

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební

**Mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu
s přísadou gumového recyklátu**

**Mechanical Properties and Durability of Concrete
with Admixture of Rubber Recycled**

Diplomová práce

Bc. Roman Chylík

Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Praha, 8.1.2017.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chylík	Jméno: Roman	Osobní číslo: 395617
Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství		
Studijní obor: (3608T008) Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu s přísadou gumového recyklátu	
Název diplomové práce anglicky: Mechanical Properties and Durability of Concrete with Admixture of Rubber Recycled	
Pokyny pro vypracování: - Optimalizace receptury betonu s využitím gumové drti z recyklovaných pneumatik - Příprava a výroba zkušebních těles - Zkoušky mechanických vlastností a vyhodnocení	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.	
Datum zadání diplomové práce: 11.10.2016	Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
<small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>	
	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>11.10.2016</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Jitce Vaškové, CSc. a Ing. Josefu Fládrovi Ph.D za odborné vedení, dobré rady, věcné připomínky, vstřícnost a strávený čas při konzultacích nad touto diplomovou prací. Ing. Josefu Fládrovi dále děkuji za skvělé vedení a pomoc při výrobě zkušebních těles a následném provádění normových zkoušek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Obsah

1	Úvod	4
2	Gumový recyklát a jeho vlastnosti	6
2.1	Výroba	6
2.2	Využití	6
2.3	Vlastnosti	6
3	Experimentální program	8
3.1	Cíl experimentálního programu	8
3.2	Provedené zkoušky	8
3.2.1	Zkoušky čerstvého betonu	8
3.2.2	Zkoušky ztvrdlého betonu	8
3.2.3	Elektronová mikroskopie	8
3.3	Receptura gumobetonu	9
3.4	Značení vzorků	12
4	Vlastnosti čerstvého betonu s příměsí gumového recyklátu	13
4.1	Zkouška sednutím kužele	13
4.1.1	Postup zkoušky sednutím	13
4.1.2	Výsledky zkoušky sednutím	14
4.2	Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu	16
4.2.1	Postup zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu	16
4.2.2	Výsledky zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu	16
4.2.3	Vyhodnocení zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu	17
4.2.4	Posouzení z ekonomického hlediska	20
5	Vliv gumového recyklátu na pórovitost a kvalitu povrchu	21
5.1	Pórovitost vyzrálého betonu	21
5.2	Zkouška pórovitosti pomocí metody Torrent Permeability Tester	21
5.3	Vyhodnocení zkoušky pórovitosti	22
5.4	Vliv gumového recyklátu na kvalitu povrchu	25
6	Vliv gumového recyklátu na mechanickou odolnost	27
6.1	Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3	29
6.2	Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku	30
6.2.1	Pevnost v tlaku po 7 dnech	30
6.2.2	Pevnost v tlaku po 28 dnech	32
6.2.3	Pevnost v tlaku po 45 dnech	33
6.2.4	Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tlaku	34

6.3	Vliv přečištěné gumy	35
6.4	Pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6	36
6.4.1	Zkouška pevnosti v příčném tahu	36
6.4.2	Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu	37
6.4.3	Vyhodnocení zkoušky pevnosti v příčném tahu	39
6.5	Charakteristické hodnoty pevnosti betonu s příměsí gumového recyklátu . . .	40
6.5.1	Charakteristická pevnost v tlaku po 7 dnech	41
6.5.2	Charakteristická pevnost v tlaku po 28 dnech	41
6.5.3	Charakteristická pevnost v příčném tahu po 7 dnech	41
7	Vliv gumového recyklátu na trvanlivost	42
7.1	Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám	42
7.1.1	Vliv koncentrace rozmrazovací látky	42
7.1.2	Omezení účinku chemických rozmrazovacích látek	43
7.2	Zkouška odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám dle ČSN 73 1326/Z1 - Met. A	43
7.2.1	Postup zkoušky	43
7.2.2	Vyhodnocení zkoušky	44
7.2.3	Zkouška CHRL Č. 1	45
7.2.4	Zkouška CHRL Č. 2	47
7.2.5	Zkouška CHRL Č. 3	50
7.2.6	Vyhodnocení zkoušek CHRL	53
7.3	Odolnost proti působení tlakové vody	55
7.4	Zkouška tlakové vody dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou	56
7.4.1	Popis zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou	56
7.4.2	Výsledky	56
7.4.3	Vyhodnocení	56
8	Vliv gumového recyklátu na objemové změny betonu	58
8.1	Smršťování betonu	58
8.2	Experimentální měření	60
8.2.1	Experimentální měření smršťování	60
8.2.2	Vyhodnocení	63
9	Elektronová mikroskopie	64
9.1	Primární a sekundární elektrony	65
9.1.1	Receptura REF	65
9.1.2	Receptura GUM 0/100	66
9.1.3	Receptura GUM 100/0	68
9.2	Vyhodnocení množství nezhydratovaných cementových zrn a pórů	69
9.2.1	Receptura REF	70
9.2.2	Receptura GUM 0/100	71
9.2.3	Receptura GUM 100/00	73
9.3	Vyhodnocení elektronové mikroskopie	74
10	Závěr	75
	Literatura	A.1
11	Přílohy	B.1

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na beton s příměsí gumového recyklátu, který je obecně nazýván "Crumb Rubber Concrete" nebo "CRC". Jeden z prvních CRC byl vytvořen a aplikován v Arizoně. Arizona má zcela odlišné klimatické podmínky než Střední Evropa. Může nalézt beton s příměsí gumového recyklátu využití i v Evropských klimatických podmínkách?

Experimentální program provedený v rámci diplomové práce hodnotí vliv gumového prášku na materiálové charakteristiky a trvanlivost CRC. Vlastnosti CRC s proměnným množstvím jemné a hrubé gumové drti byly vzájemně porovnávány. Testovanými parametry byly zkouška sednutí, obsah vzduchu v čerstvém betonu, permeabilita betonu, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, odolnost proti tlakové vodě, pevnost v tlaku a měření objemových změn. Testy prokázaly, že zpracovatelnost, pevnost v tlaku a permeabilita klesá s rostoucím množstvím gumového recyklátu, zatímco obsah vzduchu v čerstvém betonu se se zvyšujícím množstvím gumy zvětšuje. Na fotografiích z elektronového mikroskopu byly porovnávány póry, jejich velikost, tvar a vzdálenost na vzorcích s gumovým recyklátem a bez něho.

Testy prokázaly, že přidání gumového recyklátu do betonové směsi může mít pozitivní vliv na trvanlivost a současně přispěje k trvale udržitelnému rozvoji. S ohledem na snížení pevnosti v tlaku se doporučuje využívat CRC v aplikacích, kde není vysoká hodnota pevnosti v tlaku požadována.

Klíčová slova: beton, gumobeton, gumový recyklát, trvanlivost, mechanické vlastnosti

Abstract

This paper is focused on concrete with admixture of rubber powder, generally called „Crumb Rubber Concrete” or „CRC“. One of the first CRC has been created in Arizona. Arizona has completely different climates than Central Europe. Could we use the crumb rubber concrete on construction applications in European climates too?

The paper evaluates the influence of the rubber powder on material characteristics and durability of CRC. CRCs with various content of fine and coarse crumb powder were compared. The tested parameters were slump test, air content, permeability, resistance of concrete to chloride ion penetration and compressive strength. The tests showed, that workability, compressive strength and permeability decreased as the amount of rubber increased, but the air content increased as the rubber content increased. Photos of air voids in cement matrix from electron microscope were compared with concrete without admixture of rubber powder.

The result of laboratory tests showed that admixture of rubber powder in concrete could have a positive impact on durability of concrete and concurrently contribute to sustainable development. Considering the lower compressive strength, CRC is recommended for use in applications where the high strength of concrete is not required.

Key words: concrete, crumb rubber concrete, mechanical properties and durability, rubber recycling

Kapitola 1

Úvod

V posledních desetiletích došlo k enormnímu nárůstu silniční dopravy. Jev je způsoben hospodářskými úspěchy a ekonomickým růstem, kterého společnost dosáhla. Jedná se především o členské státy Evropské unie, Spojené státy americké, Čínskou lidovou republiku, Rusko, Indii a Brazílii. Zejména dva posledně jmenované státy mají ohromný potenciál stát se ekonomicky nejrozvinutějšími na světě. Tento na první pohled úspěch však přináší i mnohá úskalí. Jedním z těchto úskalí je zejména nadměrné znečišťování planety a zvýšená produkce odpadu.

