

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



**Aplikace gumového granulátu jako
kameniva při výrobě lehčeného betonu**

**Application of scrap tire rubber-based
aggregate in lightweight concrete
production**

Autor: Bc. Vojtěch Bazgier
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bazgier Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 395657
Zadávající katedra: Materiálového inženýrství a chemie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Aplikace gumového granulátu jako kameniva při výrobě lehčeného betonu
Název diplomové práce anglicky: Application of Scrap Tire Rubber-Based Aggregate in Lightweight Concrete Production

Pokyny pro vypracování:

Diplomant provede nejprve podrobný rozbor současného stavu řešené problematiky. Stěžejní část práce se bude věnovat návrhu směsi lehčeného betonu, kde jako kamenivo bude uplatněn granulát pocházející z použitých pneumatik. Student provede návrh optimálního složení betonové směsi s ohledem na vylepšení tepelně-izolačních vlastností finální betonu, při zachování jeho dostatečné mechanické odolnosti. V rámci experimentálního testování připravených vzorků betonů s různým zastoupením lehčeného kameniva, provede diplomant komplexní stanovení jejich strukturálních, tepelných, vlhkostních a mechanických vlastností, na jejichž základě bude posouzena možnost uplatnění vyvinutých materiálů ve stavební praxi.

Seznam doporučené literatury:

Pavlíková, M., Pavlík, Z., Hošek, J.: Materiálové inženýrství 1, ČVUT v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04932-7.
Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, 2009., ISBN 978-80-87093-75-7.
Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005, ISBN 80-86769-39-9.
Wessel, J.K.: The Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs, Wiley-Interscience 2004, ISBN 978-0-471-45475-5.
Claisse, P.A.: Civil Engineering materials, Elsevier Ltd., 2016, ISBN 978-0-08-100275-9.
Illstone, J.M., Domone, P.L.J.: Construction materials - their nature and behaviour, CRC Press, 2010, ISBN 9781498759595.
Černý R., Rovnaníková P.: Transport Processes in Concrete, CRC Press 2002, ISBN 9781482289107.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto magisterskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce prof. Ing. Zbyška Pavlíka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Zbyškovi Pavlíkovi, Ph.D. a Ing. Martině Záleské za odborné vedení mé magisterské práce, trpělivost a vstřícnost při konzultacích a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Tato práce byla řešena v rámci projektů SGS17/166/OHK1/3T/11 a GAČR č.17-04215S s pomocí přístrojového vybavení získaného z podpory projektů MŠMT OPVVV: Obnova infrastruktury laboratoří Stavební fakulty ČVUT CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002526 a Vytvoření infrastruktury pro inovované doktorské studijní programy Fyzikální a materiálové inženýrství (CZ/ENG) CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002623.

Anotace:

Neustále zvyšující se produkce odpadních pneumatik představuje celosvětový problém. Ojeté pneumatiky mohou ohrožovat životní prostředí, pokud se s nimi nebude správně nakládat. Využití recyklátu z pneumatik jako částečné náhrady plniva v betonu může pozitivně ovlivnit jak životní prostředí, tak ekonomickou stránku výroby stavebních materiálů. Tato práce se zabývá betony s 10 %, 20 % a 30 % náhradou plniva gumovým granulátem. Experiment zhodnocuje vliv náhrady plniva gumovým granulátem na základní fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, vlhkostní vlastnosti lehčeného betonu a jeho chování při vystavení teplotám 150 °C, 200 °C, 300 °C a 400 °C. Použitím gumového granulátu se snížila hmotnost vzorků, došlo ke snížení mechanických parametrů a k velkému snížení tepelné vodivosti gumobetonu. Gumový granulát prakticky neměl vliv na parametry transportu kapalně vody, zatímco parametry transportu vodní páry se zvyšovaly s vyšším množstvím gumového granulátu. Výsledky vybraných parametrů při zatěžování vyššími teplotami ukázaly, že do 300 °C nedošlo k výraznějším změnám vlastností betonu vlivem gumového granulátu. Při vystavení realizovaných betonů teplotě 400 °C došlo k významným změnám testovaných vzorků, které byly v souladu s termogravimetrickou analýzou. Na základě získaných výsledků může být gumobeton zařazen jako lehký, nenosný materiál, který má přínos pro životní prostředí a hospodárnost.

Klíčová slova: *beton, pneumatika, odpad z pneumatik, gumový granulát gumobeton, strukturní vlastnosti, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, vlhkostní vlastnosti, zvýšené teploty.*

Abstract:

The still increasing production of waste tires is a global problem. Used tires can endanger the environment if not loaded properly. Recycling of used tires in civil engineering as aggregate substitute for concrete filler can positively affect the environment and the economic side. This study deals with concrete with 10 %, 20 % and 30 % replacement of rubber granulate filler. The experiment explores the effect of rubber granulate on the basic physical properties, mechanical properties, thermal properties, hygric properties and behavior after exposed to temperatures of 150 °C, 200 °C, 300 °C and 400 °C. Using the rubber granulate, the weight of the samples

decreased, the mechanical parameters were reduced and the gum conductivity was reduced dramatically. Rubber granulate almost did not influence the parameters of liquid water transport, while parameters of water vapor transport increased with higher amounts of rubber granulate. The results of the selected parameters at the higher temperature load showed that up to 300 ° C did not show any significant changes in the properties of the concrete due to the rubber granulate. When the concrete was exposed at 400 ° C, there were significant changes in the tested samples, which were in line with the thermogravimetric analysis. From the obtained results, the crumb rubber concrete, can be classified as a lightweight, non-bearing material having benefits to the environment and economy.

Keywords: *concrete, tire, waste tire, rubber granulate, crumb rubber concrete, structural properties, mechanical properties, thermal properties, hygric properties, elevated temperatures.*

Obsah

Seznam použitých symbolů	3
1 Úvod	5
2 Cíle práce	8
3 Odpad z pneumatik	9
3.1 Konstrukce pneumatiky	9
3.2 Zpracování pneumatik	13
3.2.1 Spalování pneumatik	13
3.2.2 Pyrolýza	13
3.2.3 Protektorování	13
3.2.3.1 Protektorování za tepla	13
3.2.3.2 Protektorování za studena	13
3.2.4 Mechanické drcení	14
3.2.5 Kryogenní drcení	14
3.3 Využití granulátu z pneumatik	14
3.3.1 Úpravy povrchů	15
3.3.2 Protihlukové prvky	16
3.3.3 Antivibrační výrobky	17
3.3.4 Gumový granulát jako náhrada plniva v betonu	18
4 Experimentální část	23
4.1 Použité materiály	23
4.1.1 Cement	23
4.1.2 Gumový granulát	23
4.1.3 Přírodní kamenivo	25
4.1.4 Voda	27
4.2 Příprava vzorků	27
4.3 Přehled realizovaných laboratorních zkoušek	30

4.3.1	Hustota matrice	30
4.3.2	Objemová hmotnost	31
4.3.3	Celková otevřená pórovitost	31
4.3.4	Pevnost v tahu za ohybu	31
4.3.5	Pevnost v tlaku	32
4.3.6	Modul pružnosti	32
4.3.7	Tepelné vlastnosti	33
4.3.8	Transport kapalné vody	34
4.3.9	Transport vodní páry	35
4.3.10	Tepelné zatížení	35
4.3.11	Optická mikroskopie	36
5	Experimentální výsledky	37
5.1	Hustota matrice	37
5.2	Objemová hmotnost	38
5.3	Celková otevřená pórovitost	39
5.4	Pevnost v tahu za ohybu	40
5.5	Pevnost v tlaku	42
5.6	Modul pružnosti	44
5.7	Tepelné vlastnosti	46
5.8	Transport kapalné vody	49
5.9	Transport vodní páry	51
5.10	Tepelné zatížení	52
5.11	Optická mikroskopie	59
	Závěr	63
	Literatura	65
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	71

Seznam použitých symbolů

ρ_{mat}	[kg/m ³]	hustota materiálu
ρ_V	[kg/m ³]	objemová hmotnost
m	[kg]	hmotnost
V	[m ³]	objem
ψ	[%]	pórovitost
f_{cf}	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
F	[N]	maximální zatížení
l	[mm]	vzdálenost mezi podpěrnými válečky
d_1, d_2	[mm]	rozměry příčného řezu
f_c	[MPa]	pevnost v tlaku
F_c	[N]	maximální zatížení
A	[m ²]	plocha průřezu
E_c	[MPa]	statický modul pružnosti v tlaku
σ_a	[MPa]	horní zatěžovací napětí
σ_b	[MPa]	základní napětí
ε_a	[-]	průměrné poměrné přetvoření při horním napětí
ε_b	[-]	průměrné poměrné přetvoření při základním napětí
λ	[W/(m·K)]	součinitel tepelné vodivosti
C_V	[J/(m ³ ·K)]	měrná objemová kapacita
S	[m/(s ^{1/2})]	sorptivita vody
A_w	[kg/(m ² ·s ^{1/2})]	absorpční koeficient pro vodu
ρ_w	[kg/m ³]	hustota vody
κ	[m ² /s]	součinitel vlhkostní vodivosti
w_{SAT}	[kg/m ³]	kapilární obsah nasycené vlhkosti
w_0	[kg/m ³]	počáteční obsah nasycené vlhkosti
D	[m ² /s]	součinitel difúze vodní páry
Δm	[kg]	množství páry difundující vzorkem
d	[m]	tloušťka vzorku
R	[J/(mol·K)]	univerzální plynová konstanta
T	[K]	absolutní teplota
t	[s]	časové období
M	[kg/mol]	molární hmotnost vody

Δp_p	[Pa]	rozdíl parciálních tlaků vodní páry
μ	[-]	faktor difúzního odporu
D_A	[m ² /s]	součinitel vodní páry ve vzduchu [m ² /s]

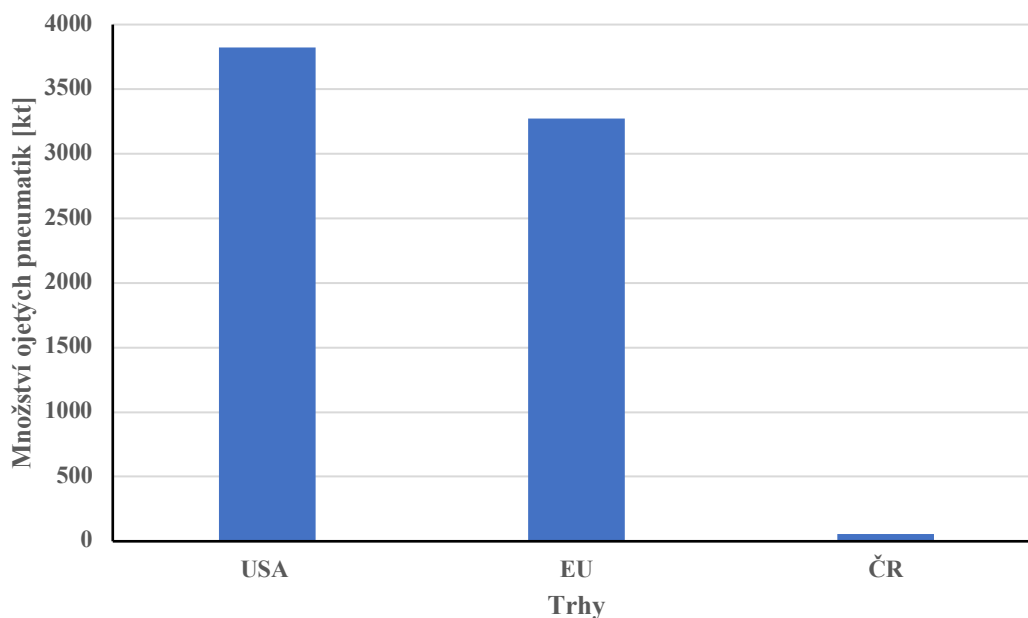
1 Úvod

Procesu nakládání s odpadem, který vede k jeho dalšímu využití, se říká recyklace. V tomto procesu jde o opětovné využití materiálu do výrobního cyklu. Nepoužitelný odpad se zpracovává na druhotnou surovinu, která se stává vstupní při další výrobě. Recyklace snižuje míru poškození životního prostředí, ale nechrání životní prostředí.

Recyklace je limitována následujícími faktory:

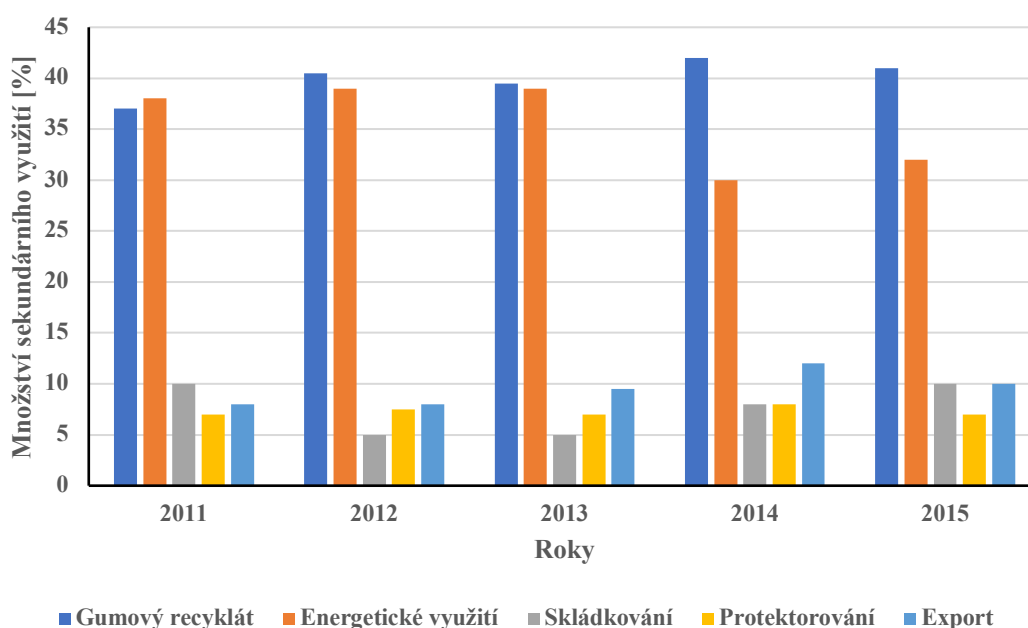
- finanční rentabilitou,
- technologií a materiály,
- trhem a obchodem,
- zátěží pro životní prostředí.

S celosvětovým nárůstem silniční dopravy, kdy se ročně vyrobí přibližně 17 milionů tun nových pneumatik [1], přichází problém, jak nakládat s ojetými pneumatikami. Množství ojetých pneumatik v roce 2010 v USA činilo 3824 kilotun [1], v Evropské Unii 3273 kilotun [2] a v České republice 57 kilotun [2]. Přehledné porovnání zobrazuje Obr. 1.



Obr. 1: Porovnání množství ojetých pneumatik v roce 2010 v USA, EU a ČR [1], [2].

Dříve se ojeté pneumatiky skládkovaly, dnes je tento způsob zakázaný. Sklárky pneumatik zabíraly velké množství plochy, která byla dále již bez využití a také často docházelo k požárům skládek, které uvolňovaly toxiny do ovzduší. Od ledna roku 2018 je možné bezplatně odevzdávat ojeté pneumatiky všech druhů v pneuservisech. Nejčastěji se ojeté pneumatiky likvidují jako alternativní palivo v cementárnách. Další možností je ojeté pneumatiky drtit a vzniklý gumový granulát využít jako sekundární surovinu pro nové výrobky. Přehledný vývoj nakládání s ojetými pneumatikami v Evropské Unii mezi lety 2011-2015 zobrazuje Obr. 2 [3].



Obr. 2: Vývoj nakládání s ojetými pneumatikami v EU [3]

Dnešním trendem je přidávat gumový recyklát jako modifikátor do asfaltových směsí, náhradu cementových kompozitů či jako přísadu do cementů. Celé pneumatiky se ve stavebnictví používají jako podložky těžkých břemen při transportu, nábřežní mola a nárazníky.

Proběhlo už mnoho experimentů, které se zabývaly náhradou přírodního kameniva gumovým granulátem v různém poměru. Gumový granulát jako náhrada přírodního kameniva v cementových kompozitech výrazně ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Výsledky ukazují významné poklesy pevností v tahu za ohybu, tlaku a snížení modulu pružnosti oproti běžným betonům. Proto je gumobeton užíván především na povrchové úpravy a nenosné konstrukce.

Dle publikovaných výsledků je zřejmé, že s vzrůstající náhradou přírodního kameniva gumovým granulátem dochází k výraznému poklesu tepelné vodivosti finálního betonu. To má samozřejmě vliv na energetickou náročnost budov, kde gumobetony mají potenciál k hospodárnosti.

2 Cíle práce

K vysoké produkci pneumatik patří také velké množství nepotřebných ojetých pneumatik. Cílem této práce je přiblížit problematiku těchto odpadů a nakládání s nimi. Práce se zaměřuje především na způsob zpracování pneumatik a jejich uplatnění jako sekundární suroviny ve stavebním průmyslu.

Cílem realizovaných experimentů je návrh a zhodnocení lehčeného betonu s částečnou náhradou běžného plniva. V testovaných betonových tělesech je nahrazeno 10 %, 20 % a 30 % hmotnosti těžného kameniva gumovým granulátem frakce 0/4 a 4/8. Dále je studována kombinace náhrady původního kameniva frakcemi 0/4 a 4/8 10 % a 20 % gumového granulátu.

3 Odpad z pneumatik

Způsobů, jak naložit s ojetými pneumatikami existuje mnoho, ale původní kaučuk z nich již nelze získat.

3.1 Konstrukce pneumatiky

Pneumatiky jsou vyráběny z více skupin materiálů, které mají specifické charakteristiky pro správnou funkčnost. Tyto charakteristiky jsou proměnné v závislosti na stáří, počasí a dalších vlivech.

V podstatě se jedná o jednotný soubor materiálů s odlišnými vlastnostmi. Výroba samotných částí musí být velmi přesná.

Vnitřní vložka

Jedná se o vnitřní vrstvu, která zajišťuje vzduchotěsnost, obdobně jako duše u starších typů pneumatik. Vnitřní vložka je znázorněna na Obr. 3.



Obr. 3: Vnitřní vrstva pneumatiky [4]

Vrstva kostry

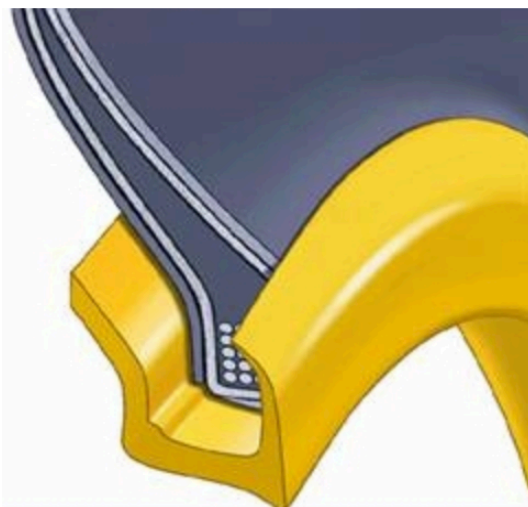
Kostru tvoří tenká textilní vlákna, která zajišťují odolnost proti tlaku. Vlákná jsou ukládána rovnoběžně vedle sebe a jsou zalita pryží. Vrstva kostry je znázorněna na Obr. 4.



Obr. 4: Vrstva kostry pneumatiky [4]

Patka pláště

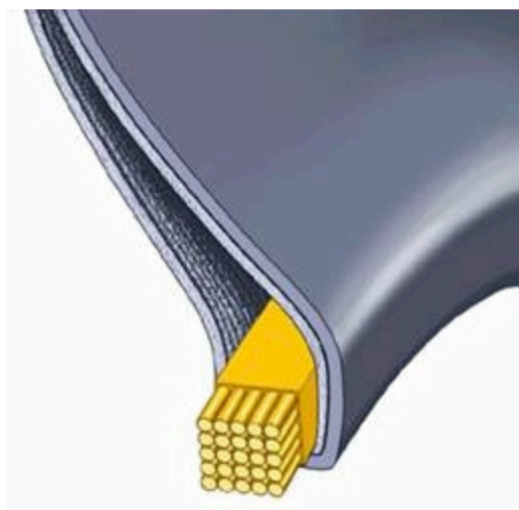
Konstrukce patky zabezpečuje přenos točivého momentu motoru a brzdou sílu z ráfku na styčnou plochu pneumatiky a vozovky. Patka pláště je znázorněna na Obr. 5.



