
1.4	149,5	149,4	151,5	6,743	1981,39			
	149,6	149,5	153,3					
	149,4	149,4	152,2					
	149,5	149,4	152,3					
Směs č. 2 – mezerovitost zaplněna z 30%	2.1	149,4	149,5	151,9	6,381	1881,60	Průměrná objemová hmotnost – směs č. 2 [kg/m ³]	1854,08
		149,5	149,3	152,4				
		149,8	149,4	151				
		149,6	149,4	151,8				
	2.2	149,5	149,7	151,2	6,582	1936,14		
		149,7	149,5	153,4				
		149,7	149,5	151,1				
		149,6	149,6	151,9				
	2.3	149,1	149,3	149,3	5,873	1770,27		
		149,3	149,2	148				
		149,5	149,4	149,2				
		149,3	149,3	148,8				
	2.4	149,5	149,8	149,9	5,986	1785,12		
		149,6	149,5	149,9				
		149,4	149,3	150,2				
		149,5	149,5	150,0				
	2.5	149,5	149,4	148,8	6,365	1906,19		
		149,5	149,4	148,8				
		149,2	149,7	150,9				
		149,4	149,5	149,5				
	2.6	149,5	149,6	149,5	6,164	1845,17		
		149,4	149,5	149,6				
		149,2	149,4	149,7				
		149,4	149,5	149,6				

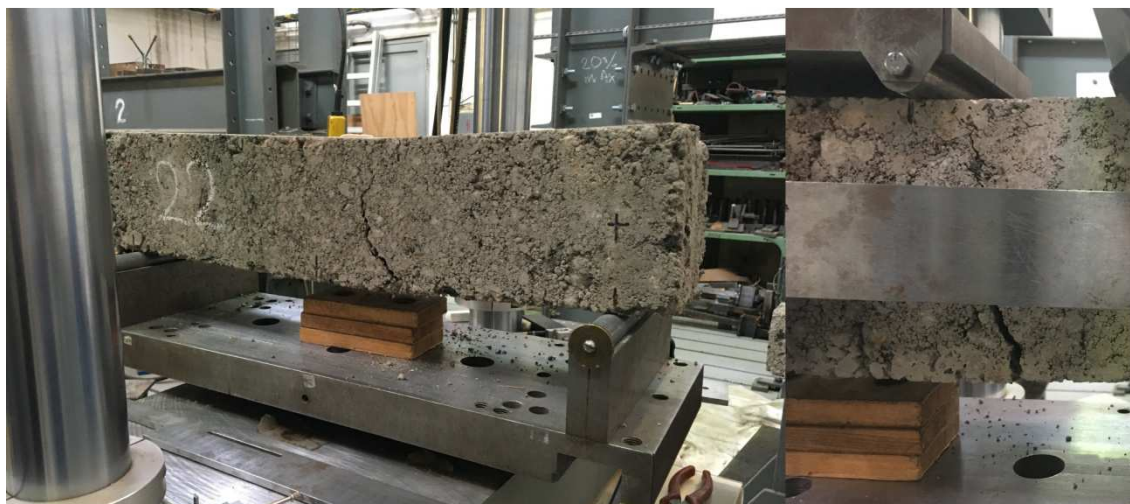
Obdobně jako tomu bylo u zkoušek v první etapě experimentální části, byly zkušební trávce zkoušeny na hydraulickém lisu pro zkoušky betonu v ohybu. Jednalo se o zkoušky destruktivní. Trávky svou nepravidelnou strukturou, způsobenou pórovitostí materiálu, mírně komplikovaly osazování senzorů, měřící aktuální průhyb prvku.

Zkušební tělesa byla zatěžována jako prostý nosník, se vzdáleností podpor 600 mm, čtyřbodovým ohybem. Zatěžování prvků bylo prováděno konstantní rychlostí 0,2 mm/minutu. Průběhy vnášených sil a průhyby (deformace) vzorku byly zaznamenávány a jsou zachyceny na výsledném grafu (Grafy 9, 10). Ze získaných hodnot byly následně vypočteny pevnosti daných vzorků.