S již výše zmíněným nárůstem silniční dopravy vznikl problém, jak si poradit se stále se zvyšujícím množstvím pneumatik, které automobilová doprava produkuje. V roce 1992 bylo z celkového množství produkováných pneumatik 65 % uskladněno na skládkách a pouze 35% recyklováno. O deset let později, v roce 2002, byla situace zcela opačná. K recyklaci nebo následnému využití bylo použito více než 65% pneumatik a méně než 35% uskladněno[1]. Nyní je ve světě ročně vyprodukováno téměř 1000 milionů pneumatik, do roku 2030 se očekává nárůst až na 1200 milionů. [2]

Recyklace pneumatik se tak stala celosvětovým problémem. V mnoha zemích, zejména méně rozvinutých, je nejrozšířenějším způsobem likvidace spalování. To však má za následek značné znečišťování ovzduší. Mnohem ekologičtější a z hlediska dalšího využití výhodnější je drcení.

V posledních letech byla provedena řada výzkumů zabývajících se využitím gumového recyklátu. Jedním z testovaného využití bylo přidávání drti do cementových kompozitů. Materiál pak bývá souhrnně označován jako "Crumb Rubber Concrete" nebo "Rubber Modified Concrete" [1]. Kolem roku 1990 začínala spolupráce mezi The Arizona Department of Transportation (ADOT) a Arizona State University (ASU). Tři roky společného výzkumu vedly k prvotnímu využití gumové drti v materiálu Portland Cement Concrete (PCC) [3]. Součástí výzkumu byl vliv gumového recyklátu na pevnost a trvanlivost betonu. Výsledky ukázaly, že přidáním gumového recyklátu do betonové směsi se nejenom recykluje materiál a podporuje se myšlenka trvale udržitelného rozvoje, ale lze pozitivně ovlivnit vlastnosti betonu. Prvotně byl materiál využit například na stezky, silnice, chodníky, cyklostezky a sportoviště. Jedná se tedy o aplikace, kde není kladen vysoký požadavek na pevnost a únosnost.

Ve státě Arizona průměrné roční teploty v žádném měsíci neklesají pod bod mrazu. V lednu činí průměrná teplota 12,0°C, v červenci pak 34,2°C. Rovněž počty deštivých dní jsou ve srovnání s Českou republikou výrazně menší. Dlouhodobě nejdeštivější měsíce v Arizoně jsou březen, červenec, srpen a prosinec. V těchto měsících prší průměrně

3x. Z tohoto pohledu jsou klimatické podmínky s Českou republikou nesrovnatelné. Z rozdílných klimatických podmínek plynou i jiné požadavky na odolnost a trvanlivost. Není vyloučeno, že počet zmrazovacích cyklů za jednu zimu v České republice a Střední Evropě nebude v Arizoně a jiných místech s podobným klimatem dosažen za celou životnost konstrukce. Má tedy Crumb Rubber Concrete reálné využití v oblasti mírného podnebného pásu?

Diplomová práce z výsledků experimentálního programu hodnotí mechanické vlastnosti a trvanlivost Crumb Rubber Concrete a navrhuje případné možnosti aplikace.

Kapitola 2

Gumový recyklát a jeho vlastnosti

2.1 Výroba

Nejrozšířenější metodou použitou při výrobě pryžového granulátu je mechanické drcení. Ocelové součásti pneumatik jsou odděleny pomocí magnetických separátorů. Hrubě podrcené pneumatiky zbavené ocelových součástí jsou opakovaně drceny na jemnějších drtičích, až granulát dosáhne požadované frakce. Vybrané frakce jsou vidět na obrázku 2.1.

Variantou k běžnému drcení je kryogenní drcení, proces je založen na zmrazení podrcených pneumatik na extrémně nízké teploty. Takto zmrazený materiál se velmi snadno rozbíjí na drobné částice. Kryogenní drcení se využívá zejména pro získávání gumového prachu, je čistší než prach získaný drcením za standardní teploty. Nevýhodou kryogenního drcení jsou zvýšené náklady na chladicí procesy, ke kterým se využívá tekutý dusík.

Výsledným produktem recyklace se stává gumový granulát, ocelový kord a textil s neuvolněnými částicemi gumy. Procento neuvolněných částic je přímo úměrné zvyšující se frakci gumy. [4]

2.2 Využití

Gumový recyklát má mnoho využití, jedná se například o výrobky z gumových kompozitů nebo modifikovaného asfaltu, izolační desky, sportovní povrchy, povrchy a bezpečnostní prvky dětských hřišť, povrchy jízďáren a stájí, podestýlky, mulčovací materiál, gumové rohože na povrchy parkovišť, rohože a desky využívané na železniční přejezdy atd.

Granulát rozpuštěný v rozpouštědlech pak slouží jako ochranný nátěr pro povrchy vystavené vlhkosti.

Rozsáhlé využití nachází gumový granulát jako plnivo nebo přísada v polymerních materiálech, zejména pak v betonu.[4]

2.3 Vlastnosti

Mezi základní fyzikální vlastnosti gumového recyklátu patří zejména hustota. Experimentálně byla změřena heliovým pyknometrem a její hodnota je přibližně 830 kg/m^3 .

Dalšími vlastnostmi jsou koheze a úhel vnitřního tření. Koheze nabývá hodnot od 6,5 do 50 kPa a úhel vnitřního tření je v rozmezí 8 - 25° v závislosti na frakci gumového granulátu. [6]

Z hlediska chemické analýzy je drobný rozdíl mezi granulátem vyrobeným z pneumatik osobních automobilů a nákladních vozidel.

Tabulka 2.1: Chemická analýza gumového recyklátu [6]

Materiál	Zastoupení v %
Kaučuk	54
Uhlíková čern	29
Textilní vlákno	2
Oxidy zinku	1
Síra	1
Jiné přísady	13



Obrázek 2.1: Granulát dle jemnosti mletí [38]

Kapitola 3

Experimentální program

3.1 Cíl experimentálního programu

Cílem diplomové práce bylo provést obsáhlé zkoušky gumobetonu, zhodnotit negativní a pozitivní vlivy gumového recyklátu na zpracovatelnost, pevnost a trvanlivost, dále stanovit optimální poměr frakcí gumového recyklátu a optimalizovat recepturu pro požadované vlastnosti.

3.2 Provedené zkoušky

3.2.1 Zkoušky čerstvého betonu

- Stanovení konzistence - zkouška sednutím dle *ČSN EN 12350-2* [5]
- Stanovení obsahu vzduchu dle *ČSN EN 12350-7* [34]

3.2.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

- Zkoušení pevnosti v tlaku vč. výroby zkušebních těles dle *ČSN EN 12390-3* [31]
- Zkoušení pevnosti v příčném tahu dle *ČSN EN 12390-6* [35]
- Měření porozity dle *SN 505 262/1*
- Zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle *ČSN 73 1326*[18]
- Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou dle *ČSN EN 12390-8*[25]
- Stanovení objemových změn. smršťování a nabývání dle *ČSN 73 1320* [40]

3.2.3 Elektronová mikroskopie

- Elektronová mikroskopie za účelem zjištění vlivu gumového recyklátu na cementovou matici

3.3 Receptura gumobetonu

Veškeré zkoušky byly provedeny na vzorcích vyrobených dle receptury uvedené v tabulce 3.1. Množství přidané gummy 40 kg/m^3 bylo konstantní pro všechny procentní poměry jemné a hrubé gummy. Hmotnostní poměry jemné a hrubé gummy byly proměnné viz. tabulka 3.5. Hmotnostní poměry přidané gummy v případě receptury obsahující 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 gumového recyklátu jsou uvedeny v tabulce 3.6 a 3.7.

Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu, zkouška pevnosti v tlaku, zkouška pevnosti v příčném tahu a elektronová mikroskopie byla navíc provedena při použití gumové drti v množství 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 .

Popis značení vzorků a odlišení receptur je v kapitole 3.4. V tabulce 3.2 a obrázku 3.1 je zrnitostní křivka kameniva. Mineralogické složení cementu a jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.3 a 3.4.