Obr. 5: Patka pláště pneumatiky [4]

Patní lana

Vyztužují patku a pomáhají držet pneumatiku na ráfku. Patní lana jsou znázorněna na Obr. 6.



Obr. 6: Patní lana pneumatiky [4]

Pryžové bočnice

Část pneumatiky, která chrání plášť proti poškození nárazy. Nachází se v místě kontaktu pneumatiky a ráfku. Pryžové bočnice jsou znázorněny na Obr. 7.



Obr. 7: Bočnice pneumatiky [4]

Nárazníky

Jsou to jemná, pevná ocelová lana ležící mezi vrstvami pryže. Ty jsou přilepeny k sobě a k běhounu. Tyto nárazníky obklopují celou pneumatiku, a pomáhají odolávat tlakům při změně směru jízdy a nerovnostem vozovky. Nárazníky jsou znázorněny na Obr. 8.



Obr. 8: Nárazníky pneumatiky [4]

Běhoun

Jde o finální vzorkovanou část pneumatiky, která je ve spojení s vozovkou. Běhoun je připraven ze směsi tak, aby přilnul ke všem povrchům a zároveň odolával obroušení, opotřebení a zahřívání. Běhoun je znázorněn na obrázku Obr. 9.



Obr. 9: Běhoun pneumatiky [4]

3.2 Zpracování pneumatik

3.2.1 Spalování pneumatik

Nejrozšířenějším způsobem, jak se zbavit velkého množství pneumatik je v současné době energetické využití. Takto je zpracována až polovina ojetých pneumatik v Evropské Unii. Jako alternativní palivo ho velmi hojně využívají cementárny, spalovny a teplárny. Mnohé z těchto zařízení mohou pneumatiku spalovat vcelku, tudíž se nemusí drtit. Zbylé ocelové části jsou mechanicky odstraněny nebo se stanou součástí vyrobeného cementu [2].

3.2.2 Pyrolýza

Další metodou je pyrolýza. Jedná se o termický rozklad bez přístupu kyslíku, tedy v prostředí, kde nedochází k hoření. Pneumatika je rozdrčena a zbavena všech nečistot. Poté je řádně vysušená drť vložena do reaktoru, kde je pod teplotou minimálně 500 °C rozložena na plynnou část a pevný zbytek. Plynný produkt je odveden do chladiče. Nezkondenzovaná část se využívá jako zdroj energie pro reaktor nebo pro sušení drtě [5].

3.2.3 Protektorování

Jedná se o starší způsob, jak nakládat s ojetými pneumatikami. Princip je takový, že se z pneumatiky odstraní běhoun (dezén) popřípadě i ohebné pryžové bočnice a následně se aplikuje nová vrstva. Způsob nanesení nové běhounové směsi se dá provádět jak za tepla, tak i za studena [6].

3.2.3.1 Protektorování za tepla

Tento způsob se podobá výrobě nové pneumatiky. Na obroušený povrch kostry se nanese spojovací roztok, nová běhounová směs a pneumatika se vloží do lisu, kde je při tlaku 1,3-1,7 MPa a teplotě 140-150 °C vylisován nový dezén.

3.2.3.2 Protektorování za studena

Předem vylisovaná a vulkanizovaná běhounová směs se aplikuje na obroušený povrch kostry. Následně se v autoklávu při tlaku 450-600 kPa a teplotě 110-115 °C zvulkanizuje běhoun s kostrou.

3.2.4 Mechanické drcení

Prvním krokem je odstranění ocelové výztuže z pneumatik pomocí magnetických separátorů. Následně se takto zpracovaná pneumatika opakovaně drtí v různých drtičích až do požadované velikosti zrna. Tento granulát stále může obsahovat nežádoucí textilní složky, těch je možné se zbavit několika způsoby. Hojně používaná v provozech je kombinace třídění, kdy granulát prochází vibračními sítí a zároveň dochází k odsávání nežádoucího textilu. Další možností je elektrostatická separace, ta je ale velmi náročná na technologické vybavení a obsluhu. Podmínkou využití této metody jsou dokonale uvolněná textilní vlákna od gumového granulátu. Posledním způsobem, jak rozdělit granulát od textilu je využít kombinaci rozdrůžování ve fluidní vrstvě a vibrační techniky na nakloněné rovině. Tato metoda využívá rozdíl měrné hmotnosti, tvarové charakteristiky a absolutní hmotnosti gumové a textilní složky [7].

3.2.5 Kryogenní drcení

U této metody dochází ke zchlazení pneumatiky tekutým dusíkem pod teplotu zeskelnění, což je u pryže $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté se pneumatika stává křehkou, je snazší ji drtit. Během tohoto procesu se také vyseparují ocelové a textilní složky pneumatiky, následně se granulát rozdělí podle velikosti částic [5].

3.3 Využití granulátu z pneumatik

Gumový granulát na obrázku Obr. 10 zatím není v České republice definován žádnou normou, a tak se ustalují názvy podle výsledné velikosti částic. Největším se říká chipsy nebo řízky, ty mohou obsahovat jak textilní, tak ocelová vlákna. Nejčastěji se využívají pro energetické využití. Velikost chipsů se pohybuje okolo 100 mm. Granulát střední velikosti se označují jako floky a noky. Ty obsahují podstatně méně textilu a oceli. Noky jsou běžně velikosti 10 až 50 mm a floky 50 až 100 mm. Nejmenším částicím se říká gumový granulát, který je také nejčastěji využíván v oblasti stavebnictví. Maximální velikost zrna je 10 mm.



Obr. 10: Granulát z recyklovaných pneumatik [5]

3.3.1 Úpravy povrchů

Využití gumového granulátu se v poslední době rozšířilo v použití k finální úpravě povrchů, jak je možné vidět na obrázku Obr. 11. Soudržný podklad musí být zbaven veškerých nečistot, mastnot, prachu a vlhkosti. Jako podkladní materiál většinou slouží beton, asfalt, kov nebo zhutněný kámen. Na takový podklad se již pokládá gumový granulát, který je dobře promíchán s pojivem, aby nedošlo k odlepování gumového povrchu. Podlahy s gumovým povrchem tlumí pády a také mají zlepšené protiskuzové vlastnosti. Takové povrchy se často uplatňují na dětských hřištích, k úpravám železničních nástupišť, přechodů a dopravních ploch. Mezi hlavní výhody těchto povrchů patří [8], [9]:

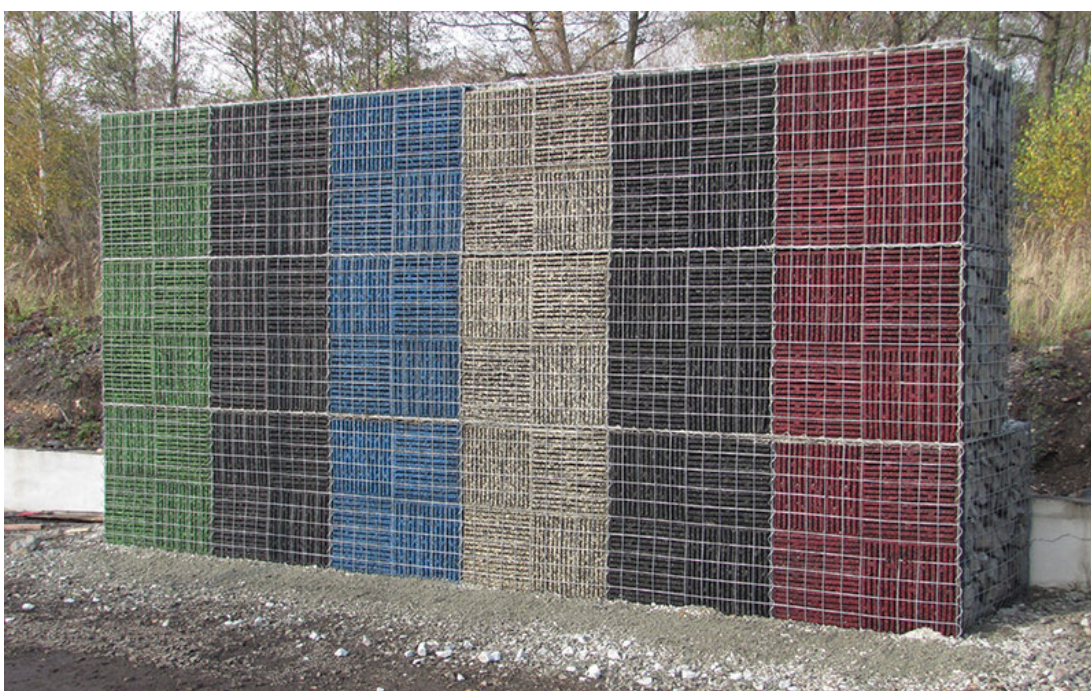
- designová a tvarová rozmanitost,
- zmírnění následků pádů,
- protiskluznost,
- mrazuvzdornost,
- čistitelnost,
- rychlost vytvrzení,
- vodě propustnost,
- odolnost proti běžným chemikáliím,
- odvádění vody z povrchu.



Obr. 11: Lávka v Karlových Varech [10]

3.3.2 Protihlukové prvky

Velmi často se gumový granulát využívá v podobě desek, které jsou připevňovány ke konstrukci protihlukových stěn pro snížení hluku z komunikací (Obr. 12). Velkou výhodou je velká škála provedení charakteru povrchu, které zvyšují zachycení hluku, a tak eliminují jeho odraz [9].



Obr. 12: Protihluková stěna [11]

Ve spolupráci Fakulty stavební ČVUT v Praze s firmou Monstav CZ byla vyvinuta protihluková clona zobrazena na Obr. 13, která je vyrobena jako samostatný konstrukční materiál. Clona je vyvinuta na základě konkrétních urbanistických nároků a uzpůsobení tramvajových souprav. Dalším důvodem vývoje clony je bezpečnostní faktor, kdy je v mnohých případech nutná rychlá demontáž při zásazích záchranářských složek při vyprošťování zraněných nebo zaklíněných osob [9].

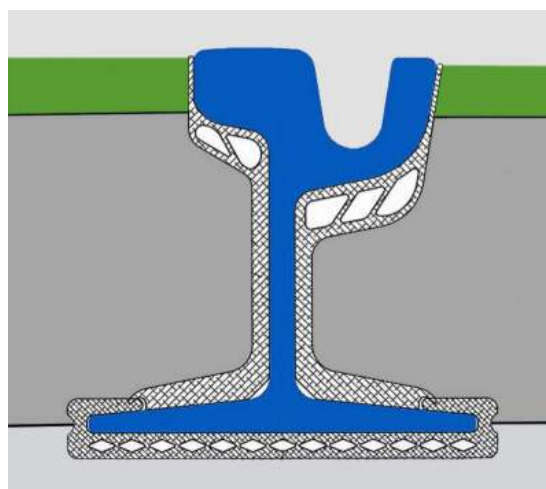


Obr. 13: Protihluková clona v Pražské části Hloubětín [12]

3.3.3 Antivibrační výrobky

Mezi rozšířené výrobky z gumového granulátu patří antivibrační rohože a bokovnice. Tyto produkty se používají zejména v dopravních stavbách a za hlavní úkol mají omezit šíření vibrací do okolí.

Bokovnice na Obr. 14 slouží jako elastické uložení kolejnic. Takto uložená kolejnice má delší životnost díky stejnoměrnějšímu rozdělení vertikálních sil od pojížděcích souprav. Je dokonale izolována a minimalizuje účinky bludných proudů a snižuje jízdou vzniklé vibrace a zemní hluk [9], [13].



Obr. 14: Bokovnice [13]

Antivibrační rohože na Obr. 15 se také úspěšně uplatňují v průmyslu jako podkladová nebo dilatační vrstva, či jako mezivrstva mezi zdrojem vibrací a stavbou. Jsou vyráběny standardně v tloušťkách 20 až 40 mm. Půdorysné rozměry jsou individuální podle výrobce a konkrétního použití. Aplikovány jsou lepením, mechanickým upevněním ke konstrukci, volně pokládány nebo mohou být zality čerstvým betonem [9], [14], [15].



Obr. 15: Antivibrační rohož [11]

3.3.4 Gumový granulát jako náhrada plniva v betonu

Náhradou plniva gumovým granulátem v cementových kompozitech se začala zabývat různá pracoviště již v 90. letech minulého století. V experimentech se připravovaly různé variace směsí. Gumový granulát a gumové chipsy nahrazovaly hmotnostní nebo objemovou složku jemného, hrubého plniva, či dokonce cementu. Na vzorcích byly prováděny zkoušky zejména k zjištění, jak gumový granulát ovlivňuje pevnostní charakteristiky a tepelné vlastnosti betonu.

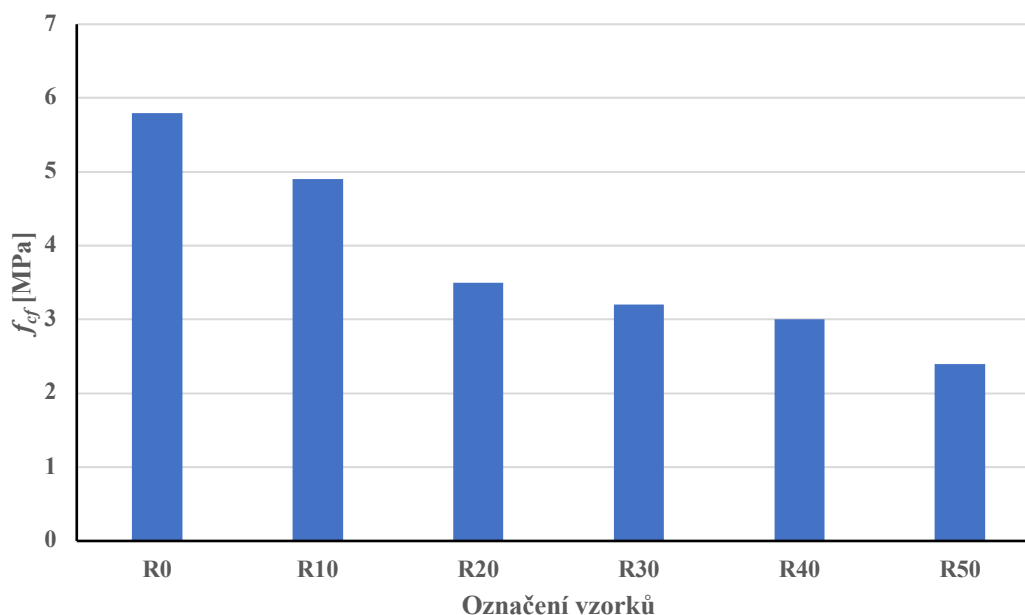
V Tab. 1 jsou uvedeny receptury vzorků experimentu realizovaném Youssfem, Hassanlim a Millsovou, kde gumový granulát nahrazoval objemové množství písku z 10, 20, 30, 40 a 50 %. Zkoušky byly provedeny na válcích o rozměrech 150 × 300 mm a jejich výsledky jsou shrnuty v Tab. 2. Srovnání pevnosti v tahu za ohybu zobrazuje Obr. 16, pevnost v tlaku Obr. 17 a modul pružnosti Obr. 18 [16].

Tab. 1: Receptura studovaných betonů [16]

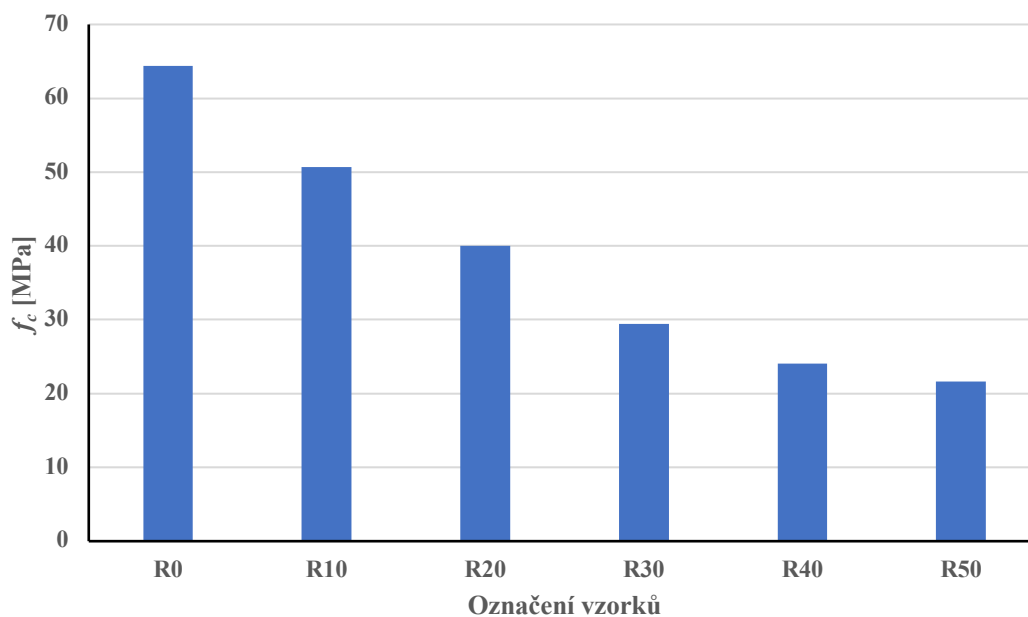
Označení směsí	Množství [kg/m ³]						
	Cement	Písek	Kamenivo 10 mm	Kamenivo 20 mm	Guma	Voda	Plastifikátor
R0	360	892	321	750	-	144	10,2
R10	360	803	321	750	28,6	144	9,7
R20	360	714	321	750	57,2	144	9,4
R30	360	624	321	750	85,8	144	9,3
R40	360	535	321	750	114,4	144	9,3
R50	360	446	321	750	143,0	144	9,3

Tab. 2: Mechanické vlastnosti studovaných betonů [16]

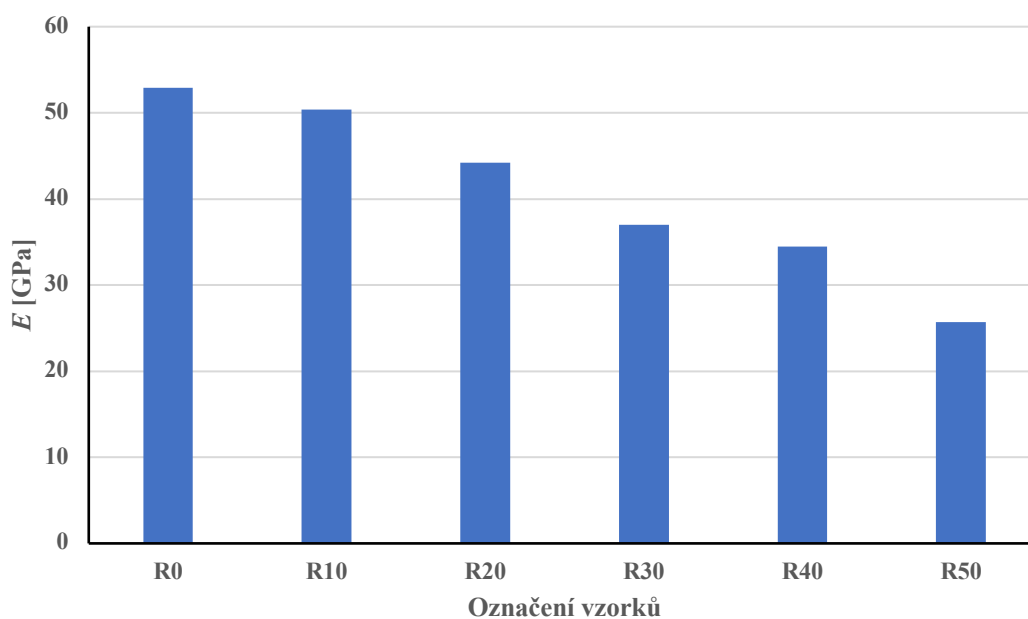
Označení směsí	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
R0	2541	5,8	64,4	52,9
R10	2531	4,9	50,7	50,4
R20	2487	3,5	40,0	44,2
R30	2451	3,2	29,4	37,0
R40	2423	3,0	24,1	34,5
R50	2365	2,4	21,6	25,7



Obr. 16: Porovnání pevnosti tahu za ohybu referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem [16]



Obr. 17: Porovnání pevnosti v tlaku referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem [16]



Obr. 18: Porovnání modulu pružnosti referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem [16]

Tento experiment realizovaný Youssfem, Hassanlim a Millsovou [16] zkoumal především mechanické vlastnosti šesti směsí gumobetonu s náhradou písku až 50 % gumovým granulátem. Z výsledku je patrné, že s vyšší náhradou gumovým

granulátem se snižovala pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a také modul pružnosti.