Obrázek 19 Zkouška betonu v ohybu – hydraulický lis

Na obrázku níže (Obr. 20) je znázorněný průhyb trámu a rozvoj trhliny během zatěžování. Rozvoj trhliny a její umístění mají vždy určitý vliv na výsledky zkoušky. Po vzniku trhliny nedošlo ke kolapsu prvku, nýbrž došlo k mírnému plastickému efektu, kdy došlo u tělesa s vyšším obsahem gumového recyklátu k poměrně slušnému průhybu. Dosažený průhyb byl obdobný jako tomu bylo u vláknobetonu. Avšak síla působící během největšího průhybu byla mnohem nižší než tomu bylo u vzorku který obsahoval polymerová vlákna.



Obrázek 20 Průhyb prvku a rozvoj trhliny

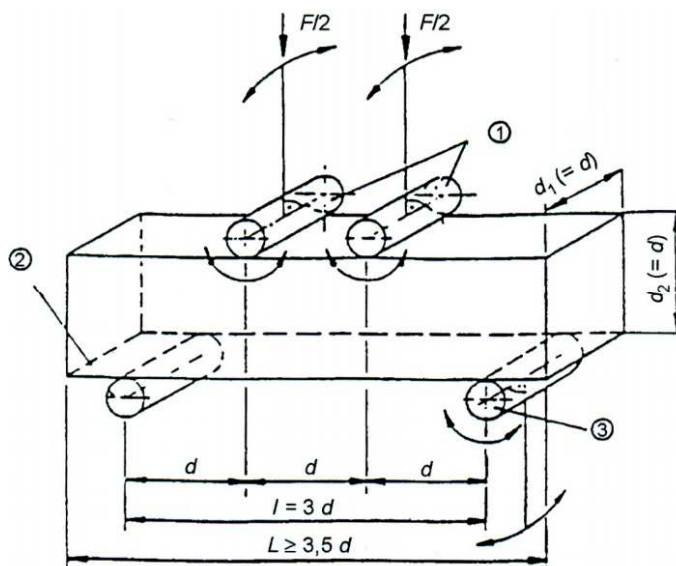
Zkouška pevnosti v tlaku proběhla v hydraulickém lisu určeném právě pro tyto účely (viz. obr.21), dle požadavků normy ČSN EN 12390-4. Opět se jedná o zkoušku destruktivní, kde se maximální zatížení zaznamenává a následně se z něj vypočítá výsledná pevnost prvku v závislosti na jeho geometrii. Krychle je během zkoušky zatěžována centrickým tlakem, konstantní rychlostí. Před zkouškou musí být proto její styčné plochy zbaveny nečistot, které by mohly způsobit excentrické roznášení síly.



Obrázek 21 Zkouška pevnosti v tlaku na zkušební krychli

3.3.6 Výsledky laboratorních zkoušek

Výsledné pevnosti betonu v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 15. Byly vypočteny ze zaznamenaných dat maximálního zatížení působícího na prvek a známé geometrie vzorků a zkušebního lisu.



Obrázek 22 Zkoušení ztvrdlého betonu [27]

Tabulka 15 Pevnosti v tahu za ohybu

Č. vzorku	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	W [m ³]	F _{max} [kN]	M _{max} [kNm]	f _{ct} [Mpa]
1.1	151,0	152,6	700,3	0,000586	6,766	0,6766	1,155
1.2	150,7	152,9	699,5	0,000587	8,774	0,8774	1,494
1.3	150,7	155,6	699,7	0,000608	6,934	0,6934	1,140

2.1	151,3	156,1	698,0	0,000614	7,941	0,7941	1,292
2.2	150,9	156,4	697,0	0,000615	6,635	0,6635	1,079
2.3	151,0	152,6	701,0	0,000586	6,534	0,6534	1,115