Tabulka 3.1: Receptura gumobetonu

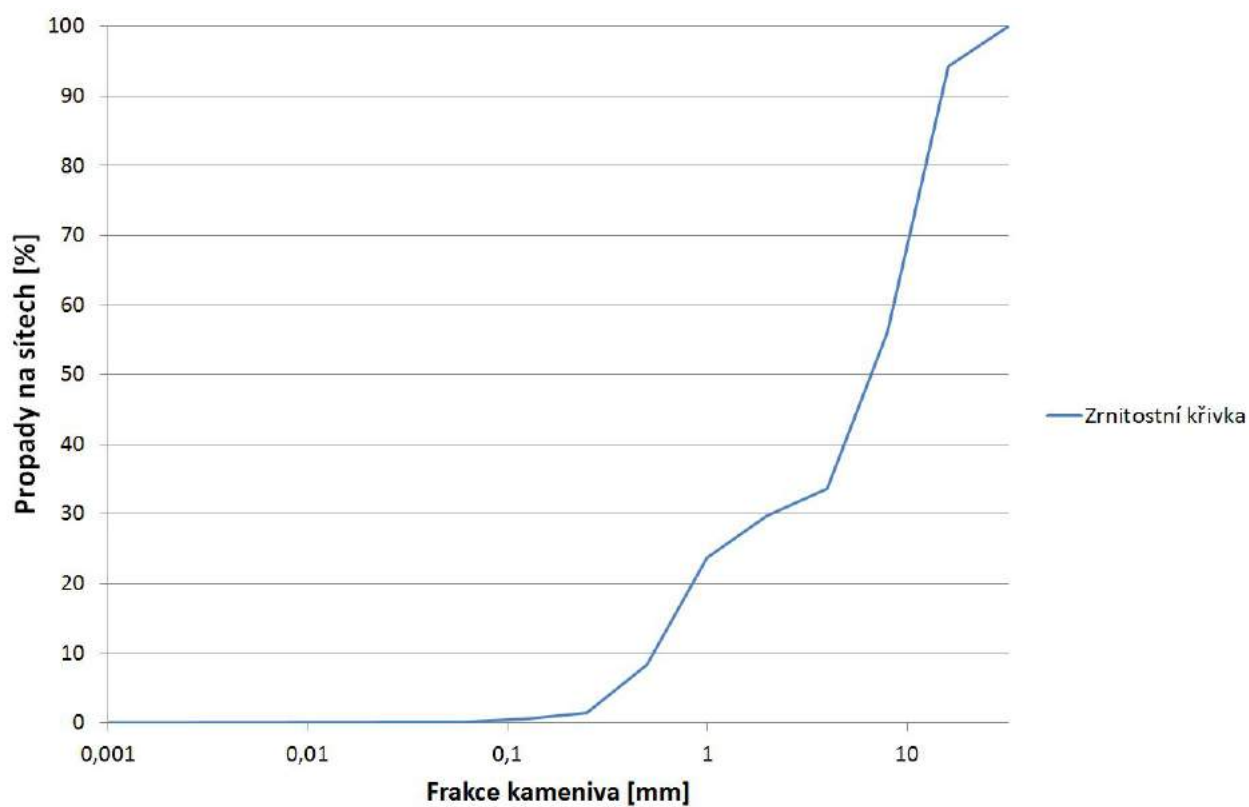
Složka	Množství [kg/m^3]
CEM I 42,5 R Mokrý	410
Voda	200
Kamenivo 8 - 16	620
Kamenivo 4 - 8	340
Kamenivo 0 - 4	840
Superplastifikátor Stacement 2180	0,82
Guma	40

- Jemná frakce gumového recyklátu - $0 - 1 \text{ mm}$
- Hrubá frakce gumového recyklátu - $1 - 3 \text{ mm}$
- Vodní součinitel navržené receptury¹ - $0,49$
- Objemová hmotnost navržené receptury - 2450 kg/m^3

¹Vodní součinitel (Water/Cement ratio) je poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu - v [kg/m^3] / c [kg/m^3]. Běžně se vodní součinitel pohybuje v hodnotách od 0,3 do 0,6. Beton s nižším vodním součinitelem vykazuje lepší mechanické vlastnosti (pevnosti, modul pružnosti, odolnost vůči průsaku tlakové vody) a vyšší trvanlivost než beton s vyšším vodním součinitelem. [22]

Tabulka 3.2: Zrnitostní křivka kameniva

Síto	Propad [g]	Zbytek [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
32	0	0	0	100
16	171,3	5,7	5,7	94,3
8	1143,0	38,3	44,0	56
4	668,1	22,4	66,4	33,6
2	116,3	3,9	70,3	29,7
0,5	458,3	15,3	91,6	8,4
0,25	205,8	6,9	98,5	1,5
0,125	29,4	1,0	99,5	0,5
0,063	10,3	0,3	99,8	0,2
0,001	5,0	0,2	100	0,0



Obrázek 3.1: Zrnitostní křivka

Tabulka 3.3: Mineralogické složení cementu [39]

Složka	Množství %
CaO	64,2
SiO_2	19,5
Al_2O_3	4,7
Fe_2O_3	3,2
MgO	1,3
SO_3	3,2
Cl^-	0,047
K_2O	0,78
Na_2O	0,09
Na_2O Ekvivalent	0,6
Nerozpustný zbytek	0,7
Ztráta žháním	3,3

Tabulka 3.4: Fyzikální a mechanické vlastnosti cementu [39]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tlaku 1 den	MPa	14
Pevnost v tlaku 2 den	MPa	29
Pevnost v tlaku 7 den	MPa	51
Pevnost v tlaku 28 den	MPa	61
Pevnost v tlaku 56 den	MPa	66
Pevnost v tlaku 90 den	MPa	67
Pevnost v tahu za ohybu 1 den	MPa	4
Pevnost v tahu za ohybu 2 den	MPa	6
Pevnost v tahu za ohybu 7 den	MPa	8
Pevnost v tahu za ohybu 28 den	MPa	9
Pevnost v tahu za ohybu 56 den	MPa	9
Pevnost v tahu za ohybu 90 den	MPa	9
Počátek tuhnutí	min	201
Konec tuhnutí	min	264
Objemová stálost	mm	0,8
Měrný povrch	m^2/kg	381
Hydratační teplo 7 dní	J/g	310

Tabulka 3.5: Hmotnostní poměry jemné a hrubé gumy pro množství 40 kg/m^3

Označení	0 - 1 [kg/m^3]	1 - 3 [kg/m^3]
REF	0	0
GUM 0/100	0	40
GUM 20/80	8	32
GUM 40/60	16	24
GUM 60/40	24	16
GUM 80/20	32	8
GUM 100/0	40	0

Tabulka 3.6: Hmotnostní poměry jemné a hrubé gumy pro množství 80 kg/m^3

Označení	0 - 1 [kg/m^3]	1 - 3 [kg/m^3]
80 - GUM 0/100	0	80
80 - GUM 100/0	80	0

Tabulka 3.7: Hmotnostní poměry jemné a hrubé gumy pro množství 120 kg/m^3

Označení	0 - 1 [kg/m^3]	1 - 3 [kg/m^3]
120 - GUM 0/100	0	120
120 - GUM 100/0	120	0

3.4 Značení vzorků

- *REF* - Referenční receptura neobsahující gumu
- *GUM X/Y, 40* - *GUM X/Y* - Receptura obsahující gumový recyklát v množství 40 kg/m^3 kde X značí procentuální poměr jemné frakce a Y procentuální poměr hrubé frakce gumového recyklátu.
- *80* - *GUM X/Y* - Receptura obsahující gumový recyklát v množství 80 kg/m^3 kde X značí procentuální poměr jemné frakce a Y procentuální poměr hrubé frakce gumového recyklátu.
- *120* - *GUM X/Y* - Receptura obsahující gumový recyklát v množství 120 kg/m^3 kde X značí procentuální poměr jemné frakce a Y procentuální poměr hrubé frakce gumového recyklátu.

Kapitola 4

Vlastnosti čerstvého betonu s příměsí gumového recyklátu

4.1 Zkouška sednutím kužele

Zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím* neboli "slump test" je jedna ze základních zkoušek pro měření konzistence čerstvého betonu. Zkouška probíhá v čase $t=60$ [s] od zamíchání směsi.

4.1.1 Postup zkoušky sednutím

- Navlhčení měřicí desky i kužele
- Naplnění první třetiny kužele a zhutnění 25 vpichy pomocí hutnicí tyče
- Naplnění druhé třetiny kužele a zhutnění 25 vpichy pomocí hutnicí tyče tak, aby došlo k propojení s první vrstvou
- Naplnění zbytku kužele a zhutnění 25 vpichy pomocí hutnicí tyče tak, aby došlo k propojení s první a druhou vrstvou
- Urovnání horní hrany kužele, případné odebrání nebo doplnění betonu
- Zvednutí formy plynulým pohybem a měření nejmenší hodnoty sednutí viz obrázek 4.1



Obrázek 4.1: Schéma zkoušky [5]



Obrázek 4.2: Druhy sednutí [5]

4.1.2 Výsledky zkoušky sednutí

Měřením¹ pro všechny poměry² přidané gumy, byla zjištěna závislost, že s přibývajícím množstvím gumy jemné (0-1 mm) sednutí kužele klesá. Závislost a naměřené hodnoty je možno vidět v tab. 4.1 a na obrázku 4.5.