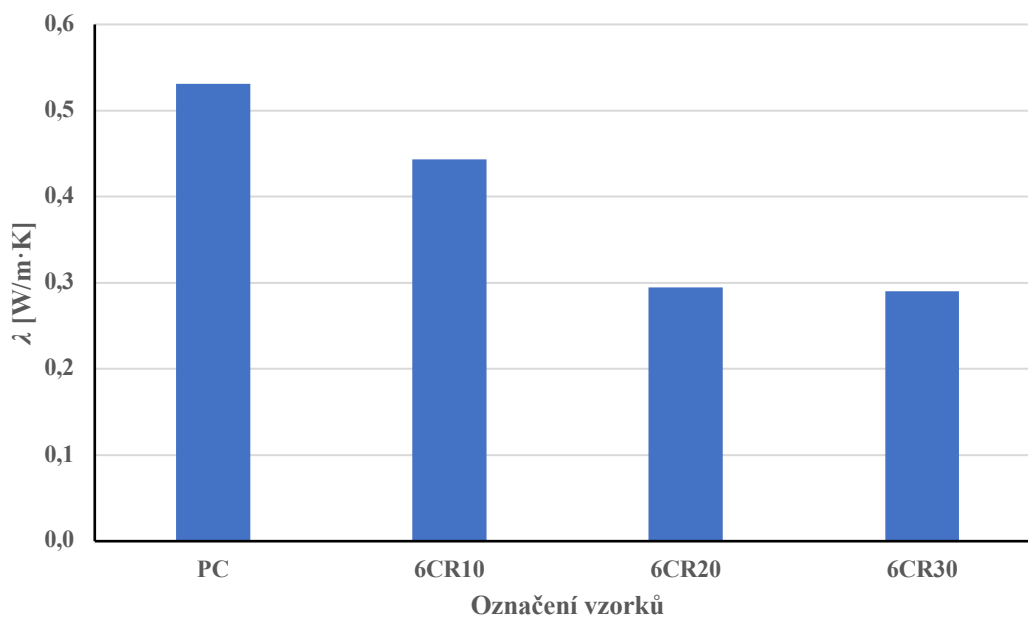
V Tab. 3 jsou uvedeny receptury vzorků experimentu Sukontasukkulihlo, kde gumový granulát nahrazuje hmotnostní množství lehkého kameniva z 10, 20 a 30 %. Zkoušky byly prováděny na zkušebních tělesech o rozměrech $300 \times 300 \times 25,4$ mm a jsou shrnuty v tabulce Tab. 4. Srovnání součinitele tepelné vodivosti zobrazuje obrázek Obr. 19 [17].

Tab. 3: Receptura studovaných betonů [17]

Označení směsí	Množství [kg/m ³]				
	Cement	Jemné kamenivo	Hrubé kamenivo	Guma	Voda
PC	478,8	783,9	741,5	-	225
6CR10	478,8	705,5	741,5	78,4	225
6CR20	478,8	627,1	741,5	156,8	225
6CR30	478,8	548,7	741,5	235,2	225

Tab. 4: Součinitel tepelné vodivosti studovaných betonů [17]

Označení směsí	λ [W/m·K]
PC	0,53
6CR10	0,44
6CR20	0,30
6CR30	0,29



Obr. 19: Porovnání součinitele tepelné vodivosti referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem [17]

Z výsledku experimentu Sukontasukkulise [17] je zřejmé, že betony s náhradou jemného plniva gumovým granulátem vykazují daleko nižší součinitele tepelné vodivosti s rostoucím zastoupením gumového granulátu.

4 Experimentální část

Cílem experimentu bylo navrhnout a zhodnotit lehčený beton s částečnou náhradou běžného plniva (písek, jemné přírodní kamenivo) gumovým granulátem z recyklovaných pneumatik.

4.1 Použité materiály

4.1.1 Cement

Jako pojivo pro recepturu byl zvolen cement C II/A-S 52,5 N s chemickým složením uvedeným v Tab. 5.

Tab. 5: Chemické složení a mechanické vlastnosti cementu

SO ₃	3,1 %
Na ₂ O	0,75 %
CL	0,05 %
C ₃ A	10-11 %
Hustota matrice	3060 kg/m ³
Měrný povrch	480 m ² /kg

4.1.2 Gumový granulát

Na gumovém granulátu frakce 0/4 a frakce 4/8 byla zkoušena hustota matrice (viz kapitola 4.3.1.). Hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 6. Dále byly zjišťovány tepelné vlastnosti a sypná hmotnost v závislosti na době setřásání (viz kapitola 4.3.7). Hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 7 a Tab. 8. Obě frakce byly podrobeny síťovému rozboru dle normy ČSN EN 933-1 [18]. Křivky zrnitosti jsou vidět na Obr. 20 a Obr. 21.

Tab. 6: Hustota matrice gumového granulátu

Označení	Hustota matrice [kg/m ³]
granulát 0/4	1150
granulát 4/8	1170

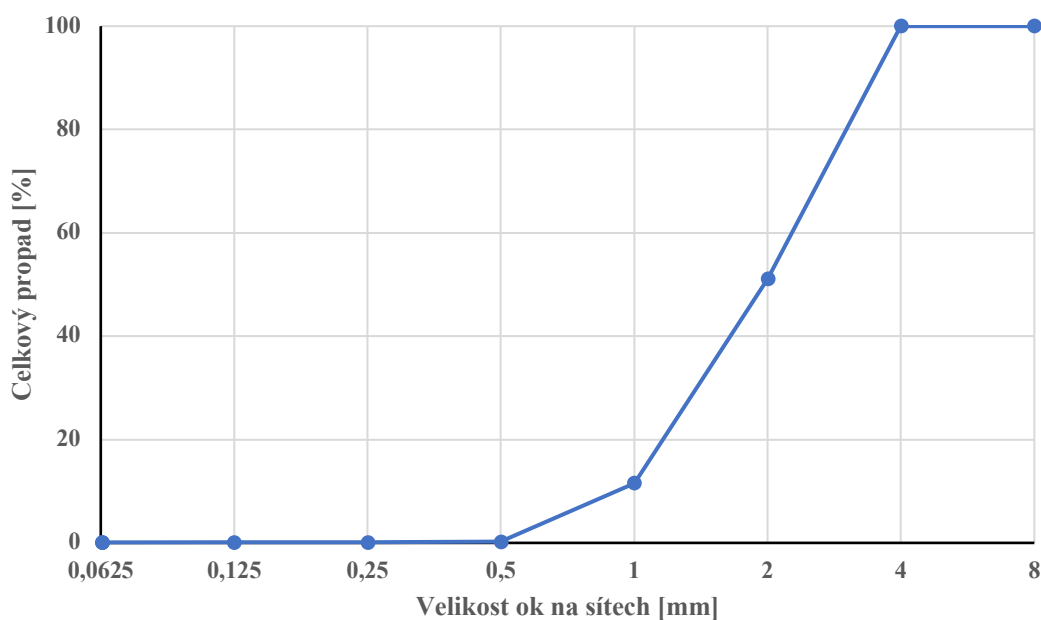
Hustota matrice přibližně odpovídá hodnotám experimentu Zhua, Ronga, Xieho a Yanga [19].

Tab. 7: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost gumového granulátu frakce 0/4

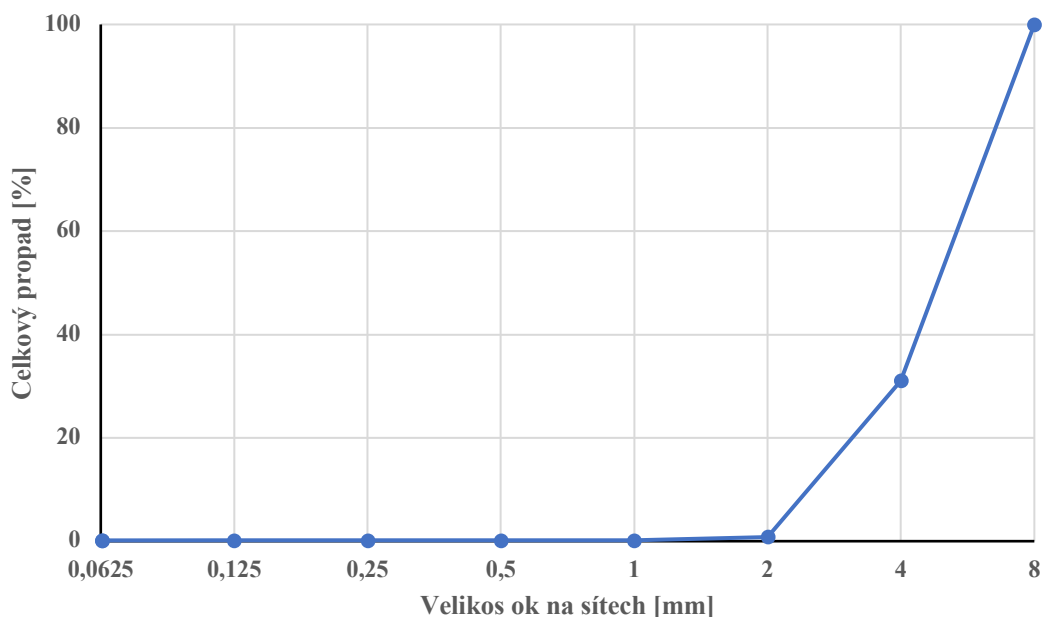
Doba setřásání [s]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	$C_v \cdot 10^6$ [J/(m ³ ·K)]	$a \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
0	0,00094	0,43994	468	0,0926	0,3261	0,284
10	0,00090	0,43994	489	0,0941	0,3604	0,261
20	0,00087	0,43994	506	0,0953	0,3796	0,251
30	0,00086	0,43994	512	0,0989	0,3917	0,252
60	0,00085	0,43994	518	0,0991	0,4036	0,246
180	0,00084	0,43994	524	0,1004	0,4122	0,244

Tab. 8: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost gumového granulátu frakce 4/8

Doba setřásání [s]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	$C_v \cdot 10^6$ [J/(m ³ ·K)]	$a \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
0	0,00095	0,42293	445	0,0951	0,2580	0,368
10	0,00092	0,42293	460	0,0954	0,2542	0,375
20	0,00091	0,42293	465	0,0957	0,2558	0,374
30	0,00091	0,42293	465	0,0958	0,2589	0,370
60	0,00091	0,42293	465	0,0958	0,2589	0,370
180	0,00091	0,42293	465	0,0963	0,2623	0,367



Obr. 20: Zrnitostní křivka granulátu frakce 0/4



Obr. 21: Zrnitostní křivka granulátu frakce 4/8

Z výsledků můžeme vidět, že gumový granulát vykazoval výrazně nižší parametry přenosu tepla než použité přírodní kamenivo (viz kapitola 4.1.3). Proto je také výrazně nižší objemová tepelná kapacita u gumového granulátu než u přírodního kameniva. S přibývajícím časem hutnění byl postupně ze vzorků vytlačován vzduch, což vedlo ke zvýšení jak tepelné vodivosti, tak objemové tepelné kapacity.

4.1.3 Přírodní kamenivo

Na kamenivu těženém v Dobříni frakce 0/4 a frakce 4/8 byla zkoušená hustota matrice (viz kapitola 4.3.1). Hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 9. Dále byly zjišťovány tepelné vlastnosti a sypná hmotnost v závislosti na době setřásání (viz kapitola 4.3.7). Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10 a Tab. 11. Obě frakce byly podrobeny síťovému rozboru dle normy ČSN EN 933-1 [18]. Zrnitostní křivky jsou vidět na Obr. 22 a Obr. 23.

Tab. 9: Hustota matrice těženého kameniva

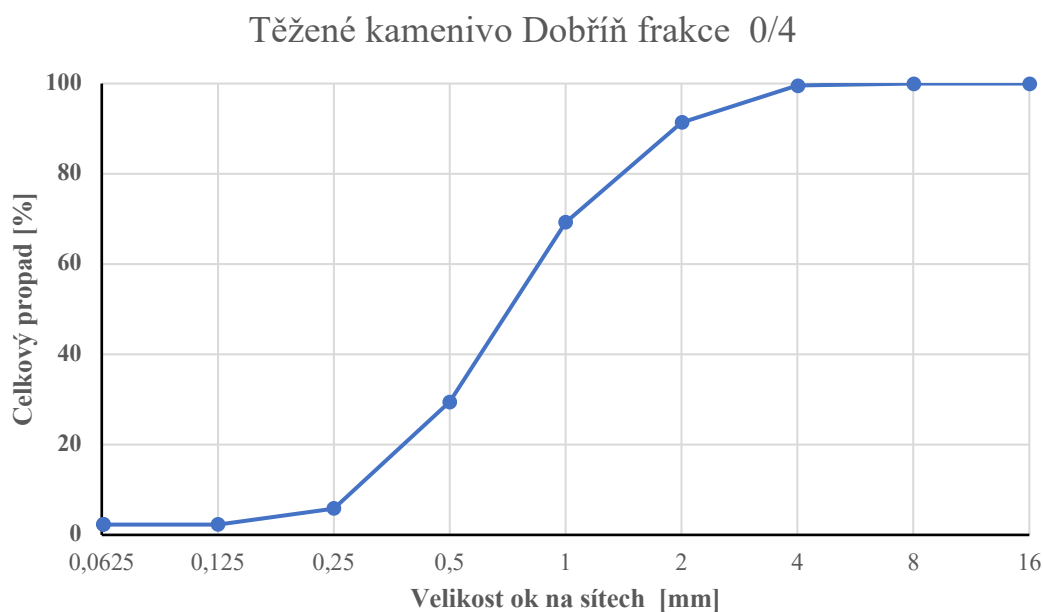
Označení	Hustota matrice [kg/m ³]
kamenivo 0/4	2650
kamenivo 4/8	2660

Tab. 10: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost těžného kameniva frakce 0/4

Doba setřásání [s]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	$C_v \cdot 10^6$ [J/(m ³ ·K)]	$a \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
0	0,00083	0,13314	160	0,3060	1,5220	0,201
10	0,00075	0,13314	178	0,3900	1,5610	0,249
20	0,00075	0,13314	178	0,3990	1,5700	0,253
30	0,00075	0,13314	178	0,3990	1,5700	0,253
60	0,00075	0,13314	178	0,3990	1,5700	0,253
180	0,00074	0,13314	180	0,4030	1,5760	0,258

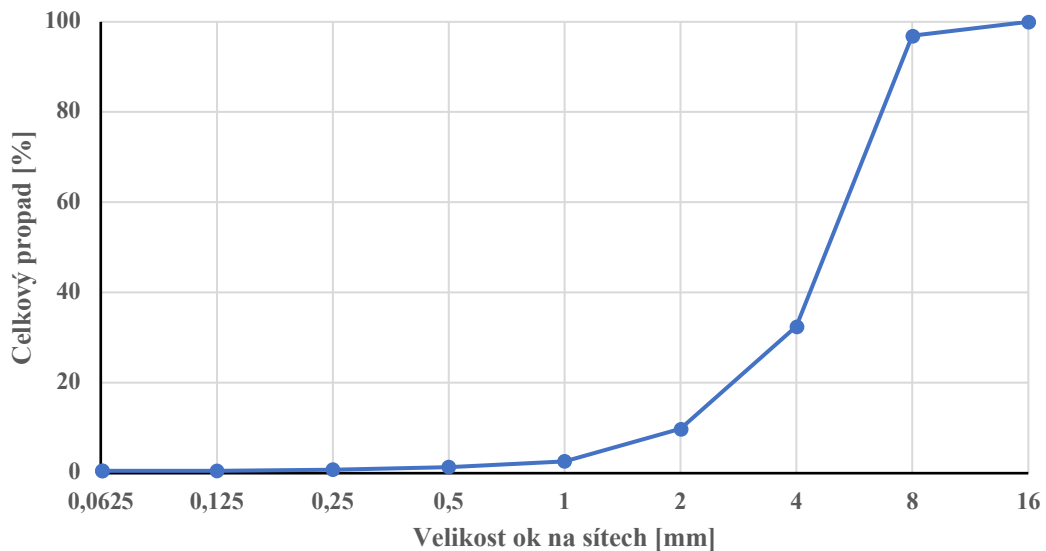
Tab. 11: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost těžného kameniva frakce 4/8

Doba setřásání [s]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	$C_v \cdot 10^6$ [J/(m ³ ·K)]	$a \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
0	0,00082	0,11543	141	0,3153	1,4040	0,225
10	0,00075	0,11543	154	0,3479	1,4195	0,245
20	0,00073	0,11543	158	0,3693	1,4432	0,256
30	0,00073	0,11543	158	0,3693	1,4432	0,256
60	0,00073	0,11543	158	0,3693	1,4432	0,256
180	0,00072	0,11543	160	0,3878	1,4260	0,272



Obr. 22: Zrnitostní křivka těžného kameniva frakce 0/4

Těžené kamenivo Dobříň frakce 4/8



Obr. 23: Zrnitostní křivka těženého kameniva frakce 4/8

Hodnoty parametrů přenosu tepla přírodního kameniva byly výrazně vyšší než pro gumový granulát (viz kapitola 4.1.2). Tudiž i hodnoty objemové tepelné kapacity přírodního kameniva jsou vyšší než u gumového granulátu. S přibývajícím časem hutnění byl postupně ze vzorků vytlačován vzduch, což vedlo ke zvýšení jak tepelné vodivosti, tak objemové tepelné kapacity.

4.1.4 Voda

Při výrobě betonu je nejobyčejnější složkou voda. Je nutné použít nezávadnou vodu, která není agresivní (síranová) nebo hladová (nedostatek interních solí). Takto závadná voda by mohla ohrozit průběh hydratace, následně životnost a trvanlivost cementové matrice. Nejvhodnější je použít pitnou vodu, která byla také použita v této práci.

4.2 Příprava vzorků

Referenční směs byla navržena dle zjednodušeného poměru 1:2:3 (voda: pojivo: plnivo) s označením Ref. Další receptury betonu s příměsí gumového granulátu vycházející z referenční směsi byly připraveny takto:

P4-10 náhrada písku frakce 0/4 granulátem frakce 0/4 o hmotnosti 10 % z celkové hmotnosti plniva,

P4-20	náhrada písku frakce 0/4 granulátem frakce 0/4 o hmotnosti 20 % z celkové hmotnosti plniva,
P4-30	náhrada písku frakce 0/4 granulátem frakce 0/4 o hmotnosti 10 % z celkové hmotnosti plniva,
P8-10	náhrada drobného kameniva frakce 4/8 granulátem frakce 4/8 o hmotnosti 10 % z celkové hmotnosti plniva,
P8-20	náhrada drobného kameniva frakce 4/8 granulátem frakce 4/8 o hmotnosti 20 % z celkové hmotnosti plniva,
P8-30	náhrada drobného kameniva frakce 4/8 granulátem frakce 4/8 o hmotnosti 30 % z celkové hmotnosti plniva,
P4+P8-10	náhrada písku frakce 0/4 granulátem frakce 0/4 a stejná náhrada drobného kameniva frakce 4/8 granulátem frakce 4/8 o hmotnosti 10 % z celkové hmotnosti plniva,
P4+P8-20	náhrada písku frakce 0/4 granulátem frakce 0/4 a stejná náhrada drobného kameniva frakce 4/8 granulátem frakce 4/8 o hmotnosti 20 % z celkové hmotnosti plniva.

Takto připravenou směsí se vyplnily předem vymazané formy krychlí o hraně 100 mm, trámců o rozměrech 40 × 40 × 160 mm a kvádrů o rozměrech 100 × 100 × 20 mm. Ošetření probíhalo podle normy ČSN EN 12390-2 [18], a to tak, že prvních 24 hodin byly vzorky umístěny v prostředí s vlhkostí minimálně 50 %. Následně byly vzorky odbedněny a uloženy do vodní lázně, kde byly ponechány po následujících 28 dní. Na takto připravených a ošetřených zkušebních tělesech se prováděly zkoušky a ověření. Přehled receptur je uveden v Tab. 12.