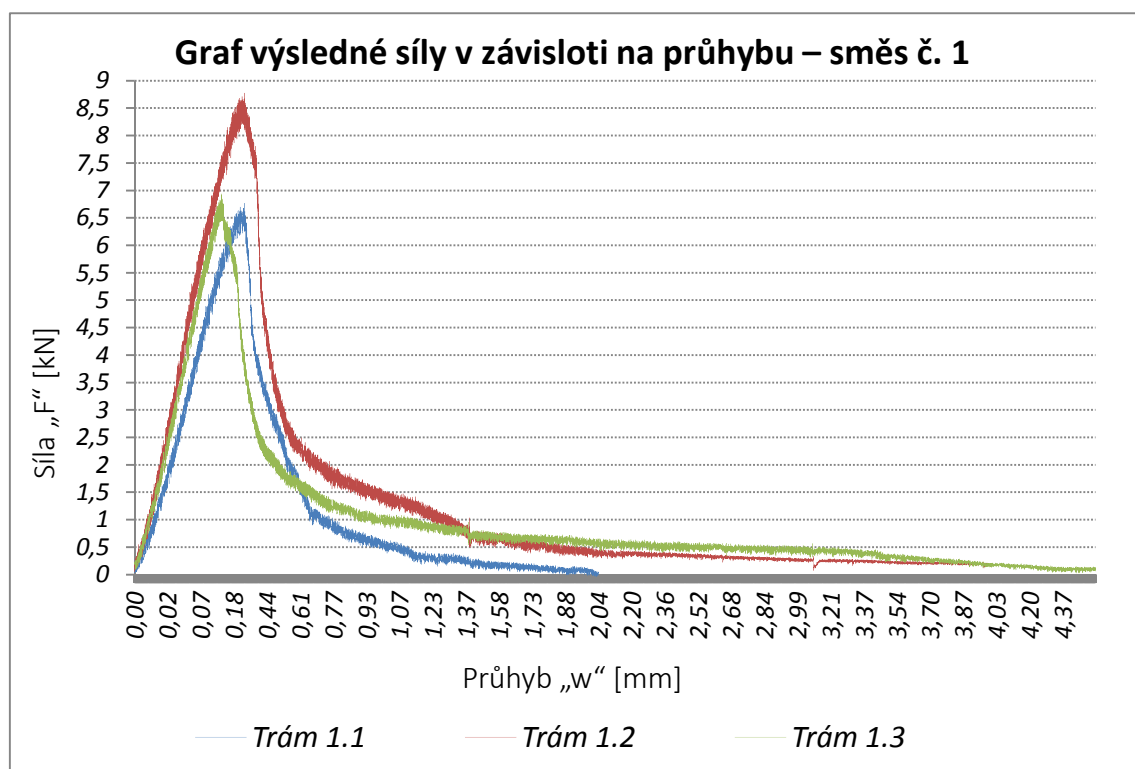
Poznámka: W...průřezový modul konkrétního prvku, kde $W = \frac{1}{6} \times b \times h^2$