Tabulka 4.1: Sednutí kužele

Poměr	Sednutí [mm]	Třída konzistence
REF	70	S2
GUM 0/100	35	S1
GUM 20/80	45	S1
GUM 40/60	30	S1
GUM 60/40	28	S1
GUM 80/20	16	S1
GUM 100/0	25	S1



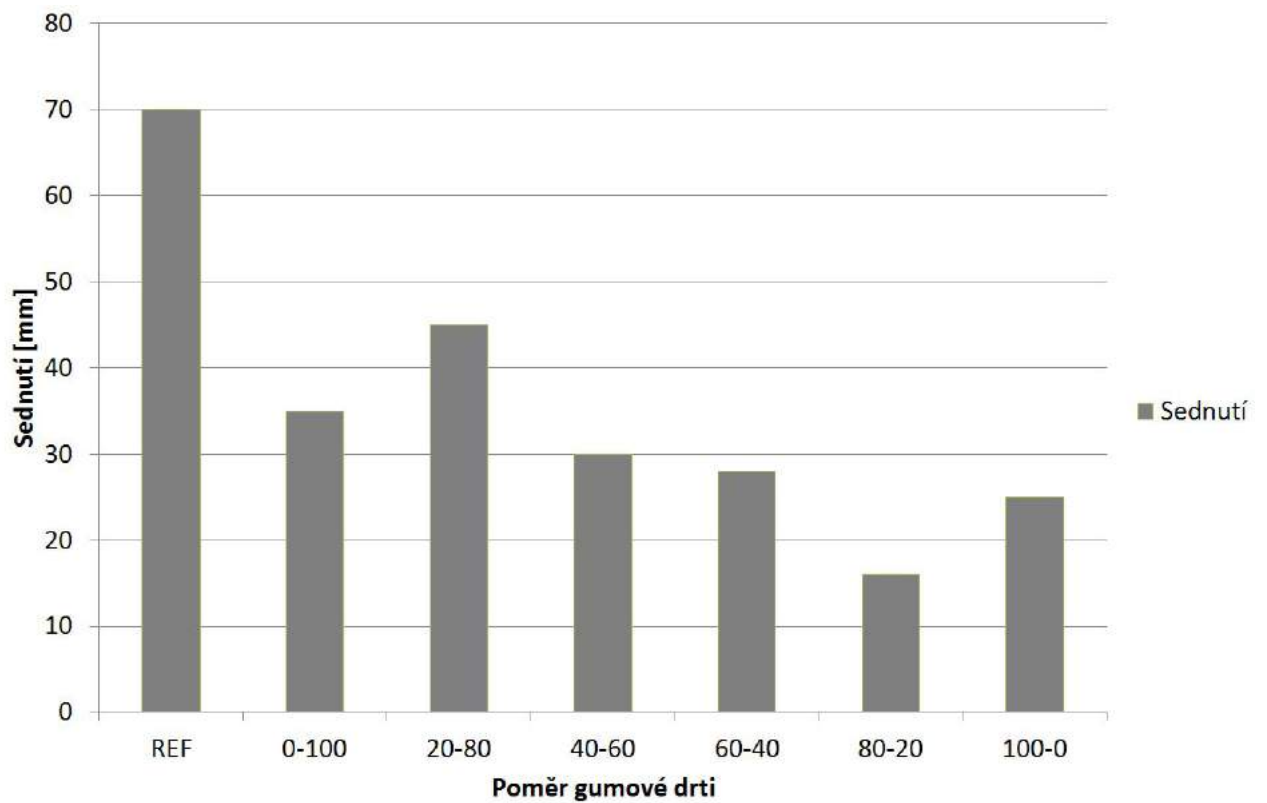
Obrázek 4.3: Sednutí kužele



Obrázek 4.4: Sednutí kužele

¹Zkouška byla provedena při množství gumového recyklátu 40 kg/m³

²Poměr gumy je značen v pořadí jemná - hrubá



Obrázek 4.5: Sednutí kužele v závislosti na poměru přidané gumy

Je zřejmé, že přidání gumové drti do betonové směsi zhoršuje zpracovatelnost. Změna zpracovatelnosti je přímo úměrná množství přidaného gumového recyklátu, ale i jeho frakci. Tento efekt gumové drti na čerstvý beton lze omezit navýšením množství plastifikátoru.

4.2 Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu dle *ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody* je další z dílčích zkoušek čerstvého betonu. Princip spočívá v měření neznámého objemu vzduchu o neznámém tlaku v nádobě s betonem o známém objemu.

4.2.1 Postup zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu

- Naplnění spodní nádoby o objemu 5l čerstvým betonem po vrstvách tak, aby byl beton zcela zhutněn. Dle konzistence čerstvého betonu je zvolen vhodný typ hutnění
- Očištění horní hrany spodní nádoby, aby bylo možné vzduchotěsné uzavření
- Uzavření hlavního ventilu spojující spodní a horní nádobu a zaplnění zbývajících prostorů v dolní nádobě vodou
- Uzavření vedlejšího ventilu spodní nádoby, tím dojde ke vzduchotěsnému uzavření
- Vytvoření vakua v horní nádobě pomocí pumpičky
- Otevření hlavního ventilu a sledování tlaku v horní nádobě
- Odečtení hodnoty obsahu vzduchu v čerstvém betonu v %

4.2.2 Výsledky zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Experimentálně byly naměřeny pro různé poměry³ gumového recyklátu hodnoty uvedené v tabulkách 4.2, 4.3 a 4.3:

Tabulka 4.2: Obsah vzduchu v čerstvém betonu - množství gumové drti 40 kg/m³

Receptura	Obsah [%]
REF	2,1
GUM 0/100	2,7
GUM 20/80	3,0
GUM 40/60	3,6
GUM 60/40	4,0
GUM 80/20	5,0
GUM 100/0	7,0

³Poměr frakcí gumy je značen v pořadí jemná - hrubá

Tabulka 4.3: Obsah vzduchu v čerstvém betonu - množství gumové drti 80 kg/m³

Receptura	Obsah [%]
80 - GUM 0/100	5,5
80 - GUM 100/0	8,5

Tabulka 4.4: Obsah vzduchu v čerstvém betonu - množství gumové drti 120 kg/m³

Receptura	Obsah [%]
120 - GUM 0/100	6,1
120 - GUM 100/0	7,9

4.2.3 Vyhodnocení zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Z naměřených hodnot jasně vyplývá závislost množství obsahu vzduchu v čerstvém betonu na frakci použité gumy a jejímu celkovému množství. Tím je prokázáno, že gumový recyklát působí jako provzdušňovací přísada⁴. Důvod, proč gumový recyklát vnáší do betonu bublinky vzduchu je hydrofobní⁵ a sorpční⁶ povaha povrchu gumy. S převažujícím obsahem jemného gumového recyklátu je výraznější vliv provzdušnění. Toto je dáno větším měrným povrchem jemně mleté gumy. Na rozdíl od klasických provzdušňovacích přísad gumový recyklát nevykazuje plastifikační účinky⁷, spíše naopak. Množství vzduchu v čerstvém betonu je tedy závislé nejvíce na poměru frakcí přidané gumy, ale i na jejím celkovém množství [3]. Na obrázku 4.6 je znázorněna závislost provzdušnění betonu na množství gumového recyklátu pro receptury GUM 0/100 a GUM 100/0.

⁴ Provzdušňovací přísady - používají se u betonů vystavených účinkům mrazu a CHRL (chemické rozmrazovací látky) zejména ve vodním, silničním a mostním stavitelství. Jsou to látky, které vytvářejí v čerstvém betonu velké množství uzavřených vzduchových pórů. Provzdušněním vytvořené vzduchové póry jsou expanzíním prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu. Póry snižují hydrostatický tlak v pórovité struktuře. Velikost pórů se pohybuje od 0,05 do 0,3 mm. Provzdušňovací přísady mají plastifikační účinky. Jako provzdušňovací přísady se používají mýdla přirozených pryskyřic, syntetické neionogenní a anionogenní tenzidy a další. [7]

⁵Hydrofobní látky - látky vodu odpuzující. Molekuly na povrchu nenesou žádný náboj a jsou schopny vytvářet jen velmi málo nebo žádné vodíkové můstky.

⁶Sorbent - látka schopná na sebe vázat tuhé látky, kapaliny a plyny.