Tab. 12: Receptura směsí

Označení směsí	Množství [g]						w
	Cement 52,5	Písek 0/4	Drobné kamenivo 4/8	Guma 0/4	Guma 4/8	Voda	
Ref	450	675	675	-	-	225	0,5
P4-10	450	540	675	135	-	225	0,5
P4-20	450	405	675	270	-	225	0,5
P4-30	450	270	675	405	-	225	0,5
P8-10	450	675	540	-	135	225	0,5
P8-20	450	675	405	-	270	225	0,5
P8-30	450	675	270	-	405	225	0,5
P4+P8-10	450	607,5	607,5	67,5	67,5	225	0,5
P4+P8-20	450	540	540	135	135	225	0,5

4.3 Přehled realizovaných laboratorních zkoušek

Na zkušebních trámečcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm, krychlích o hraně 100 mm a kvádrech o rozměrech $100 \times 100 \times 20$ mm byly provedeny následující zkoušky a ověření pro získání vybraných strukturních, mechanických, tepelných a vlhkostních vlastností:

- stanovení hustoty matrice,
- stanovení objemové hmotnosti,
- stanovení celkové pórovitosti,
- stanovení pevnosti tahu za ohybu,
- stanovení pevnosti v tlaku,
- stanovení modulu pružnosti,
- měření tepelných parametrů materiálů,
- stanovení parametrů transportu kapalné vody,
- stanovení parametrů transportu vodní páry,
- tepelná stabilita,
- optická mikroskopie.

4.3.1 Hustota matrice

Hustota materiálu byla měřena pomocí přístroje Pycnomatic ATC (Thermo-Scientific). Zařízení využívá nej přesnější metodu pomocí hélia, které díky velmi malým atomům může prostoupit velmi malými póry. Pycnomatic ATC (Thermo-Scientific) je zařízení s integrovanou kontrolou teploty s přesností $\pm 0,01$ °C a reálným analyzátozem hustoty s více objemy. Přístroj má rozlišení tlaku 0,001 kPa, reprodukovatelnost při měření objemu vzorku byla 0,01 % při 20 °C a typická přesnost stanovení objemu vzorku byla 0,01 % při 20 °C.

Postup měření byl následující. Zvážený a vysušený vzorek byl vložen do zkalibrované nádoby známého objemu. Do referenční nádoby bylo pod tlakem vpuštěno helium, které bylo následně vpuštěno do měřicí nádoby, kde byl průběžně zaznamenáván tlak. Po ustálení tlaku, byl ze zjištěných hodnot objemu referenční a měřicí nádoby určen rozdíl tlaků a stanovena přístrojem Pycnomatic ATC(Thermo-Scientific) hustota matrice materiálu.

V přístroji byly měřeny jak jednotlivé složky receptury, tak i zhotovené vzorky. Měření probíhalo na třech vzorcích z každé betonové směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota stanovení hustoty matrice byla 3,5 %.

4.3.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena výpočtem dle normy ČSN EN 12390-7 [20] ze změřených skutečných rozměrů. Vzorky byly vloženy do vakuové sušárny s konstantní teplotou 60 °C a byly průběžně kontrolovány až do ustálení jejich hmotnosti. Poté byl stanoven objem z průměru třech měření všech stran vzorku. Objemová hmotnost byla vypočítána ze tří krychlí každé směsi a tří trámečků každé směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota stanovení objemové hmotnosti byla 2,4 %. Objemová hmotnost byla vypočtena dle vztahu (1)

$$\rho_v = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

kde ρ_v je objemová hmotnost, m hmotnost a V objem.

4.3.3 Celková otevřená pórovitost

Jde o póry, které tvoří část z celkové pórovitosti. Tyto póry tvoří soustavu prostorových dutinek, které jsou vyplněny plyny nebo kapalinami. Otevřené póry mohly vzniknout únikem plynů ve fázi výroby, postupným odpařováním vody z materiálů. Jelikož jsou otevřené póry v kontaktu s prostředím, mohly vzorky do svého objemu přijímat vodu tak i vzdušnou vlhkost. Otevřené póry mají vliv na:

- mechanické vlastnosti,
- tepelné vlastnosti,
- transport kapalné vody,
- transport vodní páry.

Otevřená pórovitost byla vypočtena dle rovnice (2)

$$\psi = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{mat}}, \quad (2)$$

kde ψ je otevřená pórovitost, ρ_v objemová hmotnost a ρ_{mat} hustota materiálu.

Pórovitost byly vypočítána jako průměr z měření na třech vzorcích každé směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota stanovení otevřené pórovitosti byla 3,5 %.

4.3.4 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena třibodovou zkouškou na tělesech o rozměrech 40 × 40 × 160 mm dle normy ČSN EN 12390-5 [21]. Zkušební trámečky se do lisu ukládaly kolmo na směr plnění ve stáří 28 dní, poté byly namáhány ohybovým momentem pomocí horního zatěžovacího a dvou dolních zatěžovacích

váleků. Trámečky se zatěžovaly rovnoměrně zvyšující se rychlostí 50 ± 10 N/s. Výsledkem jsou hodnoty síly F , při které došlo k porušení tělesa. Tímto vzniklé půlky vzorků se uschovaly pro pozdější zkoušky pevnosti v tlaku. Pro výpočet pevnosti tahu za ohybu se použily hodnoty síly F podle vztahu (3)

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

kde f_{cf} je pevnost v tahu za ohybu, F maximální zatížení, l vzdálenost mezi podpěrnými válečky a d_1 a d_2 rozměry příčného řezu.

Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly stanoveny na třech trámečcích každé směsi. Relativní rozšířená nejistota zkoušek pevnosti za ohybu byla 1,4 %.

4.3.5 Pevnost v tlaku

Měření pevnosti v tlaku bylo provedeno na krychlích o hraně 100 mm a zlomcích trámečků, které vznikly porušením při zatěžovacích zkouškách pevnosti tahu za ohybu. Tělesa byla vycentrována na destičkách hydraulického lisu, následně byla plynule zatěžována až do jejich porušení. Výsledkem jsou hodnoty síly F_c . Pevnost v tlaku krychlí byla vypočtena podle vztahu (4)

$$f_c = \frac{F_c}{A}, \quad (4)$$

kde f_c je pevnost v tlaku, F_c maximální zatížení a A plocha průřezu.

Byla také realizována zkouška stanovení pevnosti v tlaku na zlomcích trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu dle normy ČSN EN 12390-3 [23], kde zatěžovací plocha byla 40×40 mm dle vztahu (5)

$$f_c = \frac{F_c}{40 \cdot h}, \quad (5)$$

kde f_c je pevnost v tlaku, F_c maximální zatížení a h výška průřezu.

Hodnoty pevnosti v tlaku byly stanoveny na třech krychlích každé směsi a třech trámečcích každé směsi. Relativní rozšířená nejistota zkoušek pevnosti v tlaku byla 1,4 %.

4.3.6 Modul pružnosti

Zkouška modulu pružnosti dle normy ČSN EN 12390-13 [24] je založena na metodě, která stanovuje hodnotu sečnového statického modulu pružnosti při opakovaném plynulém zatěžování zkušebního trámečku o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm dostředným tlakem ze základního zatěžovacího stavu při vyvolaném napětí 0,5 MPa na vrchní zatěžovací napětí ve výši jedné čtvrtiny již známe hodnoty

pevnosti betonu v tlaku v souladu s normou 12390-3 [23]. Hlavním účelem tohoto uspořádání bylo zjistit, zda se hodnoty pohybovaly v lineární zóně.

V průběhu změn zatěžovacích stavů se předepsaným postupem pomocí tenzometrů zaznamenávají deformace betonu v čase jejich ustálení na určených zatěžovacích stavech. Statický modul pružnosti v tlaku E_c získáme pomocí rovnice (6)

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}, \quad (6)$$

kde E_c je statický modul pružnosti v tlaku, σ_a horní zatěžovací napětí rovné přibližně jedné třetině pevnosti betonu v tlaku f_c , σ_b základní napětí rovné 0,5 MPa, ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí a ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním napětí.

Hodnoty modulu pružnosti byly stanoveny ze tří trámeček každé směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota testu byla 1,8 %.

4.3.7 Tepelné vlastnosti

U vzorků byly zkoumány vybrané termofyzikální veličiny:

- součinitel tepelné vodivosti,
- objemová tepelná kapacita.

Pro měření byl použit přístroj ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.). Jedná se o mikroprocesorem řízený ruční přístroj pro přímé měření součinitele tepelné vodivosti, měrné objemové tepelné kapacity, součinitele teplotní vodivosti a teploty kompaktních, sypkých a kapalných materiálů pomocí plošných nebo jehlových sond. Tyto sondy obsahují zabudovanou paměť, ve které jsou uloženy její kalibrační konstanty.

Měření je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku generovaného do zkoumaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v odporu sondy, která je tepelně vodivě spojená se zkoumaným materiálem. Teplota odporu se snímá polovodičovým snímačem. Průběh teploty jako funkce času se v diskrétních bodech vzorkuje a těmito vzorky se prokládají regresní polynomy metodou „nejmenších čtverců“. Koeficienty regresních polynomů slouží k výpočtu termofyzikálních parametrů pomocí analytických vztahů.

Tak jako všechny přístroje i tento má svou přesnost měření. Pro součinitele tepelné vodivosti je přesnost měření 5 % čtení + 0,001 W/(m·K) v rozsahu 0,015

až 0,7 W/(m·K) a 10 % čtení v rozsahu 0,7 až 6,0 W/(m·K). Pro měrnou objemovou tepelnou kapacitu je přesnost 15 % čtení + 1·10³ J/(m³·K) v rozsahu 4,0·10⁴ až 4,0·10⁶ J/(m³·K)

Měření gumového granulátu a těžného kameniva probíhalo v odměrném válci. Válec, do kterého bylo nasypáno známé množství dané suroviny, byl umístěn na vibrační podložku. Po 10, 20, 30, 60 a 180 sekundách vibrování byla stanovena sypná hmotnost a zároveň byly pomocí jehlové sondy zjišťovány tepelné vlastnosti surovin.

Měření betonu bylo prováděno na třech zhotovených krychlích ve vysušeném stavu a poté v závislosti na obsahu vlhkosti, až do stavu plné nasycenosti. Pro měření byla využita plošná sonda. Měření probíhalo při teplotě 20±3 °C.

4.3.8 Transport kapalné vody

Zkušební trámečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm se rozřezaly na poloviny. Poté, co byly vysušeny, byl po obvodu aplikován epoxidový nátěr tak, aby byl zajištěn 1-D transport kapalné vody. Vzorčky se neošetřenou plochou 40 × 40 mm vkládaly do destilované vody tak, aby byly ponořeny 1-2 mm ve vodě. V časových intervalech 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 720 a 840 sekund byla zaznamenávána jejich hmotnost. Absorpční součinitel pro vodu A_w byl stanoven jako tangenta počátečního nárůstu kumulovaného obsahu vody na odmocnině času. Sorptivita vody se vypočítala pomocí rovnice (7)

$$S = \frac{A}{\rho_w}, \quad (7)$$

kde S je sorptivita vody, A absorpční koeficient vody, ρ_w hustota vody.

Součinitel vlhkostní vodivosti κ se poté vypočetl podle vztahu (8)

$$\kappa = \left(\frac{A}{w_{SAT} - w_0} \right)^2, \quad (8)$$

kde κ je součinitel vlhkostní vodivosti, A absorpční koeficient vody, w_{SAT} kapilární obsah nasycené vlhkosti a w_0 počáteční obsah nasycené vlhkosti.

Hodnoty transportu kapalné vody byly stanoveny ze dvou trámečků každé směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota zkoušky absorpčního koeficientu vody byla 2,3 % a pro součinitele vlhkostní vodivosti byla 3,5 %.

4.3.9 Transport vodní páry

Měření parametrů charakterizujících transport vodní páry bylo realizováno miskovou metodou dle normy ČSN EN ISO 12572 [25]. Hliníkové misky pro osazení testovaných vzorků byly naplněny vysoušedlem (silikagelem). Po obvodu epoxidované destičky o rozměru $100 \times 100 \times 20$ mm byly uloženy na zkušební misky, které se utěsnily speciální laboratorní plastelinou. Poté byly misky uloženy do klimatizovaných komor s konstantní teplotou 23 ± 1 °C. U misek byly pravidelně zaznamenávány nárůsty nebo poklesy hmotnosti. Po dosažení lineární změny bylo měření ukončeno. Ze zjištěných hodnot byl vypočítán součinitel difúze vodní páry D dle rovnice (9)

$$D = \frac{\Delta m \cdot d \cdot R \cdot T}{A \cdot t \cdot M \cdot \Delta p_p}, \quad (9)$$

kde D je součinitel difúze vodní páry, Δm množství páry difundující vzorkem, d tloušťka vzorku, R univerzální plynová konstanta, T absolutní teplota, A plocha vzorku ve styku s daným prostředím, t časové období korespondující s transportem hmotnosti vodní páry, M molární hmotnost vody, Δp_p rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu pod a nad měřeným povrchem vzorku.

Ve stavebnictví se pro hodnocení difúzních vlastností materiálů nejčastěji využívá faktor difúzního odporu, který je daný vztahem (10)

$$\mu = \frac{D_A}{D}, \quad (10)$$

Kde μ je faktor difúzního odporu, D_A součinitel vodní páry ve vzduchu a D součinitel difúze vodní páry.

Hodnoty transportu vodní páry byly stanoveny pro tři vzorky destiček každé směsi. Rozšířená kombinovaná nejistota měření součinitele difúze vodní páry byla 2,0 % a pro faktor difúzního odporu byla 2,8 %.

4.3.10 Tepelné zatížení

Vzorky třech krychlí každé směsi o hraně 100 mm byly podrobeny tepelnému zatížení. Zkušební tělesa byla vložena do elektrické pece Clasic CZ, kde byla jednotlivě vystavena teplotám 150 °C, 200 °C, 300 °C a 400 °C po dobu dvou hodin. Následně na nich byly zjišťovány změny vybraných vlastností:

- změna hmotnosti,
- změna objemové hmotnosti,
- změna součinitele tepelné vodivosti.

Na třech trámečcích každé směsi o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, které byly tepelně zatěžovány jako výše zmíněné krychle, byly pozorovány změny následujících mechanických vlastností:

- změna pevnosti v tahu za ohybu,
- změna pevnosti v tlaku,
- změna modulu pružnosti.

Vybrané zkoušky a měření nebyly prováděny na vzorcích při jednotlivých teplotách, nýbrž až na vychladlých vzorcích při teplotě 20±2 °C. Získané materiálové parametry je tedy možné označit jako residuální.

4.3.11 Optická mikroskopie

Pomocí optického mikroskopu (VHX-200 D, Keyence, Germany) byla studovány struktury betonů s náhradou těžného kameniva gumovým granulátem a také začlenění gumového granulátu do cementových matric.

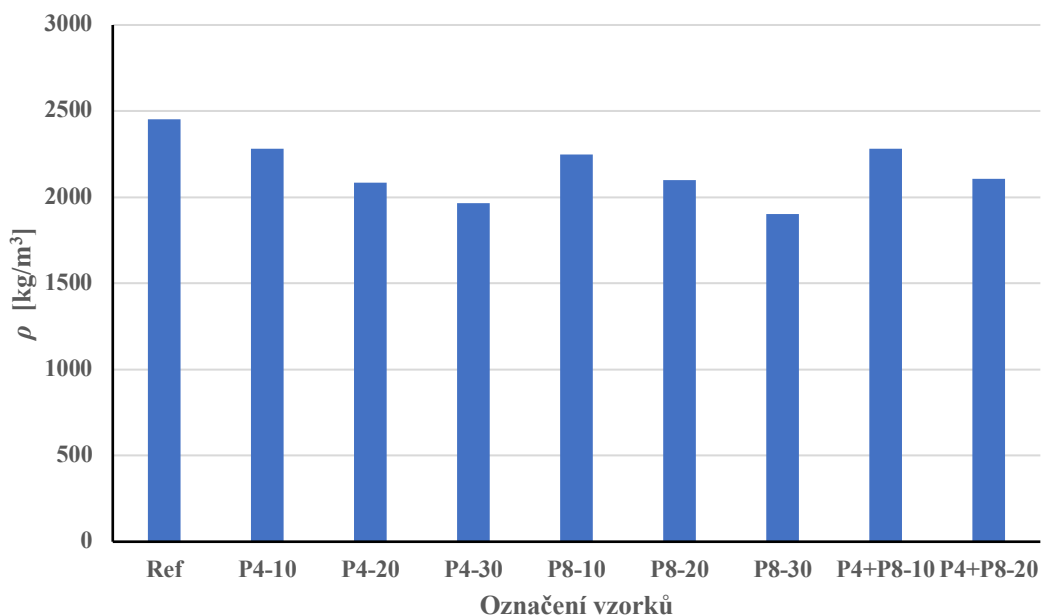
5 Experimentální výsledky

5.1 Hustota matrice

Získané hodnoty hustoty matrice změřené na principu heliové pyknometrie dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.1 jsou uvedeny v Tab. 13 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 24.

Tab. 13: Hustota matrice

Označení směsí	Hustota matrice [kg/m ³]
Ref	2450
P4-10	2280
P4-20	2090
P4-30	1970
P8-10	2250
P8-20	2100
P8-30	1900
P4+P8-10	2280
P4+P8-20	2110



Obr. 24: Porovnání hustoty matrice jednotlivých testovaných betonů

Z výše uvedených výsledků je patrné, že hustota matrice klesá s narůstajícím procentem náhrady kameniva gumovým granulátem. To je způsobeno tím, že hustota

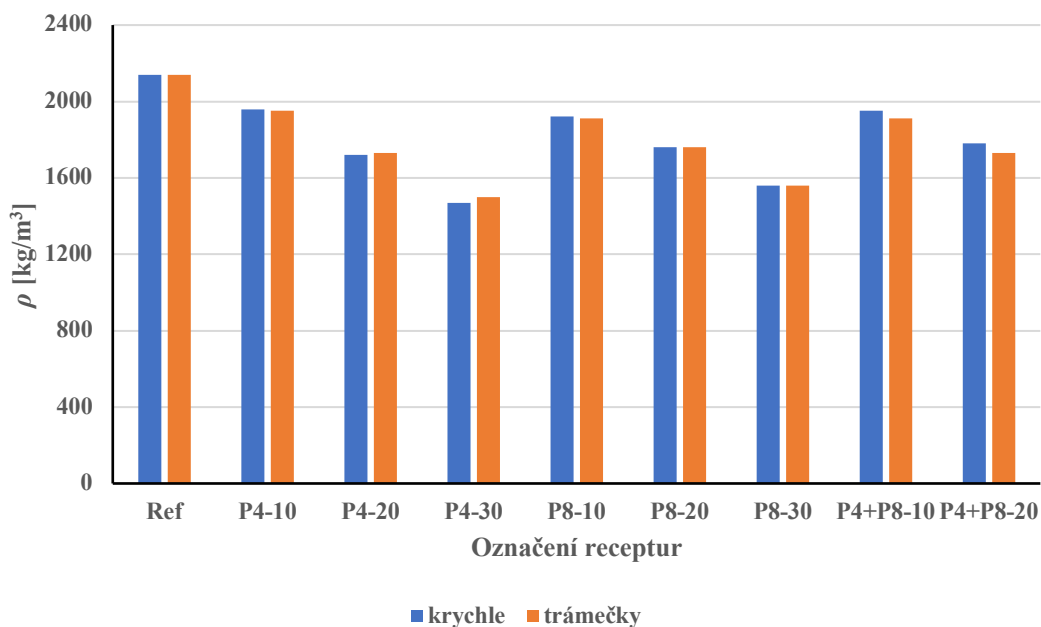
gumového granulátu je přibližně poloviční v porovnání s hustotou těžného kameniva. Hodnoty hustoty matrice mají tendenci klesat jako v případě experimentu Girskaše a Nagrockienė [26].

5.2 Objemová hmotnost

Hodnoty objemové hmotnosti stanovené dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.2 jsou uvedeny v Tab. 14 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 25.