F_{max}...maximální působící síla na prvek

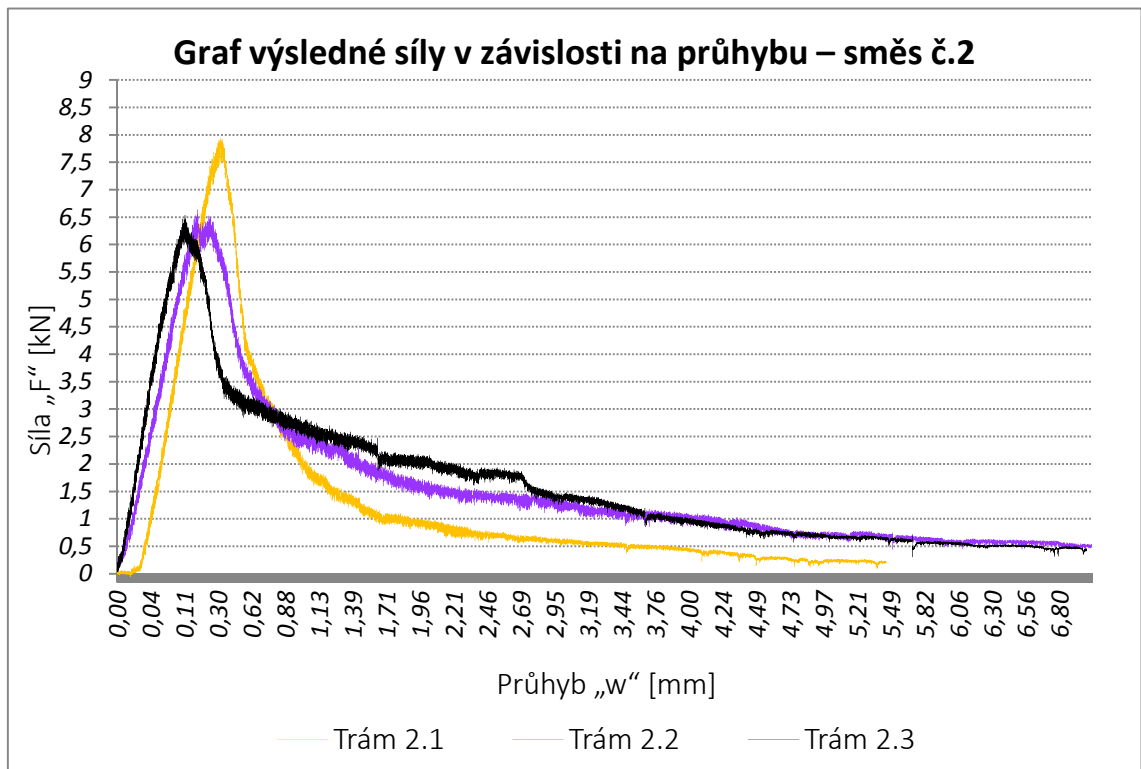
M_{max}...maximální působící momentový účinek na prvek, kde $M = \frac{F \times d}{2}$

f_{ct}...výsledná pevnost v tahu za ohybu pro daný prvek, kde $f_{ct} = \frac{M_{max}}{W}$

Dosažené pevnosti obou směsí byly dosti podobné, ale z průměrných hodnot vyšla lépe směs č.1, ve které bylo obsaženo méně příměsí. To ale nemění nic na faktu, že se jedná u obou variant o relativně nízké pevnosti v tahu. Zajímavější však u testovaných směsí byly následné průhyby po vzniku trhliny. Oproti klasickému prostému betonu, kde dojde ke vzniku trhliny a poté ke kolapsu prvku, zde byl zaznamenán náznak spolupůsobení zakomponované příměši. Totiž, jak je vidět z porovnání obou grafů, směs č.2 dosáhla mnohem lepších maximálních průhybu při působení stejné síly (Grafy 9,10). Průběh zatížení v závislosti na průhybu u varianty betonové směsi č.1, připomínal blíže průběh u prostého betonu, kde po vzniku trhliny došlo k výraznému poklesu přenášené síly. Naproti tomu varianta směsi č.2 nabídla průběh zatížení blíže podobný směsi, kde byly použity syntetická vlákna z předešlé etapy experimentu a beton jimi byl slabě vyztužen na tah. To naznačuje vliv gumového granulátu na celkovou duktilitu betonu. Průhyby byly sledovány přibližně do hodnoty 6 mm, poté již prvek přenášel velmi nízké, až zanedbatelné (v určité situaci až nulové) zatížení a delší měření by tedy nebylo nikterak vypovídající.



Graf 9 Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu – Etapa 2, směs č. 1



Graf 10 Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu – Etapa 2, směs č. 2



Obrázek 23 Detail lomu zkušebního trámku

Na obrázku 23 jsou zachyceny přelomené betonové trámky. Je zde názorně vidět struktura obou směsí (vlevo směs č.1, vpravo směs č. 2 s vyšším obsahem gumového recyklátu).

Tabulka 16 Výsledky tlakových zkoušek

Č. vzorku	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	m [g]	F _{max} [kN]	f _{ct} [Mpa]	
1.1	151,5	149,4	149,4	6453	221,9	9,804	10,553
1.2	149,4	149,4	149,4	6699	290,25	13,004	
1.3	149,8	149,5	149,5	6561	149,85	6,691	
1.4	152,8	149,4	149,5	6743	290,25	12,714	
2.1	151,8	149,6	149,4	6381	228,01	10,040	7,851
2.2	151,9	149,6	149,6	6582	278,21	12,243	
2.3	148,8	149,3	149,3	5873	93,17	4,194	
2.4	150,0	149,5	149,5	5986	141,88	6,327	
2.5	149,5	149,4	149,5	6365	230,97	10,341	
2.6	149,6	149,4	149,5	6164	88,54	3,961	