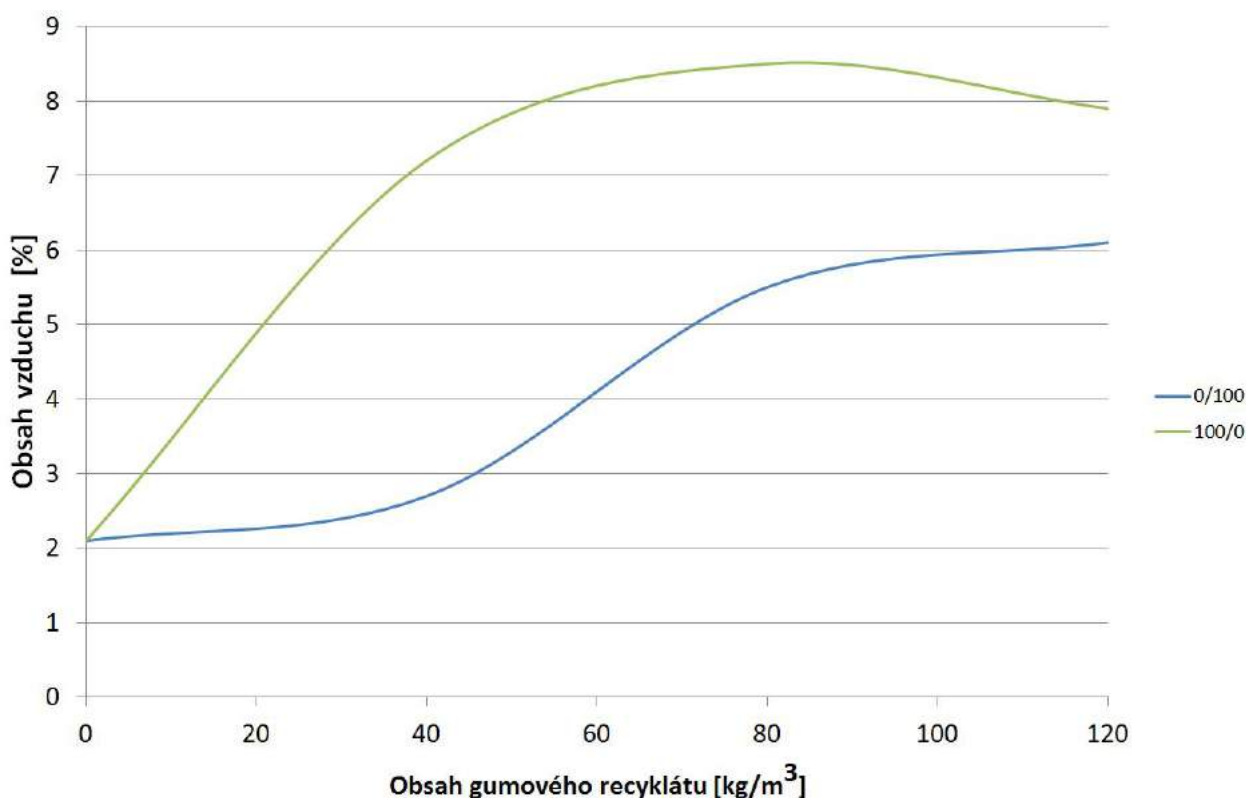
⁷Plastifikační přísady - zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu, snižují potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti, tím dochází k snížení vodního součinitele a nárůstu pevnosti ztvrdlého betonu. Jedná se o sulfitové výluhy, lignisulfonáty se sulfaminkresolem, sulfitově modifikované melaminové pryskyřice, hydrolyzáty bílkovin, sulfonované mastné kyseliny, polykarboxiláty a další látky.[8]

Z výsledků pro receptury GUM 0/100 a GUM 100/0 byla odvozena závislost obsahu vzduchu v čerstvém betonu na množství gumového recyklátu. Tuto závislost lze vyjádřit rovnicí 4.1 pro recepturu obsahující hrubou frakci gumové drti a rovnicí 4.2 pro recepturu s jemnou frakcí gumového recyklátu.

$$P = -2^{-18}x^2 + 0,037x + 1,88 \quad (4.1)$$

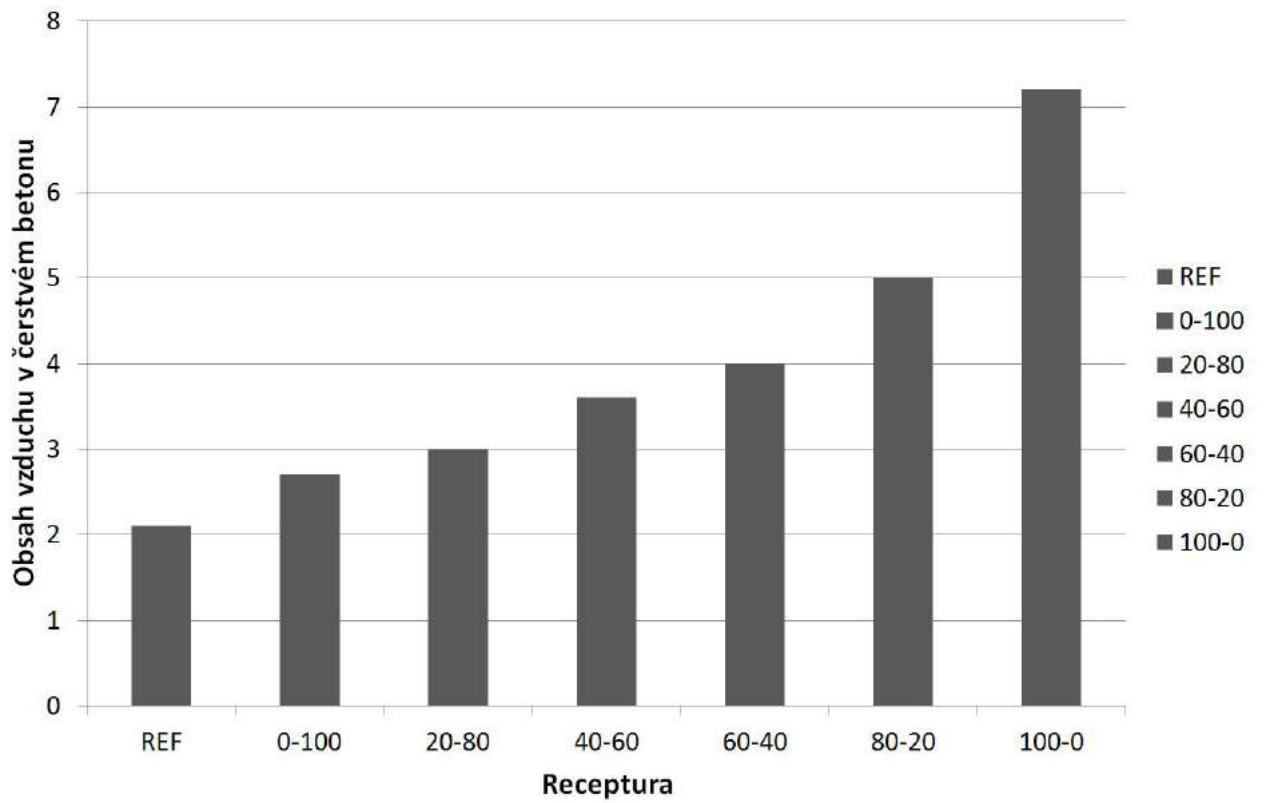
$$P = -0,0009x^2 + 0,1536x + 2,195 \quad (4.2)$$

- P - obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]
- x - množství přidané gumové drti [kg/m^3]



Obrázek 4.6: Závislost obsahu vzduchu v čerstvém betonu na množství gumové drti

Na obrázku 4.7 je znázorněna změna obsahu vzduchu v čerstvém betonu pro recepturu REF a receptury GUM 0/100 až GUM 100/0.



Obrázek 4.7: Závislost obsahu vzduchu v čerstvém betonu na frakci gumové drti pro množství 40 kg/m^3



Obrázek 4.8: Zkušební zařízení



Obrázek 4.9: Výsledek měření

4.2.4 Posouzení z ekonomického hlediska

Pro hrubé ekonomické porovnání byly vybrány provzdušňovací přísady *Sika LPS-V* a *Microporan*.

Provzdušnění pomocí přísady Silka LPS-V. V technickém listu výrobku je určeno dávkování jako 0,2 - 0,8 % z hmotnosti cementu [kg/m^3]. K provzdušnění na hodnotu shodnou s tab. 4.2 pro směs GUM100/0 bylo vypočteno dávkování 0,25 % z hmotnosti cementu. Přepočtením dle tabulky 3.1 získáme potřebné množství provzdušňovací přísady $m = 1,025 kg/m^3$. Maloobchodní cena⁸ se pohybuje okolo 45 Kč/kg. Celková cena činí 46 Kč/ m^3 betonové směsi.