Tab. 14: Objemová hmotnost

Označení směsí	Objemová hmotnost [kg/m ³]	
	krychle	trámeček
Ref	2 140	2 140
P4-10	1 960	1 950
P4-20	1 720	1 730
P4-30	1 470	1 500
P8-10	1 920	1 910
P8-20	1 760	1 760
P8-30	1 560	1 560
P4+P8-10	1 950	1 910
P4+P8-20	1 780	1 730



Obr. 25: Porovnání objemových hmotností testovaných betonů

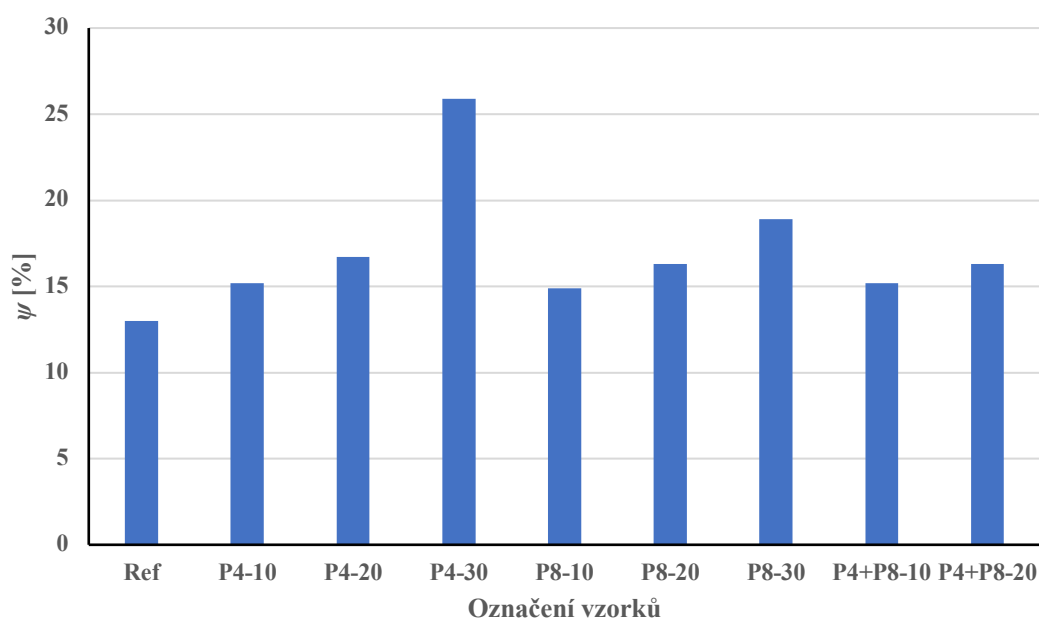
Již z výsledků z kapitoly 5.1 vyplývá, že i objemové hmotnosti vzorků klesají s rostoucím zastoupením gumového granulátu ve směsích. To se podobá výsledkům experimentu Linga [27].

5.3 Celková otevřená pórovitost

Vypočtené hodnoty celkové otevřené pórovitosti podle postupu uvedeného v kapitole 4.3.3 jsou uvedeny v Tab. 15 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 26.

Tab. 15: Celková otevřená pórovitost

Označení směsí	ψ [%]
Ref	13,0
P4-10	15,2
P4-20	16,7
P4-30	25,9
P8-10	14,9
P8-20	16,3
P8-30	18,9
P4+P8-10	15,2
P4+P8-20	16,3



Obr. 26: Porovnání otevřené pórovitosti testovaných betonů

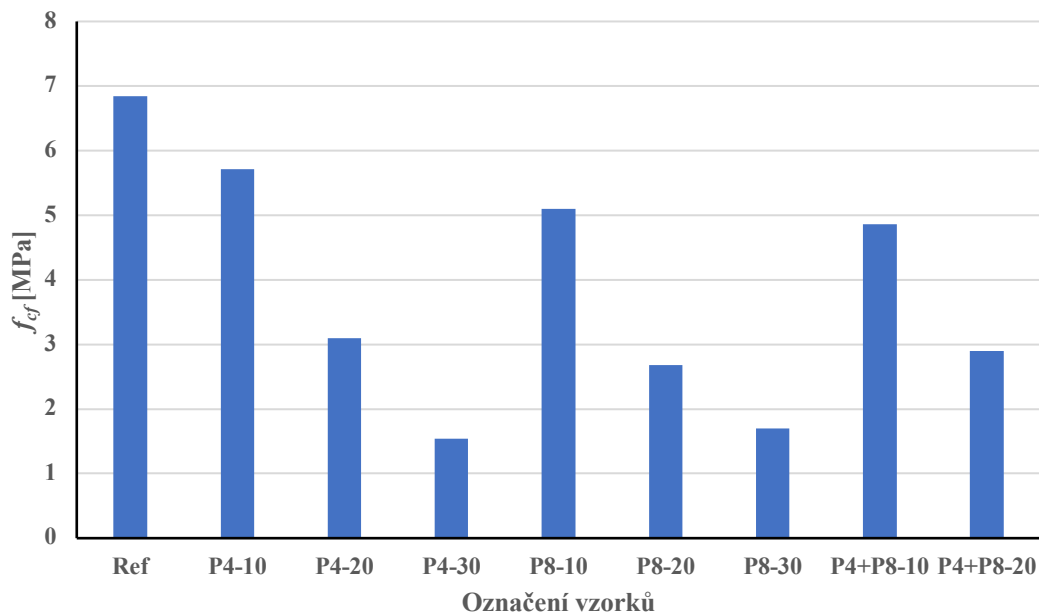
S vyšším množstvím náhrady přírodního plniva gumovým granulátem se zvýšila celková otevřená pórovitost. Nejnižší hodnota celkové otevřené pórovitosti byla zjištěna u referenčního betonu, naopak nejvyšší byla zjištěna u P4-30, která dosáhla 25,9 %. Betony s náhradou gumovým granulátem frakce 0/4 dosahovaly vyšší pórovitosti než betony s náhradou gumovým granulátem 4/8. To bylo způsobeno vyšším měrným povrchem jemnějšího plniva a sníženou zpracovatelností čerstvé betonové směsi. Hodnoty se podobají hodnotám výsledku experimentu Girskaše a Nagrockienė [26].

5.4 Pevnost v tahu za ohybu

Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu získané dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.4 jsou uvedeny v Tab. 16 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 27.

Tab. 16: Pevnost v tahu za ohybu

Označení směsí	Tah za ohybu [MPa]
Ref	6,8
P4-10	5,7
P4-20	3,1
P4-30	1,5
P8-10	5,1
P8-20	2,7
P8-30	1,7
P4+P8-10	4,9
P4+P8-20	2,9



Obr. 27: Porovnání pevností v tahu za ohybu testovaných betonů

Při 10 % náhradě těžného kameniva gumovým granulátem klesá pevnost v tahu za ohybu až o 28 %, při 20 % náhrady je pokles již více než 50 % a při 30 % náhrady jsou hodnoty pevnosti v tahu za ohybu na 25 % hodnoty referenčního vzorku. Ve srovnání s výsledky experimentu Youssfa, Hassanliho a Millsové [15] uvedenými na Obr. 16 je pokles pevností téměř identický. Změny hodnot pevností v tahu za ohybu odpovídají změnám strukturálních vlastností testovaných betonů

Přehledné procentuální změny pevnosti v tahu za ohybu namíchaných betonových směsí s gumovým granulátem od referenční směsi vystihuje Tab. 17.

Tab. 17: Srovnání pevností v tahu za ohybu testovaných betonů

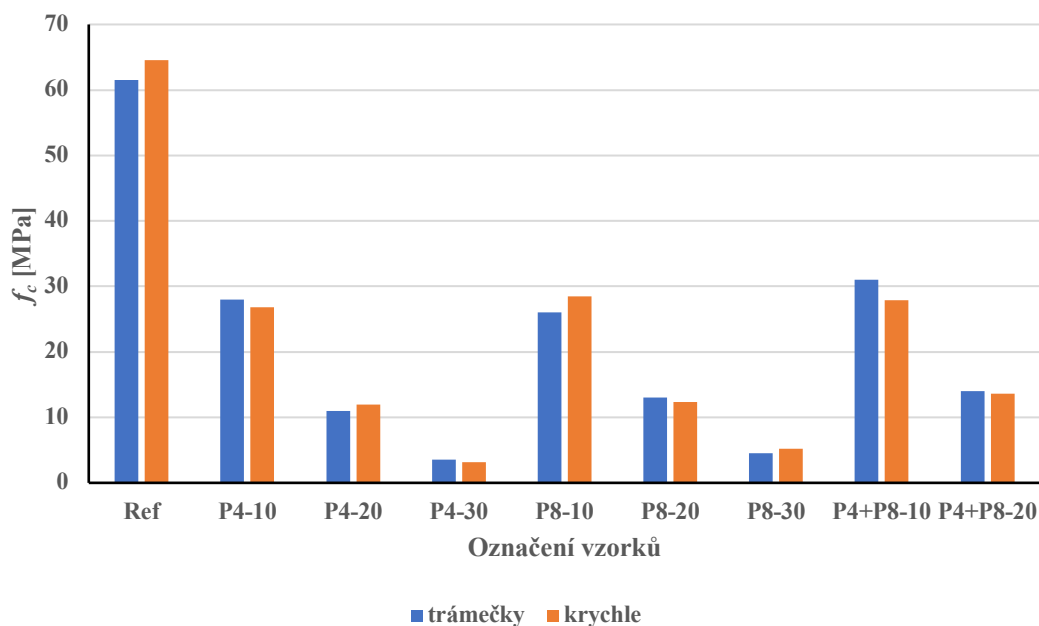
		Náhrada kameniva 4/8 gumou [%]			
		0	10	20	30
Náhrada kameniva 0/4 gumou [%]	0	6,8 MPa	-25 %	-60 %	-75 %
	10	-16 %	-28 %	-	-
	20	-54 %	-	-57 %	-
	30	-78 %	-	-	-

5.5 Pevnost v tlaku

Získané hodnoty pevnosti v tlaku dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.5 jsou uvedeny v Tab. 18 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 28.

Tab. 18: Pevnost v tlaku

Označení směsí	Pevnost v tlaku [MPa]	
	trámečky	krychle
Ref	61,5	64,5
P4-10	28,0	26,8
P4-20	11,0	12,0
P4-30	3,5	3,2
P8-10	26,0	28,5
P8-20	13,0	12,3
P8-30	4,5	5,2
P4+P8-10	31,0	27,8
P4+P8-20	14,0	13,6



Obr. 28: Srovnání pevností v tlaku trámečků a krychlí

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena jak na krychlích, tak na trámečcích. Lze vidět jisté odchylky, které mohou být způsobeny vrstvením směsí do jednotlivých forem nebo také velikostí forem. Při 10 % zastoupení gumového granulátu klesá pevnost v tlaku až na 42 %, při 20 % náhradě klesá pevnost v tlaku už o 80 % a při 30 % náhradě se dostává pevnost v tlaku pouze na 5 % hodnoty referenčního vzorku. Pokles hodnot pevnosti se shodují s experimenty Youssfa, Hassanliho a Millsové [15] a Linga [27]. Změny hodnot pevností v tlaku odpovídají změnám strukturálních vlastností testovaných betonů

Přehledné procentuální změny pevnosti v tlaku namíchaných betonových směsí s gumovým granulátem od referenční směsi vystihuje Tab. 19.

Tab. 19: Srovnání pevností v tlaku testovaných betonů

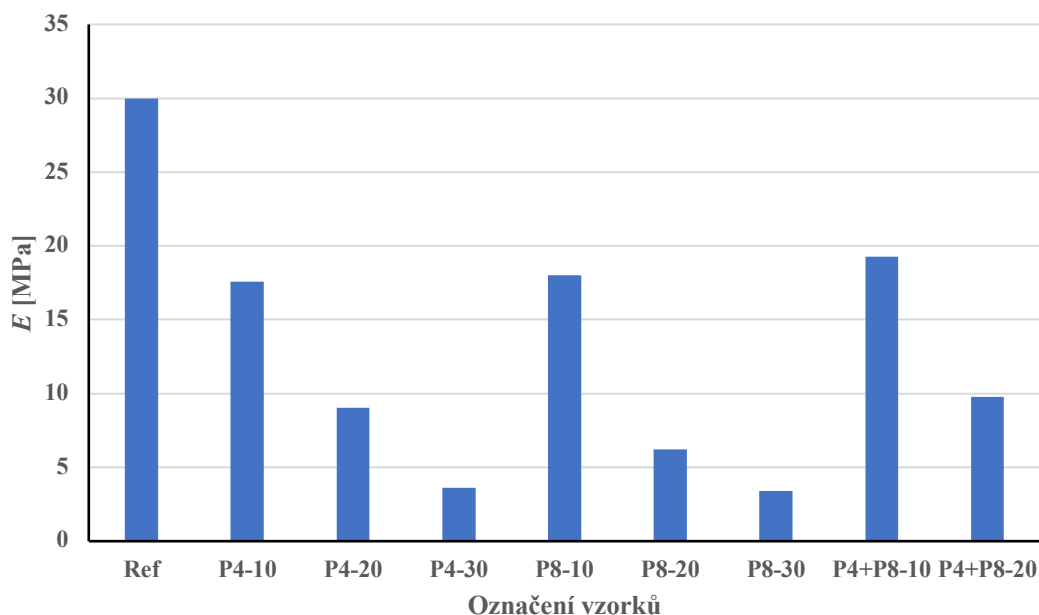
Přehled změny pevnosti v tlaku		Náhrada kameniva 4/8 gumou [%]			
		0	10	20	30
Náhrada kameniva 0/4 gumou [%]	0	61,5 MPa	-58 %	-79 %	-93 %
	10	-55 %	-50 %	-	-
	20	-82 %	-	-77 %	-
	30	-94 %	-	-	-

5.6 Modul pružnosti

Hodnoty statického modulů pružnosti získané dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.6 jsou uvedeny v Tab. 20 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 29.

Tab. 20: Modul pružnosti

Označení směsí	Modul pružnosti [GPa]
Ref	30,0
P4-10	17,6
P4-20	9,1
P4-30	3,6
P8-10	18,0
P8-20	6,2
P8-30	3,4
P4+P8-10	19,3
P4+P8-20	9,8



Obr. 29: Porovnání modulu pružnosti testovaných betonů

Hodnoty modulu pružnosti v případě 10 % náhrady kameniva gumovým granulátem rapidně klesají až na 55 %. Vzorek s 20 % náhradou kameniva frakce 4/8 gumovým granulátem frakce 4/8 s označením P8-20 klesá o 10 % více než zbývající vzorky se stejným procentuálním zastoupením. U vzorků s 30 % náhradou kameniva za gumový granulát jsou již hodnoty přibližně stejné konkrétně na 11 % referenčního vzorku. Výsledky se shodují s výsledky experimentů Youssfa, Hassanliho a Millsové [15], Zhenga, Ganjiana, Khoramiho a Maghsoudiho [28] a Huoa a Yuana [29]. Změny hodnot modulů pružnosti odpovídají změnám strukturálních vlastností testovaných betonů

Přehledné procentuální změny modulu pružnosti namíchaných betonových směsí s gumovým granulátem od referenční směsi vystihuje Tab. 21.

Tab. 21: Srovnání modulů pružnosti testovaných betonů

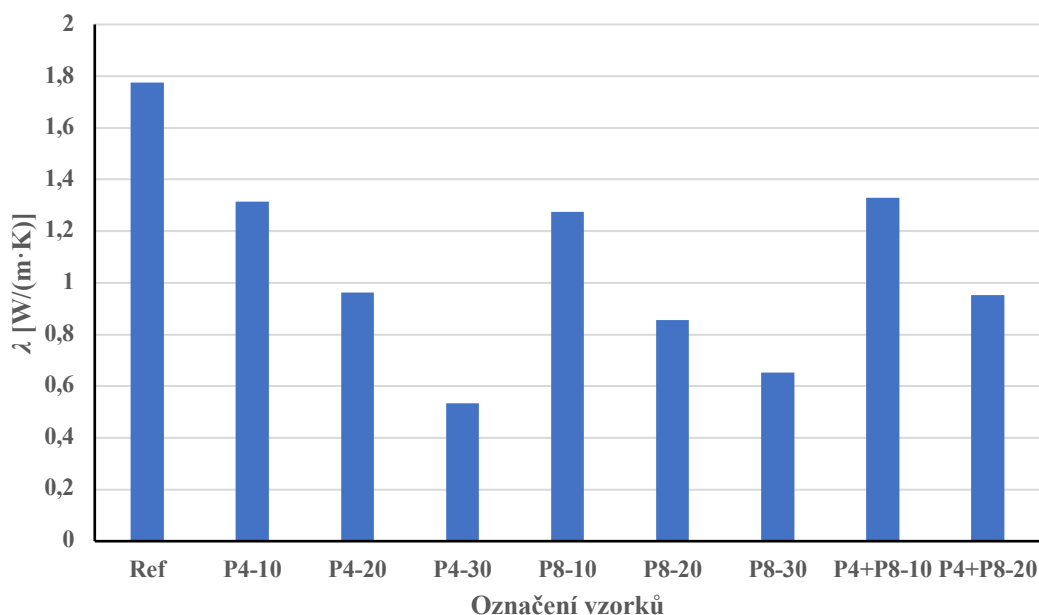
Přehled změny modulu pružnosti		Náhrada kameniva 4/8 gumou [%]			
		0	10	20	30
Náhrada kameniva 0/4 gumou [%]	0	30 GPa	-40 %	-79 %	-89 %
	10	-41 %	-36 %	-	-
	20	-70 %	-	-67 %	-
	30	-88 %	-	-	-

5.7 Tepelné vlastnosti

Parametry tepelných vlastností stanovené dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.7 jsou uvedeny v Tab. 22 a porovnání jednotlivých vzorků na Obr. 30 a Obr. 31.

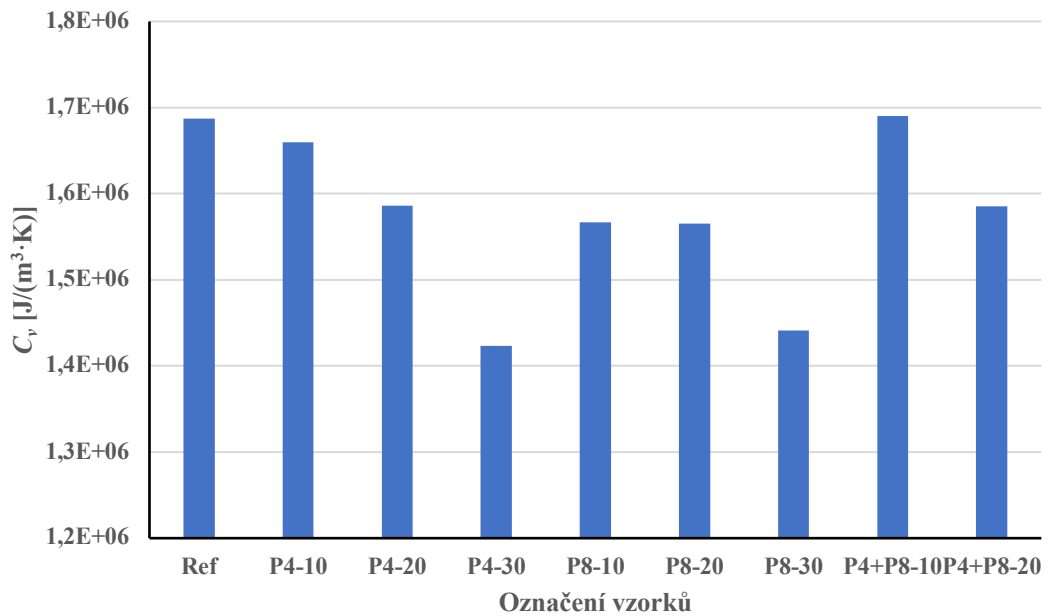
Tab. 22: Základní tepelné vlastnosti ve vysušeném stavu

Označení směsí	λ [W/(m·K)]	C_v [J/(m ³ ·K)]
Ref	1,776	1,69E+06
P4-10	1,314	1,66E+06
P4-20	0,962	1,59E+06
P4-30	0,534	1,42E+06
P8-10	1,275	1,57E+06
P8-20	0,857	1,57E+06
P8-30	0,653	1,44E+06
P4+P8-10	1,329	1,69E+06
P4+P8-20	0,953	1,59E+06



Obr. 30: Porovnání součinitele tepelné vodivosti testovaných betonů

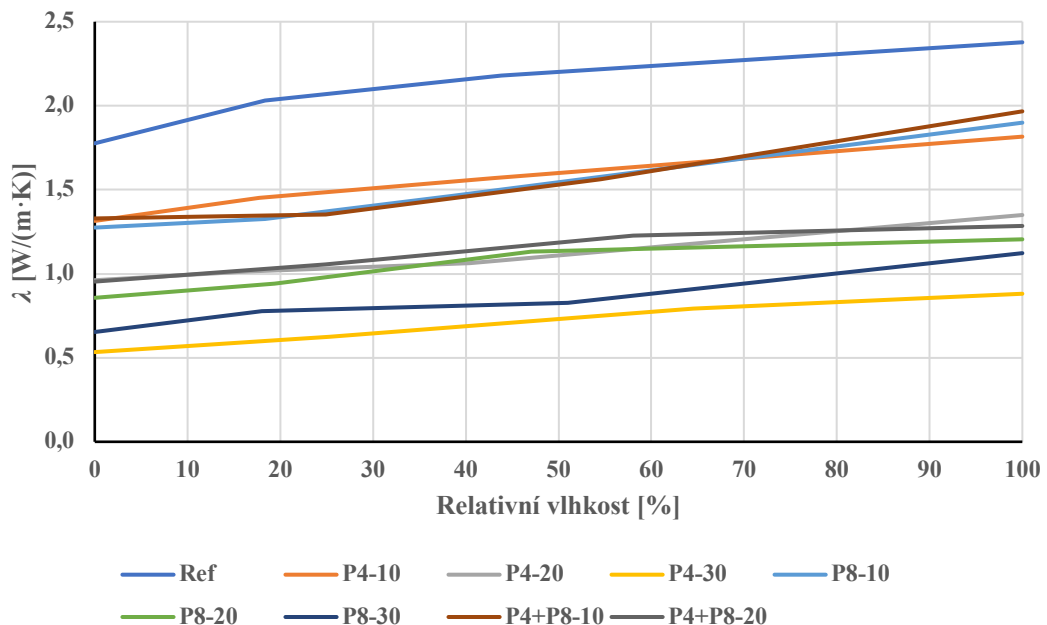
Součinitel tepelné vodivosti téměř lineárně klesá, kdy vzorky s 10 % náhradou kameniva gumovým granulátem mají nižší součinitel o 30 % než referenční vzorek. Vzorky s 20 % zastoupením gumového granulátu mají nižší součinitel tepelné vodivosti o 50 %. Konečné vzorky s 30 % náhradou kameniva gumovým granulátem mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti na 30 % hodnoty referenčního vzorku. Ve srovnání s výsledky experimentu na obrázku Obr. 19 lze říci, že do 20 % náhrady plniva je tendence klesání hodnoty součinitele tepelné vodivosti obdobná, jen u 30 % náhrady se klesání součinitele téměř zastavilo. Naměřené hodnoty jsou ovlivněny objemovou hmotností a celkovou otevřenou pórovitostí. Klesající tendence se shoduje s experimentem Sukontasukkulise [17].