Pevnosti v tlaku byly na rozdíl od pevností v tahu velmi rozličné. Opět z průměrné hodnoty můžeme konstatovat, že varianta s menším obsahem gumových noků dosáhla vyšších pevností. Pokud se ale podíváme na jednotlivé vzorky, pevnosti se i u stejné směsi značně liší. To jen naznačuje o jak složitý materiál se jedná. Pro názornější výsledky by bylo vhodné vyrobit mnohem větší počet zkušebních těles a teprve z nich udělat vypovídající průměrnou pevnost.

4 Závěr

Cílem této práce bylo využít nestandardní materiál ve stavebnictví, pro výrobu betonového kompozitu, jehož základ tvoří kompozit mezerovitěho vláknobetonu s využitím plně betonového recyklátu s příměsí v podobě gumových noků vzniklých při recyklaci použitých pneumatik. To tato práce splnila. Dosažené výsledky napovídají, že by se v dané příměsí mohl skrývat určitý potenciál. Zdá se že příměs z recyklovaných pneumatik zlepšuje betonový kompozit s ohledem na jeho přetvárnost a pružnost. To by mohlo vést například k použití ke zpevňování určitých druhů zemin. Své uplatnění by směs tedy mohla najít určitě při úpravě podloží při zakládání budovy nebo spodních vrstvách v souvrství liniových staveb. Na druhou stranu je nutné říci, že dosažené pevnosti byly s rostoucím množstvím příměsí nižší. Pro mezerovitý kompozit s nízkým obsahem cementu však nevznikají vysoké požadavky na jeho výslednou pevnost. Vzhledem k uplatnění kompozitu spíše pro liniové a plošné prvky, neměla by být nižší pevnost překážkou.

Rovněž se ukázalo, že vyšší hmotnostní dávka noků zvyšuje duktilitu kompozita. To lze přisoudit vyčnívajícím vláknům z gumových noků (Obr. 14), které přispívají ke ztužení struktury kompozita, ne však v takové míře jako rovnoměrně rozptýlené syntetické vlákna. Vzhledem k malému množství těchto vláken v gumovém recyklátu a k nemožnosti jejich pravidelného rozmístění, je velmi obtížné s nimi kalkulovat v případných výpočtech. Samostatnou kapitolou zůstává i fakt, že pro navrženou směs bylo využito pouze recyklované plnivo a recyklovaná příměs. Tato skutečnost ukazuje na možnost vytvořit kompozit pouze z recyklátů a přispět tak k likvidaci odpadů.

Vhodné by bylo pozorovat dlouhodobou deformaci zatíženého prvku, kde by se naplno projevilo jak dotvarování, tak smršťování betonového kompozitu. Všechna tato zákoutí je nutné prozkoumat a není možné dělat jednoduché závěry pouze na základě předkládaných zkoušek. S nadsázkou lze ovšem konstatovat, že tuto práci lze považovat za jakousi vstupní bránu k dané problematice s likvidací odpadů a může sloužit jako odrazový bod k dalším experimentům s využitím mezerovitěho vláknobetonu s příměsí z recyklovaných materiálů (druhotných surovin různého stavebního a průmyslového odpadu).

Seznam použité literatury a zdrojů

Knihy, odborné články, příspěvky ve sbornících:

[1] KOTRBA, David a Pavel BRANSKÝ. Vlastnosti stavebních a demoličních odpadů a recyklátů z nich vyrobených z hlediska životního prostředí - laboratorní výsledky. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *Recycling 2017: "Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin": sborník přednášek 22. ročníku konference*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2017, s. 11-19. ISBN 978-80-214-5485-9.

[2] HANZLOVÁ, Hana, Luboš MUSIL a Jan VODIČKA. Mezerovitý vláknobeton s betonovým recyklátem vs. jeho využití ve stavební praxi In: TOP 2018 – Technika ochrany prostředí. Bratislava: Department of Surveying, Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. pp. 37. ISBN 978-80-227-4835-3.