Provzdušnění pomocí přísady Microporan. K provzdušnění o 5%, tj. na rozdíl mezi recepturou REF a recepturou GUM 100/0 dle tabulky 4.2 pomocí provzdušňovací přísady Microporan je zapotřebí orientačně 1 kg/m^3 . Maloobchodní cena je 33,8 Kč/kg. Celková cena činí 33,8 Kč/ m^3 betonové směsi.

Provzdušnění pomocí gumového recyklátu. K provzdušnění pomocí jemného gumového recyklátu bylo za potřebí 40 kg/m^3 . Cena se pohybuje okolo 14 Kč/kg. Celková cena provzdušnění pomocí jemného gumového recyklátu činí 560 Kč/ m^3 betonové směsi.

Podobného efektu lze dosáhnout za pomoci 120 kg/m^3 hrubého gumového recyklátu. Cena hrubého recyklátu se pohybuje okolo 4 Kč/kg. Celková cena provzdušnění pomocí hrubého gumového recyklátu činí 480 Kč/ m^3 betonové směsi.

Zhodnocení ekonomického hlediska. Z ekonomického hlediska je využití gumového recyklátu jako provzdušňovací přísady silně nevýhodné. Důvody jsou tak omezeny jen na ekologii.

Tabulka 4.5: Srovnání ceny provzdušnění pomocí provzdušňovacích přísad a gumového recyklátu

Provzdušňovací činitel	Cena [Kč/ m^3]
Silka LPS-V	46
Microporan	33,8
Gumový recyklát jemný (0-1 mm)	560
Gumový recyklát hrubý (1-3 mm)	480

⁸Ceny použité pro hrubé ekonomické posouzení jsou uvažovány včetně DPH

Kapitola 5

Vliv gumového recyklátu na pórovitost a kvalitu povrchu

5.1 Pórovitost vyzrálého betonu

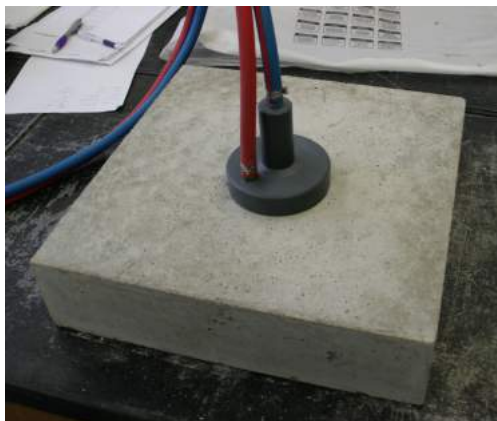
Druhy pórů Póry ve ztvrdlém betonu mají rozdílné důvody vzniku a tedy i rozdílnou velikost. Póry v betonu dle vzniku lze rozlišit:

- Gelové póry menší než $0,5 \text{ nm}$ - póry v krystalech, ovlivňují smršťování, voda vázaná v krystalické struktuře
- Gelové póry $0,5 - 2,5 \text{ nm}$ - mikropóry, gelové póry, ovlivňují smršťování, v pórech je silně adsorbovaná voda
- Gelové póry $2,5 - 10 \text{ nm}$ - malé gelové kapiláry, ovlivňují smršťování, v pórech působí silné povrchové napětí
- Kapilární póry velikosti $10 - 50 \text{ nm}$ - póry mají tvar středně velkých kapilár, mají vliv na pevnost, propustnost a smršťování, v pórech působí mírné povrchové napětí
- Kapilární póry velikosti $0,05 - 15 \text{ }\mu\text{m}$ - póry jsou velké kapiláry, ovlivňují pevnost a propustnost, obsahují volnou vodu. Výskyt těchto pórů je ovlivněn vodním součinitelem
- Mikropóry velikosti $15 - 1000 \text{ }\mu\text{m}$ - póry mají tvar velkých kulových dutin, mají vliv na pevnost a propustnost, obsahují volnou vodu
- Makropóry o průměru větším než 1 mm - póry mají tvar velkých dutin, vznikají z pohlceného vzduchu a zhutněním, mají negativní vliv na pevnost betonu, obsahují volnou vodu

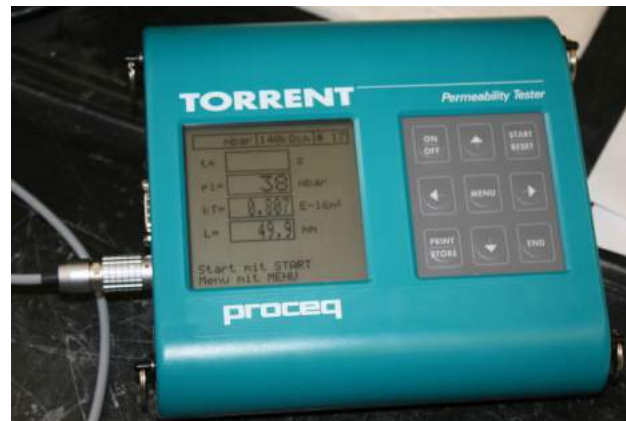
5.2 Zkouška pórovitosti pomocí metody Torrent Permeability Tester

Zkouška pomocí přístroje Torrent Permeability Tester není v České republice normalizovaná. Využívá se tak švýcarská norma SN 505 262/1. Vhodná je pro svoji jedno-

duchost, která dovoluje použití jak v laboratoři, tak na stavbě. Při zkoušce dochází k měření součinitele permeability ¹ $kT [m^2]$ a hloubky průniku vakua $L [mm]$. Princip spočívá ve vytvoření podtlaku 1000 *mbar*, vypnutím kompresoru a následném měření proudu vzduchu do vnitřní komory dokud se tlak ve vnitřní komoře nevyrovná. Dosah vakua je vzdálenost od povrchu vzorku, do které dokáže přístroj vyrobit požadovaný podtlak. Čím je tato hodnota menší, tím méně kapilárních, tedy otevřených, pórů vzorek obsahuje. Dosah vakua $L[mm]$ je znázorněn na obrázku 5.4.



Obrázek 5.1: Měření porozity



Obrázek 5.2: Měření porozity

5.3 Vyhodnocení zkoušky pórovitosti

Jak již bylo zmíněno výše, k vyhodnocení se užívá švýcarská norma SN 505 262/1. Výrobce přístroje PROCEQ udává převodní tabulku, dle které je možné vyhodnotit kvalitu povrchu krycí vrstvy betonu v závislosti na součiniteli kT . Výsledky zkoušky jsou ovlivněny aktuální vlhkostí vzorku a prostředí, kde byl vzorek uložen. Za optimální se považuje relativní vlhkost vzduchu 35 - 50 %, při hodnotách vlhkosti větších jak 70% dochází k nadhodnocení součinitele kT . Testované vzorky byly uloženy v prostředí s konstantní vlhkostí 40%. Experimentálně byly změřeny hodnoty uvedené v tabulce 5.1. Zatržídění kvality krycí vrstvy bylo provedeno dle tabulky 5.2.

¹Permeabilita - schopnost membrán propouštět tekutiny. Určuje průchodnost kapalin betonem a má přímou vazbu na trvanlivost s ohledem na odolnost proti působení cyklického zmrazování a vysušování (vnitřní namáhání porézni struktury) [20]