Obr. 31: Porovnání měrné objemové kapacity testovaných betonů

Porovnáním měrné tepelné kapacity vzorků můžeme říci, že její hodnota klesá s přibývajícím zastoupením gumového granulátu, avšak hodnota vzorku s označením P4+P8-10 se vymyká ostatním vzorkům se stejným zastoupením gumového granulátu. To je způsobeno, způsobeno tím, že směs byla hutnější v důsledku doplnění křivky zrnitosti použitého gumového granulátu.

Hodnoty v závislosti na obsahu vlhkosti jsou zobrazeny na Obr. 32.



Obr. 32: Závislost tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti testovaných betonů

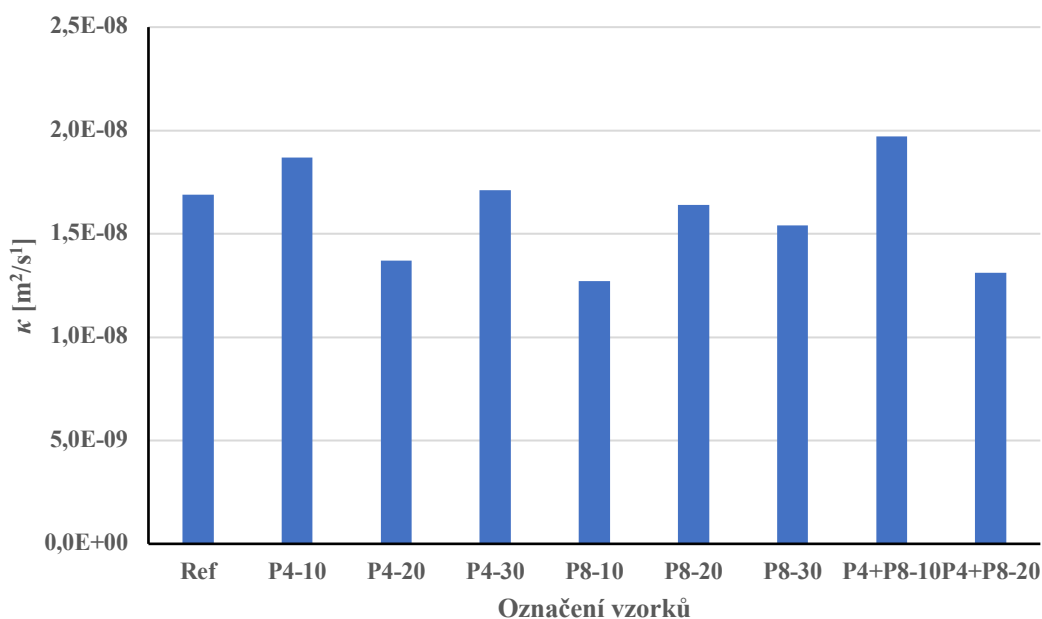
Na Obr. 32 je znázorněna závislost tepelné vodivosti na relativní vlhkosti. Nejvyšší nárůst tepelné vodivosti byl u referenčního vzorku. U testovaných vzorků s nenasákavým gumovým granulátem snížil vliv obsahu vlhkosti tepelnou vodivost.

5.8 Transport kapalné vody

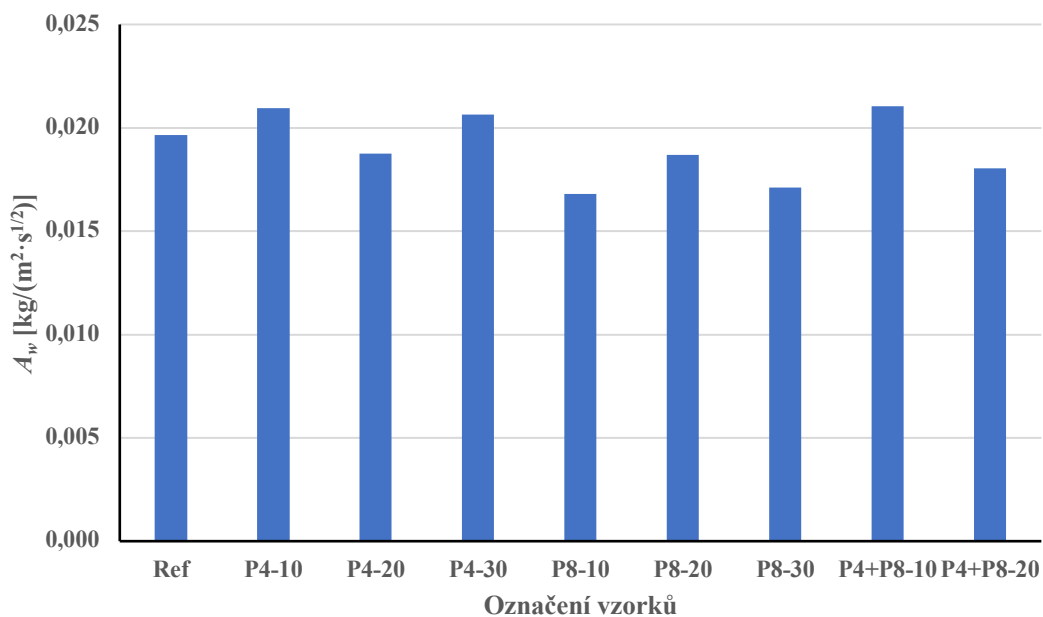
Získané hodnoty parametrů transportu kapalné vody dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.8 jsou uvedeny v Tab. 23. Součinitel vlhkostní vodivosti vzorků je porovnán na Obr. 33, absorpční součinitel vody vzorků je porovnán na Obr. 34 a sorptivita vzorků je porovnána na Obr. 35.

Tab. 23: Parametry transportu kapalné vody

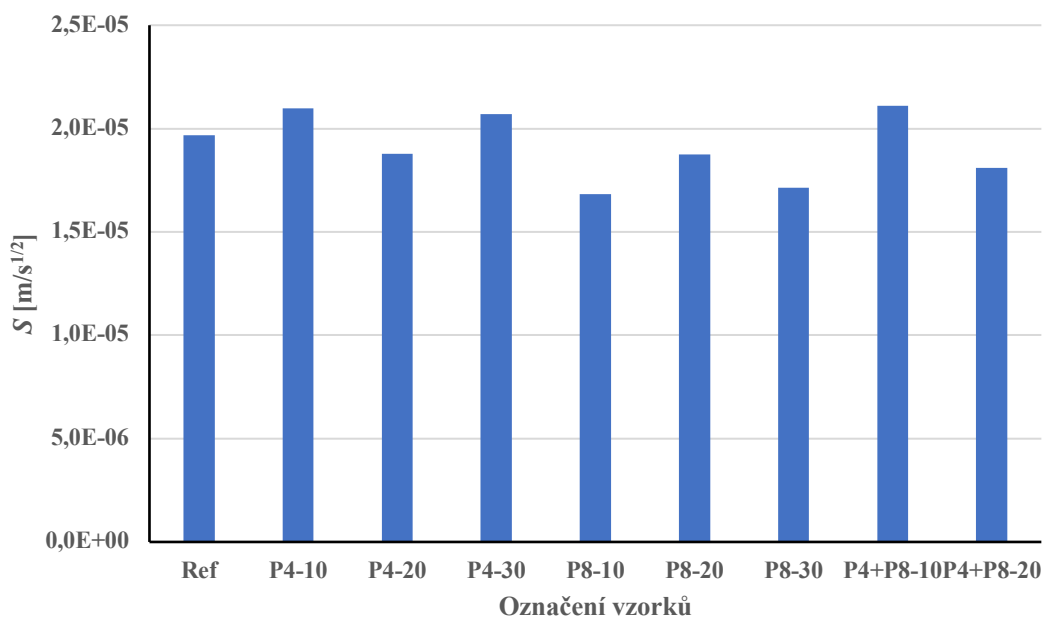
Označení směsí	κ [m ² /s]	A [kg/(m ² ·s ^{1/2})]	S [m/s ^{1/2}]
Ref	1,69E-08	0,020	1,97E-05
P4-10	1,87E-08	0,021	2,10E-05
P4-20	1,37E-08	0,019	1,88E-05
P4-30	1,71E-08	0,021	2,07E-05
P8-10	1,27E-08	0,017	1,68E-05
P8-20	1,64E-08	0,019	1,87E-05
P8-30	1,54E-08	0,017	1,71E-05
P4+P8-10	1,97E-08	0,021	2,11E-05
P4+P8-20	1,31E-08	0,018	1,81E-05



Obr. 33: Porovnání součinitele vlhkostní vodivosti testovaných betonů



Obr. 34: Porovnání absorpčního součinitele vody testovaných betonů



Obr. 35: Porovnání sorptivity testovaných betonů

Z výsledků nelze udělat jednoznačný závěr, jelikož hodnoty s přibývajícím zastoupením gumového granulátu kolísají oproti referenčnímu vzorku. Naměřené hodnoty byly ovlivněny pórovitostí testovaných betonů a také množstvím náhrady gumovým granulátem, který je inertní a nevede vodu. Hodnoty se liší nejvíce o 15 % oproti referenčnímu vzorku. Nejnižší hodnota absorpčního součinitele vody

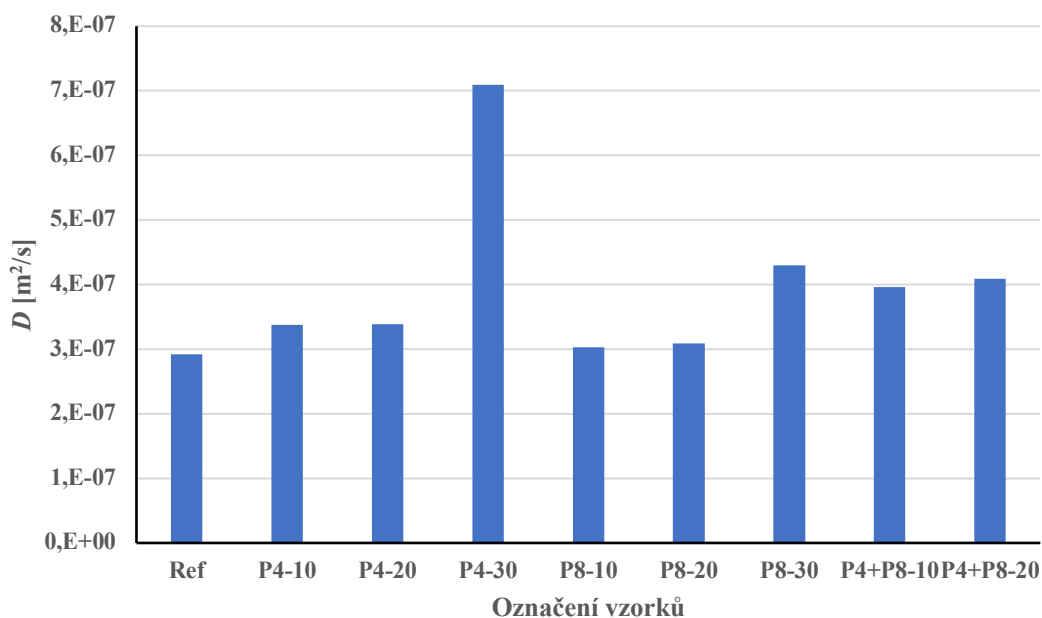
byla zaznamenána u vzorku P8-10. Podobné snížení absorpce byla také pozorována u experimentu Medineho, Trouzineho, Barrose De Aguiara a Asrouna [30].

5.9 Transport vodní páry

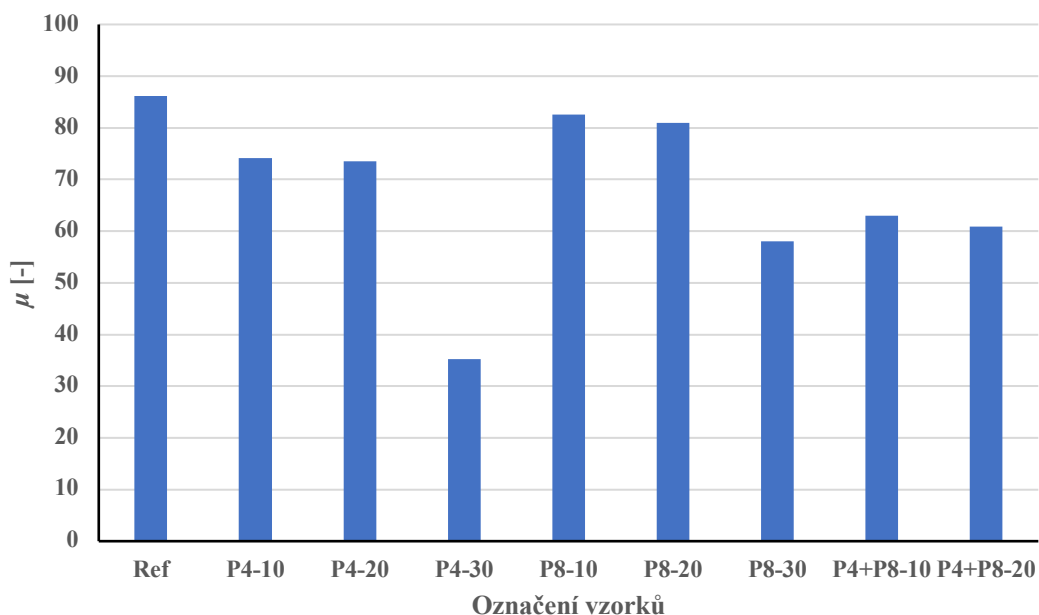
Hodnoty transportu vodní páry stanovené dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.9 jsou uvedeny v Tab. 24. Hodnoty součinitele difúze vodní páry vzorků jsou porovnány na Obr. 36 a hodnoty faktoru difúzního odporu vzorku jsou porovnány na Obr. 37.

Tab. 24: Parametry transportu vodní páry

Označení směsí	D [m ² /s]	μ [-]
Ref	2,92E-07	86,2
P4-10	3,37E-07	74,1
P4-20	3,39E-07	73,5
P4-30	7,09E-07	35,2
P8-10	3,03E-07	82,6
P8-20	3,09E-07	81,0
P8-30	4,30E-07	58,0
P4+P8-10	3,96E-07	63,0
P4+P8-20	4,09E-07	60,9



Obr. 36: Porovnání součinitele difúze vodní páry testovaných betonů



Obr. 37: Porovnání faktoru difuzního odporu testovaných betonů

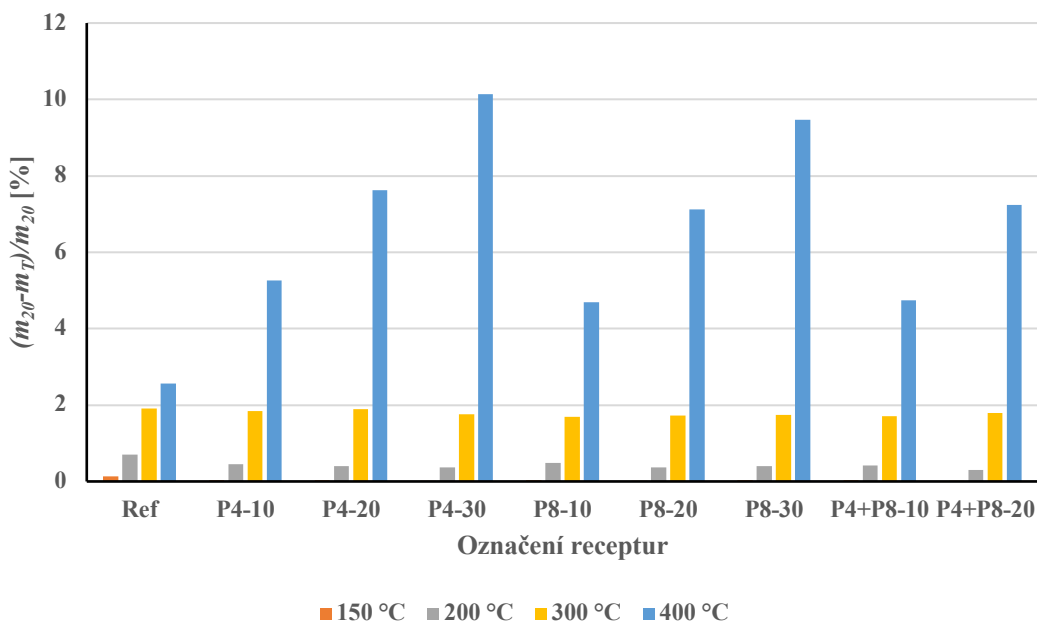
S rostoucím zastoupením gumového granulátu rostou hodnoty součinitele difúze vodní páry. To také samozřejmě naopak snižuje faktor difúzního odporu. Součinitel difúze vodní páry se zvýšil o 3-47 % hodnoty referenčního vzorku. Největší rozdíl byl zaznamenán u vzorku P4-30, kde hodnota součinitele difúze vodní páry vzrostla o 140 % oproti referenčnímu vzorku. Hodnoty nelze srovnat s literaturou, jelikož se zatím žádný experiment transportem vodní páry gumobetonu nezabýval.

5.10 Tepelné zatížení

Hodnoty úbytku hmotnosti získané dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou zaznamenány v Tab. 25 a porovnány na Obr. 38.