[3] RUCKI, Radomír. Výroba betonu z recyklovaného struskového kameniva. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *Recycling 2017: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2017, s. 4-10. ISBN 978-80-214-5485-9.

[4] STEHLÍK, Dušan. Asfaltový recyklát do pozemních komunikací. In: MIROSLAV, Škopán. *Recycling 2018: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2018, s. 82-89. ISBN 978-80-214-5602-0.

[5] ŠEFFLOVÁ, Magdaléna a Tereza PAVLŮ. Trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem. In: MIROSLAV, Škopán. *Recycling 2016: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2016, s. 60-69. ISBN 978-80-214-5331-9.

[6] ŠKOPÁN, Miroslav. RECYKLACE SDO V ČR - ÚSPĚCHY I BARIÉRY. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *RECYCLING 2019: „Recyklace a využití stavebních odpadů jako druhotných surovin“ sborník přednášek 24. ročníku konference*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2019, s. 9-14. ISBN 978-80-214-5728-7.

[7] ŠKOPÁN, Miroslav. Podmínky pro rozvoj využívání recyklovaných stavebních materiálů ve stavebnictví. In: ŠKOPÁN, Miroslav. *Recycling 2017: „Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin“ sborník přednášek 22.ročníku konference*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, s. 20-25. ISBN 978-80-214-5485-9.

[8] VALENTIN, Jan a Monika CHMELÍKOVÁ. Poznatky s využíváním vyššího množství asfaltového R-materiálu v nízkoteplotních asfaltových směsích. In: MIROSLAV, Škopán. *Recycling 2018: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Brno: VUT Brno, fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s ARSM, 2018, s. 90-97. ISBN 978-80-214-5602-0.

[9] VYTLAČILOVÁ, Vladimíra. *Recyklace ve stavební výrobě: Recycling in building industry*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05184-9.

Internetové zdroje:

[10] Asfaltový recyklát. In: *Recyklační středisko Brno-Modřice* [online]. Brno: Recyklační středisko Brno, 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.brnorecyklace.cz/externi-vyroba-recyklatu>

[11] Betonový recyklát. In: *GOLDBECK PREFABETON* [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.prefabeton.cz/produkty/betonovy-recyklat/>.

[12] Cihelný recyklát. In: *OPEN RE-ECO* [online]. Vsetín, 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.openreeco.cz/cihelny-recyklat>

[13] Katalog produktů. Český statistický úřad [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/katalog-produktu>

[14] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2018. *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>

[15] Statistická ročenka životního prostředí ČR. *ISSaR (Informační systém statistiky a reportingu)* [online]. CENIA [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://issar.cenia.cz/publikace-o-stavu-zivotniho-prostredi/statisticka-rocenka-zivotniho-prostredi-cr/>

[16] Stavební a demoliční odpady. In: Ministerstvo životního prostředí [online]. 2019 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady

[17] Vysokopeční struska. In: Konference asfaltové vozovky [online]. České Budějovice, 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/884-umele-kamenivo-pro-stavby-pozemnich-komunikaci/>

[18] ZÁKLADNÍ DRUHY RECYKLÁTŮ A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ + JAKOSTNÍ NORMY. *Betonserver* [online]. AUREA INVEST, a.s, 2018, 2011 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/aktuality/zakladni-druhy-recyklatu-a-moznosti-jejich-vyuziti-jakostni-normy>

[19] Základní druhy recyklátů a možnosti jejich využití. *Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice (ARSM)* [online]. 2002 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.arasm.cz/recyklaty.php>

Zákony, normy, vyhlášky, směrnice:

[20] 1999/31/ES: Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů. Evropská unie: Rada Evropské unie, 1999.

[21] Vyhláška č. 294/2005 Sb.: Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2005.

[22] Zákon č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Praha, 2001.

[23] Zákon č. 188/2004 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a právní předpisy vydané k jeho provedení.

[24] Zákon č. 154/2010 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

[25] (ES) č. 98/2008: Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008. Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2008.