Tabulka 5.1: Porozita

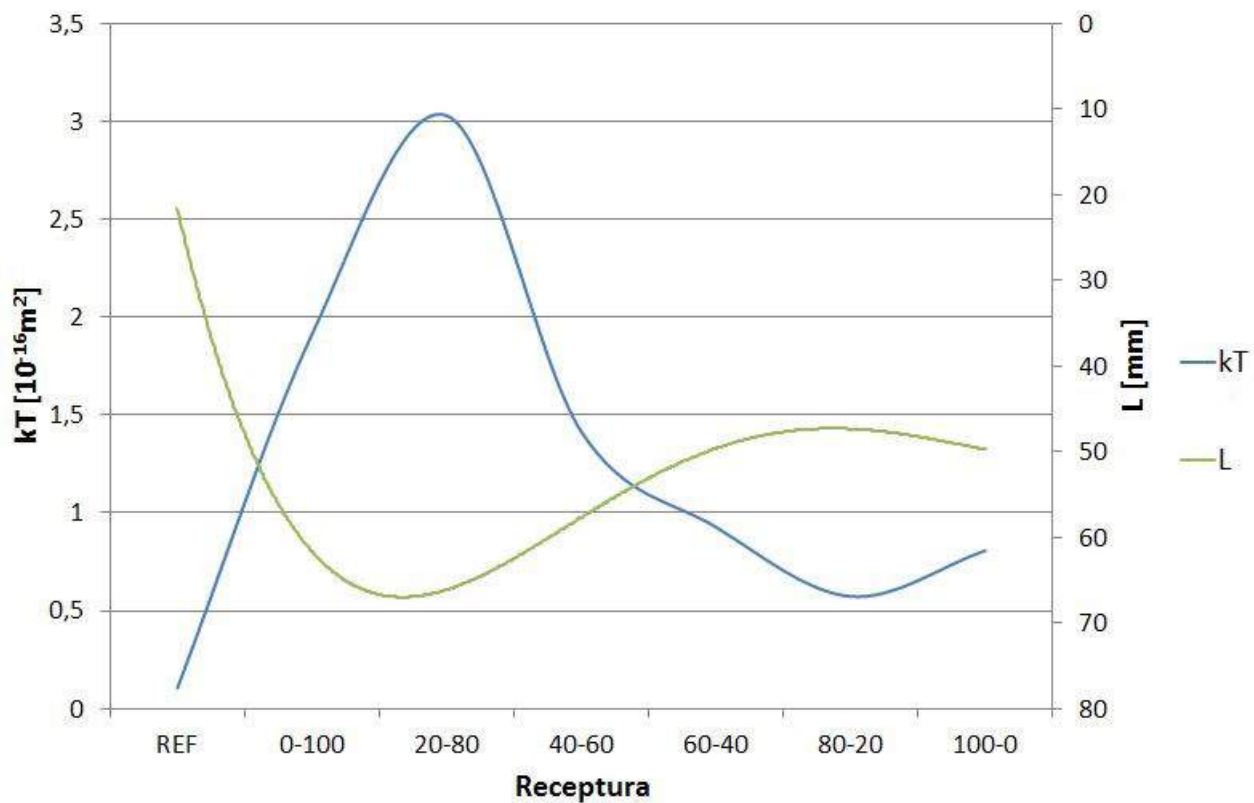
Poměr	kT [$10^{-16} m^2$]	Dosah vakua [mm]	Kvalita krycí vrstvy
REF	0,105	21,8	Střední
GUM 0/100	1,913	60,8	Špatná
GUM 20/80	3,028	68,3	Špatná
GUM 40/60	1,414	54,8	Špatná
GUM 60/40	0,927	51,8	Střední
GUM 80/20	0,573	46,5	Střední
GUM 100/0	0,807	49,9	Střední

Tabulka 5.2: Zatřídění kvality krycí vrstvy [41]

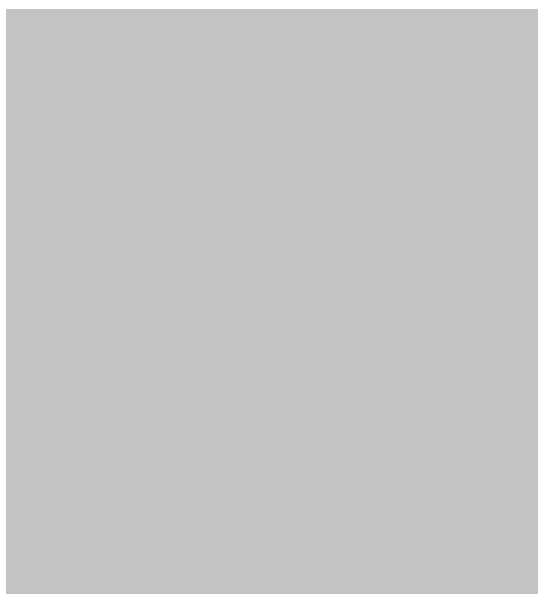
Kvalita krycí vrstvy	Index	kT [$10^{-16} m^2$]
Velmi špatná	5	10
Špatná	4	1,0 - 10
Střední	3	0,1 - 1,0
Dobrá	2	0,01 - 0,1
Velmi dobrá	1	0,01

Dle tabulky 5.1 je patrná závislost permeability a hloubce vakua na podílu jemné frakce gumy. Na obrázku 5.3 je graficky vyhodnocena závislost vakua a kvality krycí vrstvy betonu na poměru jemné a hrubé gumy.

V kombinaci s výsledky měření obsahu čerstvého vzduchu v betonu je zřejmé, že zvyšující se podíl jemné frakce gumového granulátu zvyšuje provzdušnění betonu. V betonu vzniká větší množství uzavřených pórů.



Obrázek 5.3: Závislost kvality krycí vrstvy a dosahu vakua na poměru frakcí jemné a hrubé gumy



Obrázek 5.4: Dosah vakua [42]

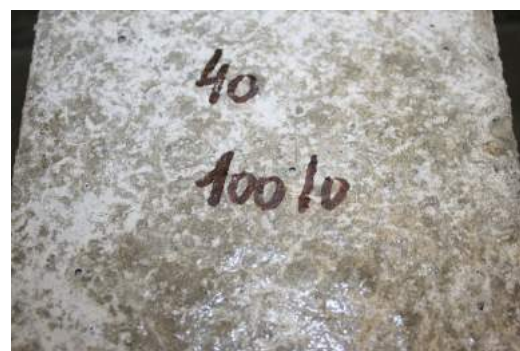
5.4 Vliv gumového recyklátu na kvalitu povrchu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.2, gumový recyklát zhoršuje zpracovatelnost betonové směsi. Tento fakt lze potvrdit i vizuálně. Sorpční vlastnost gumové drti zajistí, že guma váže na svůj povrch záměsovou vodu. Čím větší měrný povrch gumová drť má, tedy čím je jemněji mletá, je zpracovatelnost a zároveň kvalita povrchu horší. Pokud chceme při přidání gumového recyklátu do betonové směsi udržet zpracovatelnost betonu shodnou s recepturou bez přidané gumy, je nutné zvýšit dávkování plastifikačních přísad nebo zvýšit hodnotu vodního součinitele.

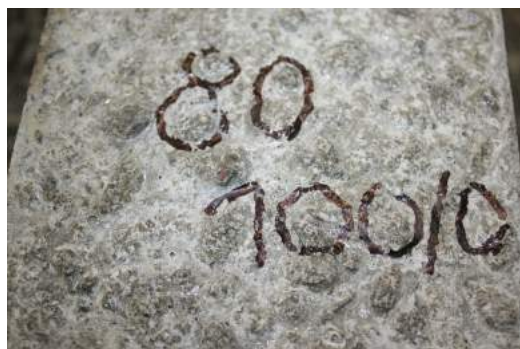
Na obrázcích 5.5 až 5.8 jsou viditelné rozdíly povrchu betonového vzorku v závislosti na množství a frakci gumového recyklátu. Obrázek 5.5 ukazuje povrch referenčního vzorku, obrázky 5.6, 5.7 a 5.8 povrchy vzorků s obsahem gumy 40 kg/m^3 , 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 a s poměrem frakcí 100/0.



Obrázek 5.5: REF



Obrázek 5.6: GUM 100/0



Obrázek 5.7: 80 - GUM 100/0

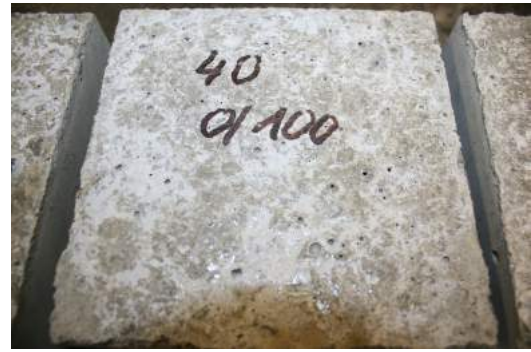


Obrázek 5.8: 120 - GUM 100/0

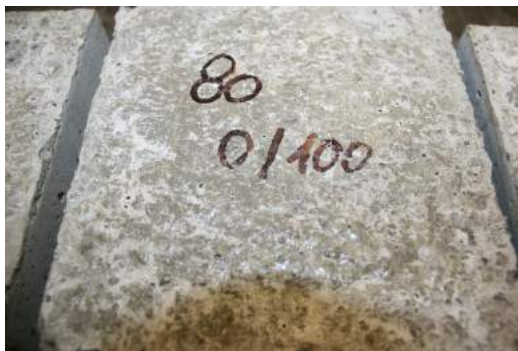
Obrázek 5.9 ukazuje povrch referenčního vzorku, obrázky 5.10, 5.11 a 5.12 povrchy vzorků s obsahem gumy 40 kg/m^3 , 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 a s poměrem frakcí 0/100.