Tab. 25: Úbytek hmotnosti vzorků po tepelném zatížení

Označení směsí	Hmotnost [kg]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	2,129	2,139	2,102	2,101	2,063
P4-10	1,898	1,890	1,837	1,914	1,748
P4-20	1,789	1,791	1,780	1,758	1,651
P4-30	1,457	1,443	1,465	1,418	1,321
P8-10	1,910	1,876	1,933	1,845	1,852
P8-20	1,783	1,780	1,779	1,749	1,658
P8-30	1,562	1,580	1,537	1,553	1,398
P4+P8-10	1,957	1,952	1,952	1,920	1,867
P4+P8-20	1,792	1,781	1,798	1,749	1,673



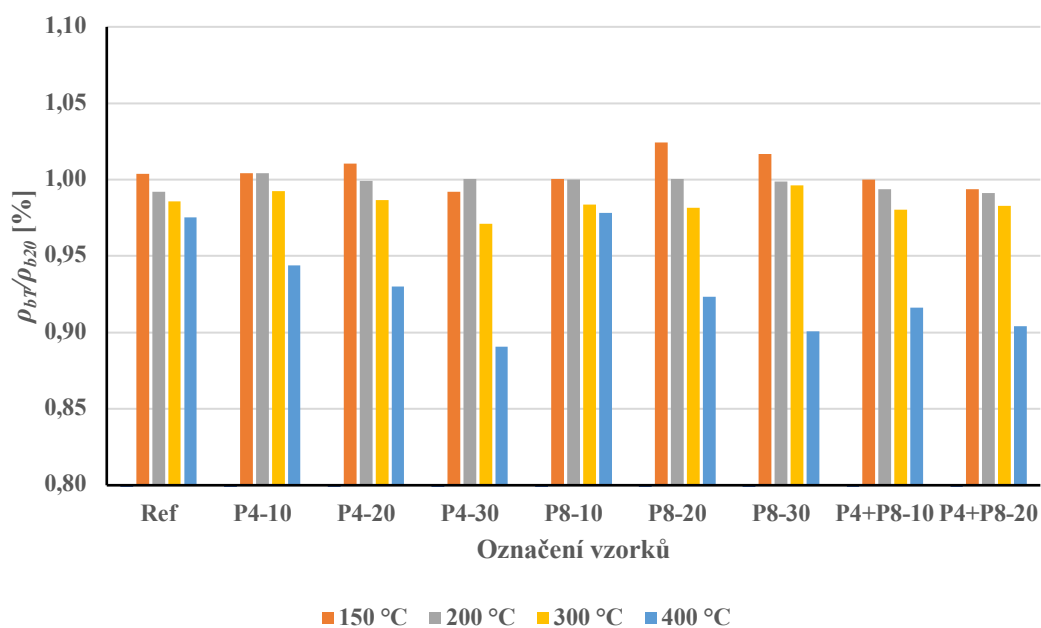
Obr. 38: Porovnání úbytku hmotnosti vzorků po tepelném zatížení, krychle o hraně 100 mm

Při porovnávání vzorků s náhradou kameniva gumovým granulátem a referenčním vzorkem můžeme říci, že při teplotě do 300 °C má úbytek u všech vzorků téměř shodný. Největší rozdíl přichází až při teplotě 400 °C, kdy úbytek při 10 % náhradě činí úbytek 5 % hmotnosti, při 20 % náhradě je úbytek již 7 % hmotnosti a při 30 % náhradě dosahuje úbytek hmotnosti až 10 %. Pokles hmotnosti je tedy při 400 °C větší, čím je větší náhrada gumovým granulátem, který se při této teplotě degraduje a ztrácí hmotnost podobně jako u experimentu Medineho, Trouzineho, Barrose De Aguiara a Asrouna [30]. Degradace gumového granulátu se shoduje s literaturou [31].

Hodnoty objemové hmotnosti dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou uvedeny v Tab. 26 a porovnány na Obr. 39.

Tab. 26: Změna objemové hmotnosti vzorků po tepelném zatížení

Označení směsí	Objemová hmotnost [kg/m ³]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	2130	2140	2120	2100	2080
P4-10	1920	1940	1920	1910	1800
P4-20	1750	1770	1750	1730	1630
P4-30	1440	1430	1450	1400	1290
P8-10	1910	1900	1925	1870	1890
P8-20	1760	1810	1750	1740	1620
P8-30	1530	1560	1530	1530	1380
P4+P8-10	1950	1950	1930	1910	1780
P4+P8-20	1760	1740	1760	1720	1610



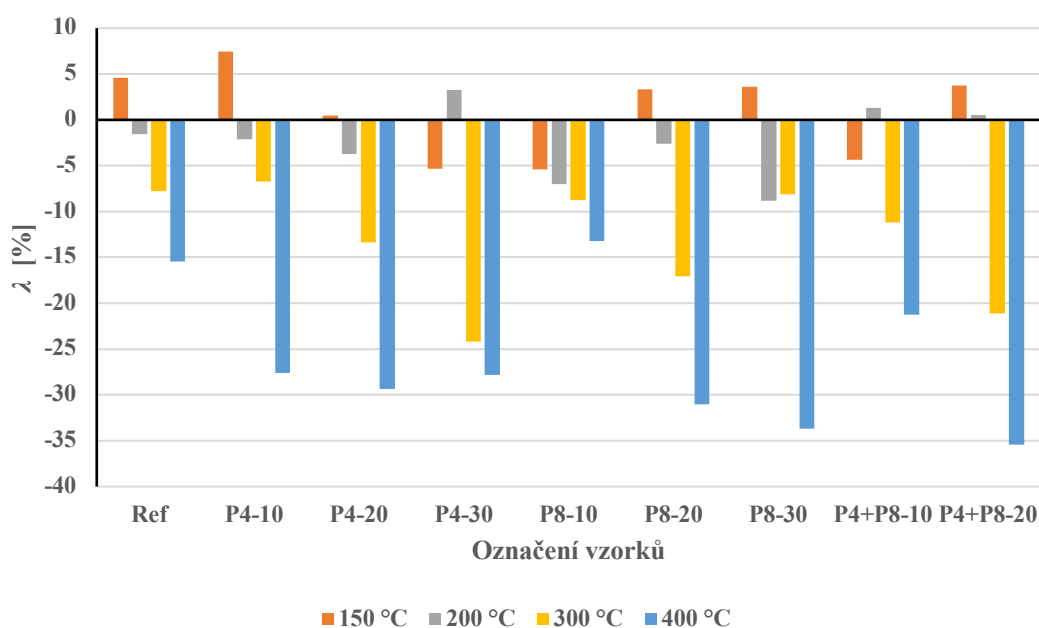
Obr. 39: Změna objemové hmotnosti vzorků po tepelném zatížení, krychle o hraně 100 mm

Změna objemové hmotnosti je přímo závislá na změně hmotnosti. Při teplotách 150 °C a 200 °C zvětšovaly některé vzorky svou objemovou hmotnost, to mohlo být způsobeno vysycháním a smrštěním matrice. Při teplotách nad 300 °C již má objemová hmotnost u všech vzorků tendenci klesat.

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou uvedeny v Tab. 27 a porovnány na Obr. 40.

Tab. 27: Změna součinitele tepelné vodivosti po tepelném zatížení

Označení směsí	Změna λ [W/m·K]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	1,729	1,808	1,702	1,594	1,461
P4-10	1,288	1,384	1,261	1,201	0,933
P4-20	1,000	1,004	0,962	0,866	0,706
P4-30	0,519	0,492	0,536	0,394	0,375
P8-10	1,275	1,206	1,185	1,163	1,106
P8-20	0,836	0,864	0,814	0,693	0,576
P8-30	0,622	0,645	0,567	0,572	0,413
P4+P8-10	1,347	1,288	1,364	1,196	1,061
P4+P8-20	0,954	0,989	0,958	0,752	0,616



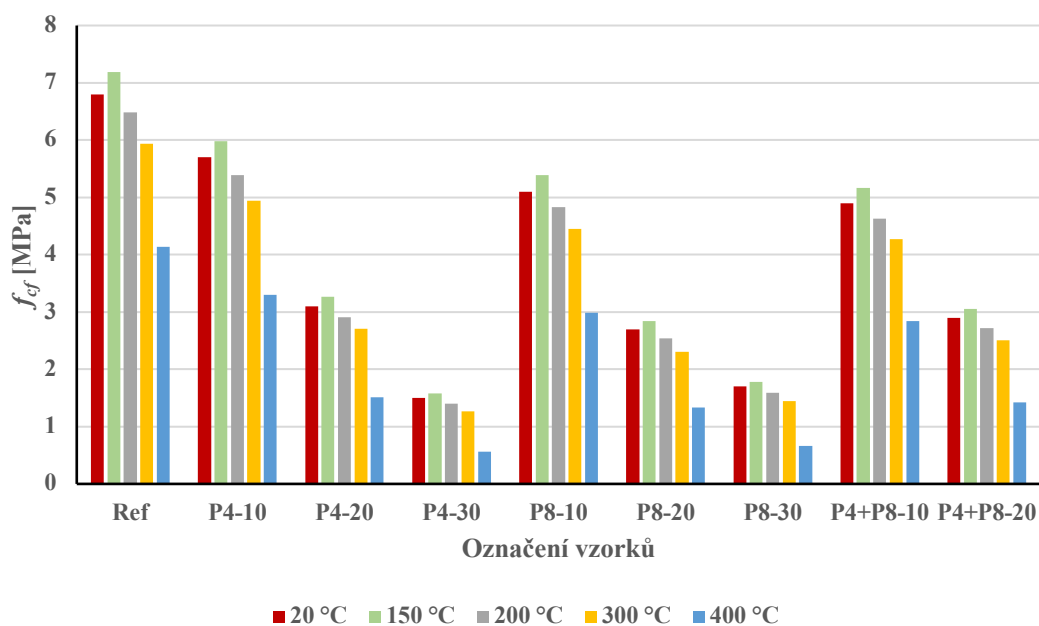
Obr. 40: Změna součinitele tepelné vodivosti po tepelném zatížení

Při teplotách do 300 °C můžeme vidět, že součinitel tepelné vodivosti je ovlivněn procentuálním zastoupením gumového granulátu. Při teplotě 400 °C nemá toto procentuální zastoupení již takový vliv na součinitele tepelné vodivosti. Při teplotě 150 °C a 200 °C je závažnější nárůst součinitele. To je způsobeno ztrátou fyzikálně vázané vody a chemicky vázané vody C-S-H, C-A-S-H a odpovídá to nárůstu objemové hmotnosti na Obr. 38.

Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou zaznamenány v Tab. 28 a porovnány na Obr. 41.

Tab. 28: Pevnost v tahu za ohybu po tepelném zatížení

Označení směsí	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	6,8	7,2	6,5	5,9	4,1
P4-10	5,7	6,0	5,4	4,9	3,3
P4-20	3,1	3,3	2,9	2,7	1,5
P4-30	1,5	1,6	1,4	1,3	0,6
P8-10	5,1	5,4	4,8	4,4	3,0
P8-20	2,7	2,8	2,5	2,3	1,3
P8-30	1,7	1,8	1,6	1,4	0,7
P4+P8-10	4,9	5,2	4,6	4,3	2,8
P4+P8-20	2,9	3,1	2,7	2,5	1,4



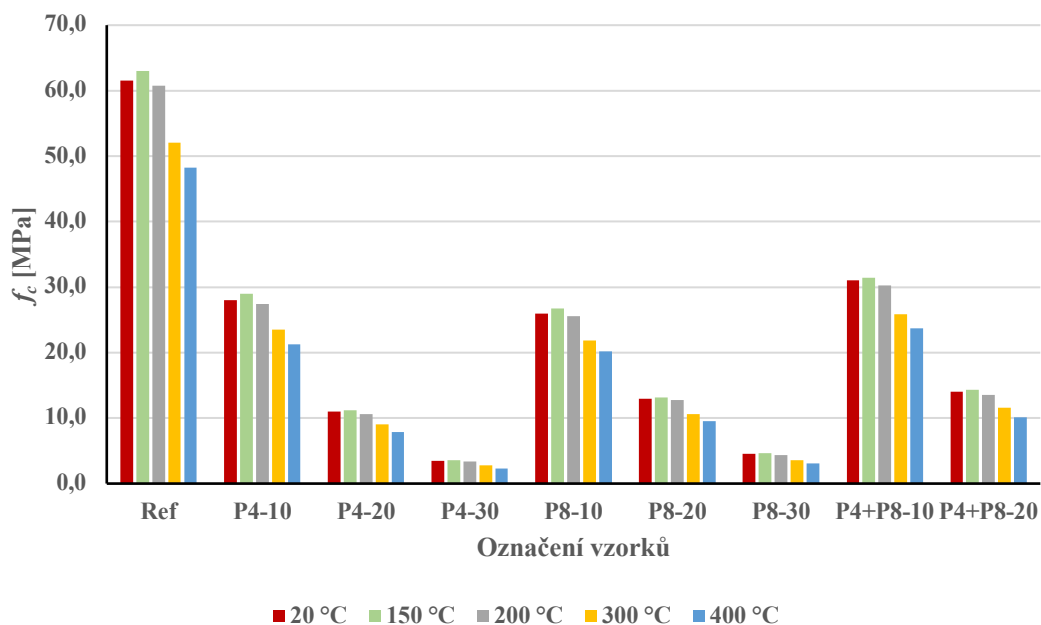
Obr. 41: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu po tepelném zatížení vzorků, trámečky 40 × 40 × 160 mm

Pevnost v tahu za ohybu se u všech vzorků při teplotě 150 °C mírně zvyšuje a od teploty 200 °C mírně klesá, kolísání je ve shodě s objemovou hmotností na Obr. 40. Při vystavení vzorků teplotě 400 °C ztrácejí všechny vzorky 35-45 % hodnoty pevnosti v tahu oproti 300 °C. Lze vypožorovat, že testované vzorky s náhradou mají podobný procentuální úbytek pevnosti v tahu za ohybu jako referenční vzorek.

Hodnoty pevnosti v tlaku dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou uvedeny v Tab. 29 a porovnány na Obr. 42.

Tab. 29: Pevnost v tlaku po tepelném zatížení

Označení směsí	Pevnost v tlaku [MPa]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	61,5	63,0	60,8	52,1	48,2
P4-10	28,0	29,0	27,4	23,5	21,3
P4-20	11,0	11,2	10,6	9,0	7,9
P4-30	3,5	3,6	3,3	2,8	2,3
P8-10	26,0	26,8	25,6	21,8	20,2
P8-20	13,0	13,1	12,8	10,6	9,5
P8-30	4,5	4,7	4,3	3,6	3,1
P4+P8-10	31,0	31,5	30,2	25,9	23,7
P4+P8-20	14,0	14,3	13,6	11,6	10,1



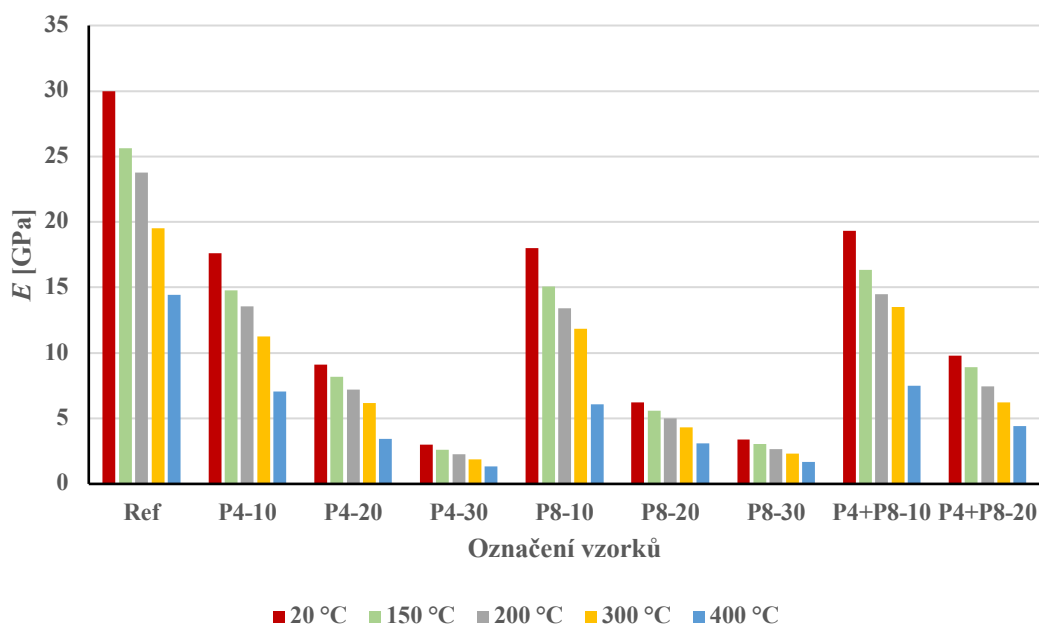
Obr. 42: Porovnání pevnosti v tlaku po tepelném zatížení vzorků, zatěžovací plocha 40 × 40 mm

Pevnost v tlaku při tepelném zatížení se chová podobně jako pevnosti v tahu za ohybu. Při teplotě 150 °C hodnoty pevnosti v tlaku vzorků nepatrně rostou v závislosti na objemové hmotnosti na Obr. 40. Celkově nejvyšší úbytek pevnosti v tlaku byl zaznamenán po vystavení teplotě 400 °C. Skokový pokles však začal po teplotě 300 °C vlivem degradace a dekompozice gumového granulátu, kdy rozdíl činil přibližně 15 % oproti hodnotám po 200 °C.

Hodnoty modulu pružnosti dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.10 jsou zaznamenány v Tab. 30 a porovnány na Obr. 43.

Tab. 30: Modul pružnosti po tepelném zatížení

Označení směsí	Modul pružnosti [GPa]				
	20 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Ref	30,0	25,6	23,8	19,5	14,4
P4-10	17,6	14,8	13,6	11,3	7,0
P4-20	9,1	8,2	7,2	6,2	3,5
P4-30	3,0	2,6	2,3	1,9	1,3
P8-10	18,0	15,1	13,4	11,9	6,1
P8-20	6,2	5,6	5,0	4,3	3,1
P8-30	3,4	3,0	2,6	2,3	1,7
P4+P8-10	19,3	16,3	14,5	13,5	7,5
P4+P8-20	9,8	8,9	7,4	6,2	4,4

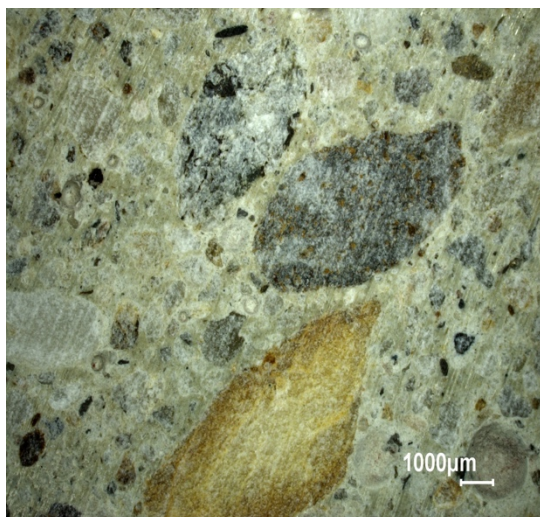


Obr. 43: Porovnání modulu pružnosti po tepelném zatížení vzorků, trámečky 40 × 40 × 160 mm

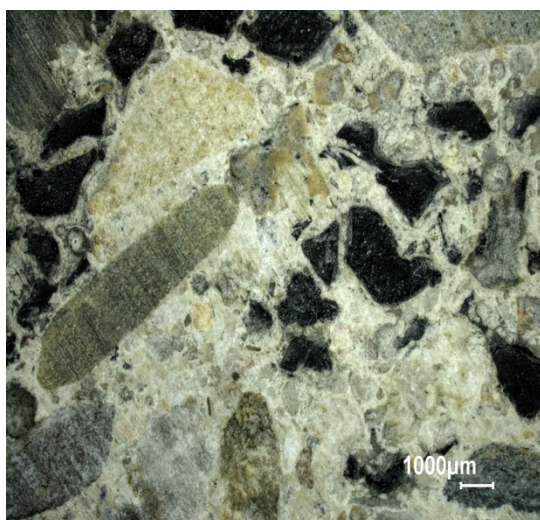
Hodnoty modulu pružnosti klesají velmi podobně při všech procentuálních zastoupeních gumovým granulátem. Z obrázku je patrné, že pro výsledné hodnoty modulu pružnosti tolik nezáleží na velikosti náhrady frakce, jako na množství náhrady kameniva gumovým granulátem.

5.11 Optická mikroskopie

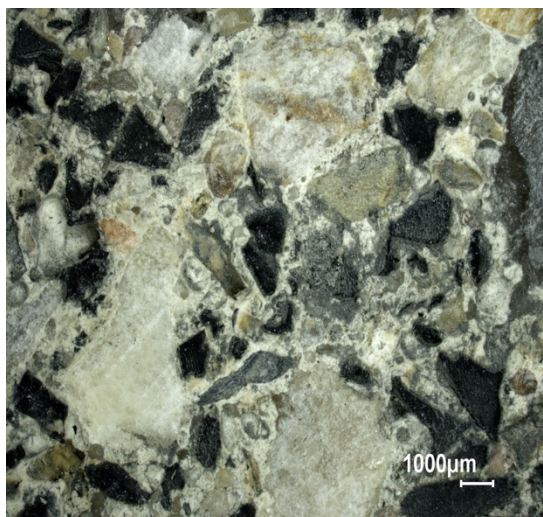
Na Obr. 44 až Obr. 52 lze pozorovat kompaktní strukturu testovaných betonů a začlenění gumového granulátu do cementové matrice. Z makroskopického pohledu se jeví začlenění gumového granulátu jako vhodné, bez vzniku makropórů nebo velkých kapilárních pórů na kontaktu gumového granulátu s přírodním kamenivem či na kontaktu s cementovým kamenem.