[26] ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu

[27] ČSN EN 12390-5 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání zdrojů dat o produkci odpadů v ČR [14], [15]	16
Tabulka 2 Produkce odpadů v letech 2012-2018 dle Katalogu odpadu (databáze ČSÚ) [13]	19
Tabulka 3 Materiálové složení SDO v letech 2013 až 2018 (databáze ČSÚ) [13]	20
Tabulka 4 Základní charakteristiky mezerovitého vláknobetonu [2]	33
Tabulka 5 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva (frakce 0/64).....	35
Tabulka 6 Zkouška hmotnosti a mezerovitosti volně/setřeseného kameniva (frakce 0/64)	36
Tabulka 7 Objemová hmotnost recyklátu z pneumatik (gumové noky)	38
Tabulka 8 Množství jednotlivých složek pro výrobu jednoho zkušební tělesa – Etapa 1	40
Tabulka 9 Výsledné pevnosti vláknobetonového vzorku z recyklátu.....	42
Tabulka 10 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva (frakce 0/32).....	47
Tabulka 11 Měrný povrch recyklovaného kameniva (frakce 0-32mm)	50
Tabulka 12 Množství jednotlivých složek pro betonový kompozit (množství na 1m ³) – Etapa 2.....	51
Tabulka 13 Zkušební trámce – přeměření.....	55
Tabulka 14 Zkušební krychle – přeměření.....	56
Tabulka 15 Pevnosti v tahu za ohybu	59
Tabulka 16 Výsledky tlakových zkoušek	62

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1 Charakterizující způsob, jak lze získat vhodný recyklát k výrobě mezerovitého vláknobetonu [2].....	26
Obrázek 2 Betonový recyklát [11].....	27
Obrázek 3 Asfaltový recyklát [10]	30
Obrázek 4 Cihelný recyklát [12]	31
Obrázek 5 Zrna vzduchem chlazené vysokopeční strusky [17]	32
Obrázek 6 Mezerovitý vláknobeton.....	32
Obrázek 7 Zkouška mezerovitosti setřeseného kameniva (pro frakci 0/64)	36
Obrázek 8 Recyklované pneumatiky – gumové noky	39
Obrázek 9 Detail vláknobetonového kompozitu s gumovými noky.....	41
Obrázek 10 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu – mezerovitý kompozit.....	41
Obrázek 11 Recyklované kamenivo frakce 0/32mm	45
Obrázek 12 Vibrační stůl – zkouška sytné hmotnosti setřeseného kameniva (frakce 0/32mm)	47
Obrázek 13 Měření objemové hmotnosti recyklátu v odměrném válci	48
Obrázek 14 Recyklát z pneumatik – detail gumových noků.....	49
Obrázek 15 Betonová směs s příměsí gumových granulátů.....	52
Obrázek 16 Hutnění zkušebního trámce	53
Obrázek 17 Betonový kompozit z recyklovaného kameniva – Etapa 2	53
Obrázek 18 Mezerovitý betonový kompozit – Etapa 2.....	54
Obrázek 19 Zkouška betonu v ohybu – hydraulický lis.....	57
Obrázek 20 Průhyb prvku a rozvoj trhliny	58
Obrázek 21 Zkouška pevnosti v tlaku na zkušební krychli	58
Obrázek 22 Zkoušení ztvrdlého betonu [27].....	59
Obrázek 23 Detail lomu zkušebního trámku	61
Graf 1 Produkce odpadu v ČR (databáze ČSU) [13]	18
Graf 2 Materiálové složení SDO v letech 2013 až 2018 (databáze ČSU) [13].....	21
Graf 3 Celková produkce a nakládání se SDO v letech 2013 až 2018 [13]	22

Graf 4 Produkce a nakládání se SDO vhodnými k recyklaci [13]	23
Graf 5 Záznam ze zkoušky čtyřbodovým ohybem na trámcích 150x150x700 mm [2]	33
Graf 6 Křivka zrnitosti recyklovaného kameniva (frakce 0/64)	37
Graf 7 Průběh zkoušky – tah za ohybu	42
Graf 8 Křivka zrnitosti recyklovaného kameniva frakce 0/32mm	46
Graf 9 Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu – Etapa 2, směs č. 1	60
Graf 10 Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu – Etapa 2, směs č. 2	61