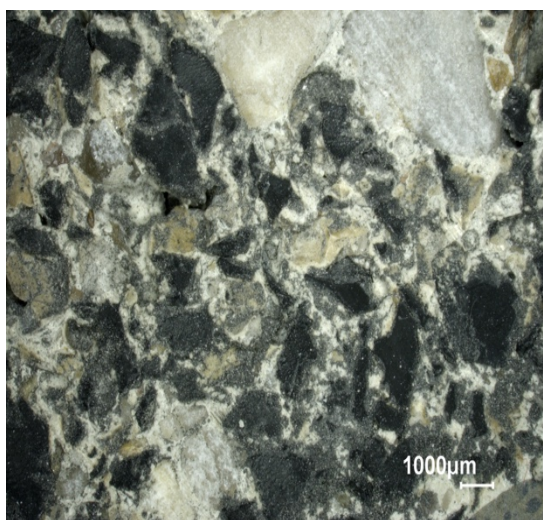
Obr. 44: Struktura vzorku Ref



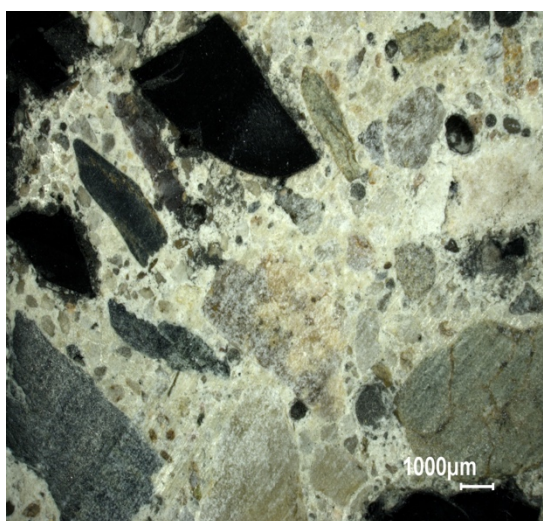
Obr. 45: Struktura vzorku P4-10



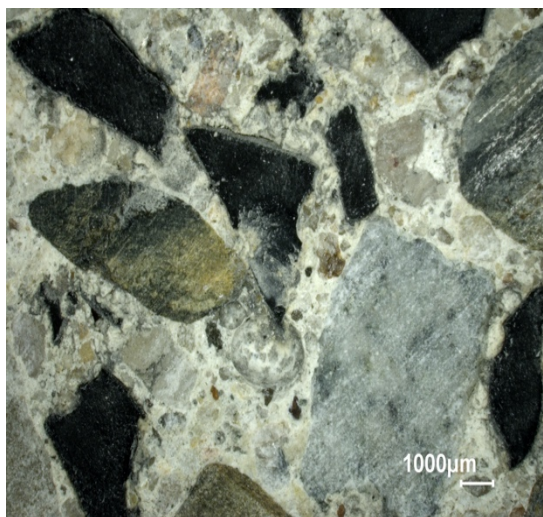
Obr. 46: Struktura vzorku P4-20



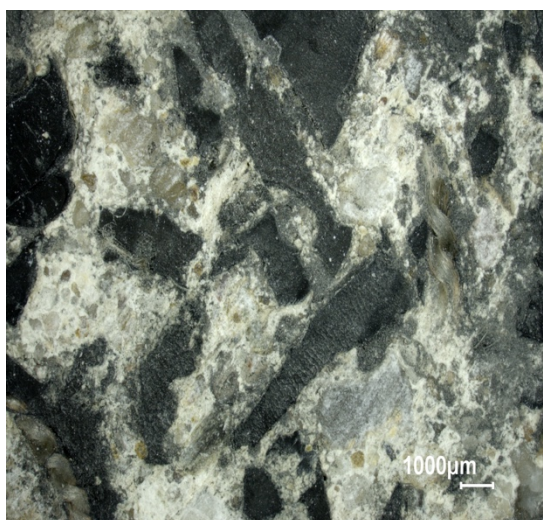
Obr. 47: Struktura vzorku P4-30



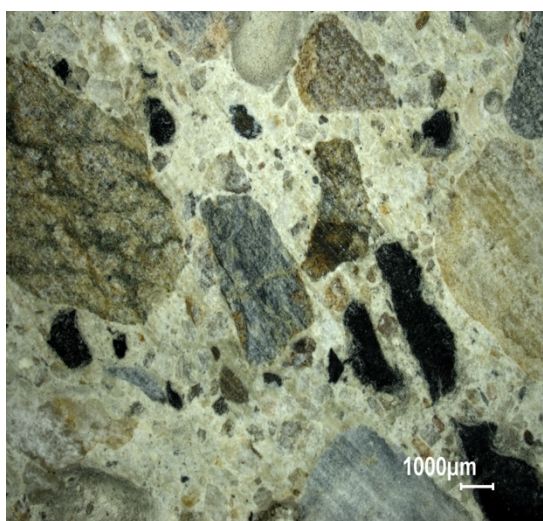
Obr. 48: Struktura vzorku P8-10



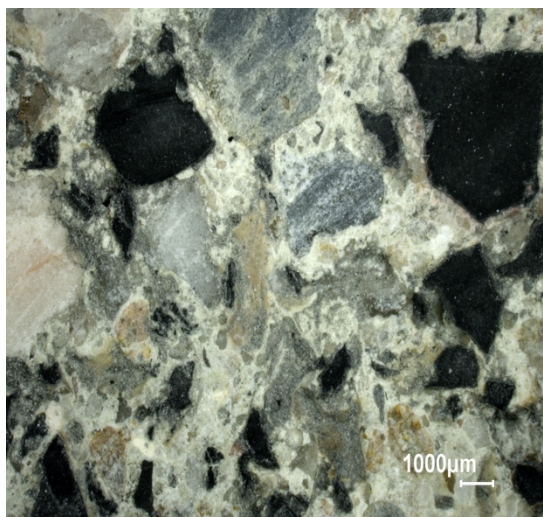
Obr. 49: Struktura vzorku P8-20



Obr. 50: Struktura vzorku P8-30



Obr. 51: Struktura vzorku P4+P8-10



Obr. 52: Struktura vzorku P4+P8-20

Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval možností náhrady těžného přírodního kameniva gumovým recyklátem ve složení cementových kompozitů, za účelem jejich běžného použití, případně za zlepšení jejich tepelně-izolačních funkcí.

Se zvyšující náhradou kameniva gumovým granulátem, se téměř lineárně snižovaly hodnoty hustoty matrice a objemové hmotnosti. Naopak s rostoucí náhradou gumovým granulátem rostla pórovitost testovaných betonů. Nejvyšší pórovitost byla zjištěna u vzorku s 30 % náhradou gumového granulátu frakce 0/4.

Náhrada přírodního těžného kameniva gumovým granulátem velmi ovlivňuje mechanické vlastnosti betonu. Nejvýznamněji je ovlivněna pevnost betonu v tlaku, kdy pevnost vzorku P4-30 v tlaku klesla až o 94 % hodnoty referenčního vzorku. Také pevnost v tahu za ohybu byla negativně ovlivněna náhradou gumového granulátu. Konkrétně u vzorku P4-30 klesla hodnota pevnosti v tahu za ohybu o 78 % hodnoty referenčního vzorku. U vzorku P8-30 klesla hodnota modulu pružnosti o 89 % hodnoty referenčního vzorku.

S rostoucím množstvím gumového granulátu ve vzorcích se snižovala jejich tepelná vodivost. Na druhou stranu se tím snížila měrná objemová tepelná kapacita. Nejvýraznější změnu dosáhly vzorky s 30 % zastoupením gumového granulátu.

Z výsledků parametrů transportu kapalně vody lze vyzorovat kolísání absorpčního součinitele vody modifikovaných vzorků oproti referenčnímu vzorku. Naměřené hodnoty byly ovlivněny pórovitostí testovaných betonů a také množstvím náhrady gumovým granulátem, který je nenasákavý.

Hodnoty součinitele difúze vodní páry rostly s množstvím náhrady gumovým granulátem v závislosti na pórovitosti. Nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku P4-30. Naopak se zvyšujícím se množstvím gumové náhrady klesal faktor difúzního odporu vodní páry.

Mechanické vlastnosti po tepelném zatěžování při laboratorní teplotě nebyly výrazně ovlivněny použitím gumového granulátu v betonových záměsích. Všechny vzorky s gumovým granulátem ztrácely pevnosti obdobně jako referenční vzorek. Avšak mezi 300 a 400 °C docházelo s rostoucím zastoupením gumového granulátu k hmotnostním a objemovým změnám, což mělo také vliv na snížení součinitele tepelné vodivosti oproti referenčnímu prvku.

Podle provedených zkoušek můžeme testované betony zařadit do kategorie lehčených betonů, které nejsou vhodné pro nosné konstrukce. Testovaný gumobeton

je možné využít například jako výplňový materiál, podkladní materiál nebo jako vyrovnávací betonovou mazaninu, kde náhrada gumovým granulátem zlepšuje tepelně-izolační vlastnosti materiálu.

Dá se předpokládat zvýšení uplatnění gumového recyklátu pro sekundární použití ve stavebnictví, jelikož gumový granulát se stává dostupnější a tudíž levnější. Proto má gumový recyklát ambice vyžití jako částečná náhrada přírodního kameniva z ekonomického i ekologického pohledu

Pro hlubší poznatky v oblasti gumového granulátu v kompozitu se nabízí v přípravě návrhu receptury použít plastifikátory a také zaměnit cementové pojivo za epoxidové. Pro zkoušení by se mohly využít větší formy trámců o rozměru $100 \times 100 \times 400$ mm, krychlí o hraně 150 mm a válců o rozměrech 150×300 mm. Tím by byl eliminován případný „size effect“. Dále pro případné venkovní použití by měly být vzorky kompozitů zkoušeny na odolnost vůči chloridům, chemickým rozmrazovacím látkám a zkouškám odolnosti mrazuvzdornosti.

Literatura

- [1] SIENKIEWICZ, Maciej, KUCINSKA-LIPKA, Justyna, JANIK, Helena a BALAS, Adolf. Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*. 2012, **9**(32), 1742-1751.
- [2] BLESSEN, Thomas. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, **10**(49), 1323-1333.
- [3] SEBOLA, Rebecca, MATIVENGA, Paul a PRETORIUS, Jan-Harm. A Benchmark Study of Waste Tyre Recycling in South Africa to European Union Practice. *Procedia CIRP*. 2018, **5**(69), 950-955.
- [4] Konstrukce pneumatiky, *autolexicon.net*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
- [5] Jak se recyklují pneumatiky aneb co se děje s pneumatikami po jejich vyřazení? *Spolehlivé pneu*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <https://www.spolehlivepneu.cz/blog/jak-se-recykluji-pneumatiky-aneb-co-se-deje-s-pneumatikami-po-jejich-vyrazeni-109.html>
- [6] Technický rádce, *Protektory Praha*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.protektorypraha.cz/pneumatiky/technicky-radce/>
- [7] RADVANSKÁ, Agáta. Gumový granulát z pneumatik. *Odpady*. 2007, **2**(4), 10-11
- [8] Unixin grip profi. *SPR stavebniny Pavel Richter*, 2011 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <https://www.stavebniny-podebrady.cz/products/unixin-grip-profi/18.12.2018>.
- [9] BRET, Ondřej. Využití gumového granulátu z recyklovaných pneumatik. *Zpravodajský servis*, 2015 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <https://aktualne.cvut.cz/zpravy-z-medii/20180315-vyuziti-gumoveho-granulatu-z-recyklovanych-pneumatik>
- [10] Lávka přes Ohři jako od Kaplického? Nepovedené konstrukční cvičení, tvrdí architekti. *Redakce Lidových novin a serveru Lidovky.cz*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: https://www.lidovky.cz/domov/lavka-jako-od-kaplickeho-spis-nepovedene-konstrukcni-cviceni-tvrdi-architekti.A151014_162700_ln_domov_jzl
- [11] Protihlukové desky. *Monstav CZ*, 2015 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.monstav.cz/portfolio/protihlukove-desky/>
- [12] Jen 30 centimetrů. ČVUT testuje v Praze nejnižší protihlukovou clonu v Evropě. *Z dopravy*, 2017 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/jen-30-centimetru-cvut-testuje-v-praze-nejnizsi-protihlukovou-clonu-v-evrope-13313/>

- [13] Izolace kolejnic a výhybek. *Gummi trading*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.gummipraha.cz>
- [14] Antivibrační rohože pro průmysl a stavebnictví. *Kotača*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.kotaca.cz/podrubrika.php?ID=30>
- [15] Isolast. *Ortec ČR*, 2018 [online]. [Cit. 18.12.2018]. Dostupné z: <http://www.ortec.cz/cs/isolast>
- [16] YOUSSEF, Osama, HASSANLI, Reza a MILLS, Julie. Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content. *Journal of Building Engineering*. 2017, **11**(49), 115-126.
- [17] SUKONTASUKKUL, Piti. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*. 2009, **8**(23), 1084-1092.
- [18] ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. Praha: ÚVMZ, 2012.
- [19] ZHU, Han, RONG, Bin, XIE, Rong, YANG, Ziheng. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete. *Concrete and building materials*. 2018, **10**(164), 644-654.
- [29] ČSN EN 12390-2: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: ÚVMZ, 2009.
- [21] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚVMZ, 2009.
- [22] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚVMZ, 2009.
- [23] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚVMZ, 2009.
- [24] ČSN EN 12390-13: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚVMZ, 2014.
- [25] ČSN EN ISO 12572: *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení propustnosti vodní páry – Misková metoda*. Praha: ÚVMZ, 2017.
- [26] GIRSKAS, Giedrius, NAGROCKIENE, Džigita. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials*. **6**(140), 36-42.
- [27] LING, Tung-Chai. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*. **11**(28), 164-175.

- [28] GANJIAN, Eshmaiel, KHORAMI, Morteza, MAGHSOUDI, Akbar. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*. **8**(23), 1828-1836.
- [29] ZHENG, Lei, HUO, Sharon, YUAN, Yong. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 2008, **8**(22), 930-947.
- [30] MEDINE, Malik, TROUZINE, Habib, BARROSO DE AGUIAR, ASROUN, Aissa. Durability Properties of Five Years Aged Lightweight Concretes Containing Rubber Aggregates. *Periodice Polytechnica Civil Engineering*. 2018, **11**(62), 386-397.
- [31] CHEN, Wei, FENG, Huajun, SHEN, Dongsheng, JIA, Yufeng, YING, Xianbin, CHEN, Ting, ZHOU, Yuyang, GUO, Jiayun, ZHOU, Mengjiao. Carbon materials derived from waste tires as high-performance anodes in microbial fuel cells. *Science of The Total Environment*. 2018, **5**(618), 804-809.
- [32] GUPTA, Trilok, SIDDIQUE, Salman, SHARMA, Ravi, CHAUDHARY, Sandeep. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. *Construction and Building Materials*. 2017, **10**(137), 35-45.

Seznam obrázků

Obr. 1: Porovnání množství ojetých pneumatik v roce 2010 v USA, EU a ČR .	5
Obr. 2: Vývoj nakládání s ojetými pneumatikami v EU	6
Obr. 3: Vnitřní vrstva pneumatiky	9
Obr. 4: Vrstva kostry pneumatiky	10
Obr. 5: Patka pláště pneumatiky	10
Obr. 6: Patní lana pneumatiky	11
Obr. 7: Bočnice pneumatiky	11
Obr. 8: Nárazníky pneumatiky	12
Obr. 9: Běhoun pneumatiky	12
Obr. 10: Granulát z recyklovaných pneumatik	15
Obr. 11: Lávka v Karlových Varech	16
Obr. 12: Protihluková stěna	16
Obr. 13: Protihluková clona v Pražské části Hloubětín	17
Obr. 14: Bokovnice	17
Obr. 15: Antivibrační rohož	18
Obr. 16: Porovnání pevnosti tahu za ohybu referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem	19
Obr. 17: Porovnání pevnosti v tlaku referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem	20
Obr. 18: Porovnání modulu pružnosti referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem	20
Obr. 19: Porovnání součinitele tepelné vodivosti referenčního betonu a betonu s gumovým granulátem	22
Obr. 20: Zrnitostní křivka granulátu frakce 0/4	24
Obr. 21: Zrnitostní křivka granulátu frakce 4/8	25
Obr. 22: Zrnitostní křivka těžného kameniva frakce 0/4.....	26
Obr. 23: Zrnitostní křivka těžného kameniva frakce 4/8.....	27
Obr. 24: Porovnání hustoty matrice jednotlivých testovaných betonů	37

Obr. 25: Porovnání objemových hmotností testovaných betonů	38
Obr. 26: Porovnání otevřené pórovitosti testovaných betonů.....	39
Obr. 27: Porovnání pevností v tahu za ohybu testovaných betonů	41
Obr. 28: Srovnání pevností v tlaku trámečků a krychlí	43
Obr. 29: Porovnání modulu pružnosti testovaných betonů.....	45
Obr. 30: Porovnání součinitele tepelné vodivosti testovaných betonů	47
Obr. 31: Porovnání měrné objemové kapacity testovaných betonů.....	48
Obr. 32: Závislost tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti testovaných betonů ...	48
Obr. 33: Porovnání součinitele vlhkostní vodivosti testovaných betonů.....	49
Obr. 34: Porovnání absorpčního součinitele vody testovaných betonů.....	50
Obr. 35: Porovnání sorptivity testovaných betonů.....	50
Obr. 36: Porovnání součinitele difúze vodní páry testovaných betonů	51
Obr. 37: Porovnání faktoru difuzního odporu testovaných betonů.....	52
Obr. 38: Porovnání úbytku hmotnosti vzorků po tepelném zatížení, krychle o hraně 100 mm.....	53
Obr. 39: Změna objemové hmotnosti vzorků po tepelném zatížení, krychle o hraně 100 mm.....	54
Obr. 40: Změna součinitele tepelné vodivosti po tepelném zatížení	55
Obr. 41: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu po tepelném zatížení vzorků, trámečky 40 × 40 × 160 mm	56
Obr. 42: Porovnání pevnosti v tlaku po tepelném zatížení vzorků, zatěžovací plocha 40 × 40 mm.....	57
Obr. 43: Porovnání modulu pružnosti po tepelném zatížení vzorků, trámečky 40 × 40 × 160 mm	58
Obr. 44: Struktura vzorku Ref.....	59
Obr. 45: Struktura vzorku P4-10.....	59
Obr. 46: Struktura vzorku P4-20.....	60
Obr. 47: Struktura vzorku P4-30.....	60
Obr. 48: Struktura vzorku P8-10.....	60
Obr. 49: Struktura vzorku P8-20.....	61

Obr. 50: Struktura vzorku P8-30.....	61
Obr. 51: Struktura vzorku P4+P8-10	61
Obr. 52: Struktura vzorku P4+P8-20	62

Seznam tabulek

Tab. 1: Receptura studovaných betonů	19
Tab. 2: Mechanické vlastnosti studovaných betonů	19
Tab. 3: Receptura studovaných betonů	21
Tab. 4: Součinitel tepelné vodivosti studovaných betonů	21
Tab. 5: Chemické složení a mechanické vlastnosti cementu	23
Tab. 6: Hustota matrice gumového granulátu	23
Tab. 7: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost gumového granulátu frakce 0/4 ..	24
Tab. 8: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost gumového granulátu frakce 4/8 ..	24
Tab. 9: Hustota matrice těžného kameniva	25
Tab. 10: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost těžného kameniva frakce 0/4 ..	26
Tab. 11: Tepelné vlastnosti a sypná hmotnost těžného kameniva frakce 4/8 ..	26
Tab. 12: Receptura směsí	29
Tab. 13: Hustota matrice	37
Tab. 14: Objemová hmotnost	38
Tab. 15: Celková otevřená pórovitost	39
Tab. 16: Pevnost v tahu za ohybu	40
Tab. 17: Srovnání pevností v tahu za ohybu testovaných betonů	42
Tab. 18: Pevnost v tlaku	42
Tab. 19: Srovnání pevností v tlaku testovaných betonů	44
Tab. 20: Modul pružnosti	44
Tab. 21: Srovnání modulů pružnosti testovaných betonů	46
Tab. 22: Základní tepelné vlastnosti ve vysušeném stavu	46
Tab. 23: Parametry transportu kapalné vody	49
Tab. 24: Parametry transportu vodní páry	51
Tab. 25: Úbytek hmotnosti vzorků po tepelném zatížení	53
Tab. 26: Změna objemové hmotnosti vzorků po tepelném zatížení	54

Tab. 27: Změna součinitele tepelné vodivosti po tepelném zatížení	55
Tab. 28: Pevnost v tahu za ohybu po tepelném zatížení	56
Tab. 29: Pevnost v tlaku po tepelném zatížení.....	57
Tab. 30: Modul pružnosti po tepelném zatížení.....	58