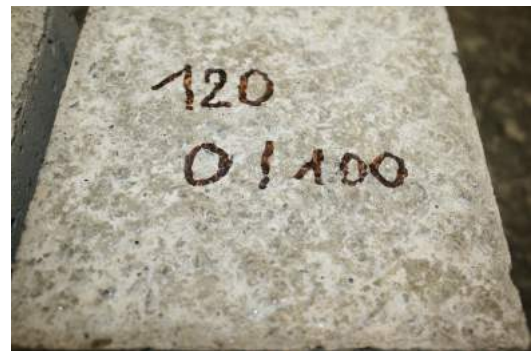
Obrázek 5.9: REF



Obrázek 5.10: GUM 0/100



Obrázek 5.11: 80 - GUM 0/100



Obrázek 5.12: 120 - GUM 0/100

Kapitola 6

Vliv gumového recyklátu na mechanickou odolnost

Základní mechanickou vlastností betonu je pevnost. Pevnost lze definovat jako schopnost odolávat vzniklým napětím [26], respektive hodnotu, při které dojde k porušení materiálu. Beton je kompozitní materiál a vlastnosti, které vykazuje, jsou dány vlastnostmi jeho složek a jejich zastoupení. Obecně platí, že kamenivo má mnohonásobně vyšší pevnost¹ v tlaku než výsledný beton. Je zřejmé, že o pevnosti betonu rozhoduje pevnost a množství cementové matrice. Pevnost cementové matrice závisí na stupni hydratace cementu, složení cementu, jemnosti mletí a vodním součiniteli.

- Stupeň hydratace cementu - podíl sumy hydratačního tepla v čase t ku celkovému vydanému hydratačnímu teplu [27]
- Jemnost mletí cementu - se zvětšujícím se měrným povrchem cementu roste pevnost cementové matrice. Současně se však zvětšuje potřebné množství záměsové vody. Hydratace cementových zrn probíhá od povrchu do středu. Rychlost hydratace je závislá na mineralogickém složení cementu. Bylo ověřeno, že za 6 měsíců zhydratují zrna cementu do hloubky 3 - 15 μm . Hrubě mleté cementy, u kterých zrna slínku dosahují až 120 μm , tedy nezhydratují celá. Nezhydratované zrno nemá funkci pojiva, ale plniva. Tento fakt vede ke snížení pevnosti hrubě mletých cementů. [26] [28]
- Vodní součinitel - s klesajícím vodním součinitelem roste pevnost cementové matrice. Přebytkem vody, která není potřeba k hydrataci, vznikají kapiláry, které značně ovlivní výslednou pevnost. Problematika správné hodnoty vodního součinitele je velmi složitá. Úplná hydratace slínku je zaručena při $w/c = 0,25$. Množství vody odpovídající zhruba 13% z hmotnosti cementu se spotřebuje jako vázaná voda ve vrstvách gelu. Z výše uvedených údajů plyne, že při vodním součiniteli vyšším než 0,38 vznikají kapilární póry snižující pevnost cementové matrice. Při vodním součiniteli nižším než 0,38 nedochází k plnému zhydratování cementových zrn a efekt je podobný jako u hrubě mletých cementů. [26] [28]

¹křemičité kamenivo 120 - 240 MPa , čedičové kamenivo 250 - 400 MPa



Obrázek 6.1: Poměr pevné fáze C - S - H gelu v závislosti na vodním součiniteli [30]

Je tedy zřejmé, že pevnost betonu je nepřímo úměrná obsahu pórů. U relativně homogenních materiálů platí vztah:

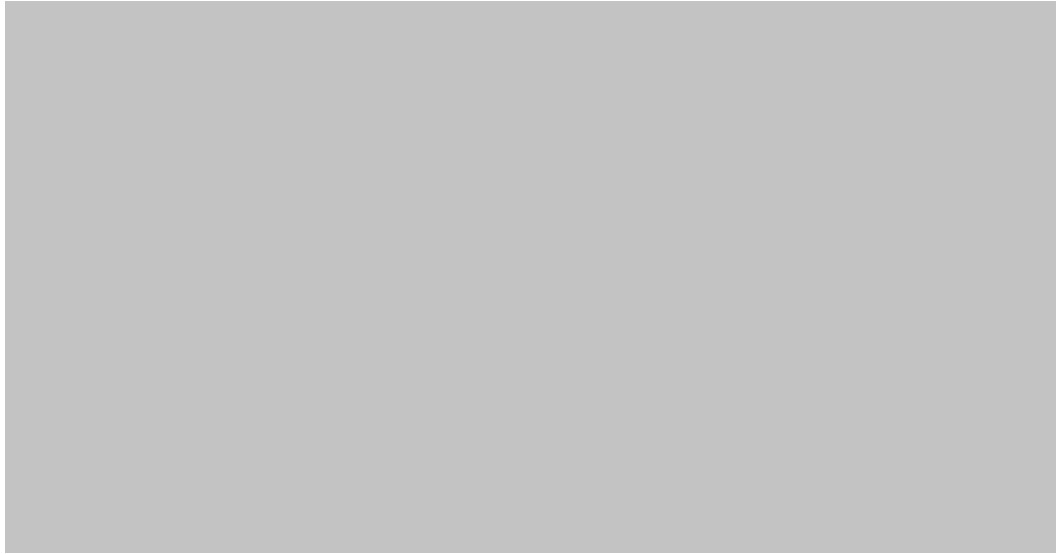
$$S = S_0 e^{-kp} \quad (6.1)$$

- S - pevnost materiálu o dané porozitě
- S_0 - pevnost materiálu při nulové porozitě
- p - porozita
- k - konstanta dle materiálu



Obrázek 6.2: Vztah pevnosti v tlaku a kapilární pórovitosti [29]

Colleprandi v knize Moderní beton [12] uvedl vztah pevnosti v tlaku a provzdušnění betonu. Uvádí, že provzdušněný beton vykazuje až o 20% nižší pevnost v tlaku než beton neprovzdušněný. Aïctin následně definoval v knize Vysokohodnotný beton [15] pokles pevnosti betonu o 4 - 6% s každým zvýšením provzdušnění o 1% v intervalu 4 - 6%.



Obrázek 6.3: Vztah provzdušnění a pevnosti betonu při různých hodnotách vodního součinitele [12]

Kaloush, Way a Zhu [3] ověřili, že pevnost betonu klesá se vzrůstajícím množstvím gumového recyklátu. Definovali základní vztah pro výpočet pevnosti s příměsí gumového recyklátu:

$$f_c = 0,0366(RC)^2 - 24,726(RC) + 4557,7 \quad (6.2)$$

- f_c - pevnost v tlaku po 28 dnech [Psi]²
- RC - množství gumového recyklátu [lbs/ft^3]³

6.1 Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3

Zkouška pevnosti v tlaku patří mezi zkoušky destruktivní, tj. dojde k porušení testovaného vzorku. Zkušební tělesa mohou být krychle o hraně 100,150 a 200 mm nebo válce průměru 150 mm a výšky 300 mm. Po vybetonování se tělesa skladují ponořená ve vodě o teplotě $20 \pm 2^\circ C$, nebo v prostředí s větší relativní vlhkostí než 95%. Základní doba stáří vzorku je 28 dní. Tělesa jsou před zkouškou změřena a zvážena. Krychle se při tlakové zkoušce zatěžují kolmo na směr hutnění, válce ve směru hutnění. Při zkoušce je nutné dbát na správné uložení vzorku v lisu, aby byl zatěžován rovnoměrně. Zatěžování probíhá konstantní rychlostí $0,6 \text{ MPa/s} \pm 0,2 \text{ MPa/s}$. Správné způsoby

²Psi = 6894,757 [Pa]

³ lbs/ft³ = 16,0185 [kg/m³]

porušení jsou znázorněny na obrázku 6.4 a 6.5. Výsledná pevnost vzorku je spočítána dle vztahu (6.3). Pevnost je uváděna s přesností na jedno desetinné místo. [31]

$$f_c = F/A_c \quad (6.3)$$

- f_c - pevnost vzorku [MPa]
- F - síla, při které dojde k porušení vzorku [N]
- A_c - zatěžovaná plocha vzorku [mm^2]



Obrázek 6.4: Správné porušení krychle [31]



Obrázek 6.5: Správné porušení kužele [31]

6.2 Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku

6.2.1 Pevnost v tlaku po 7 dnech

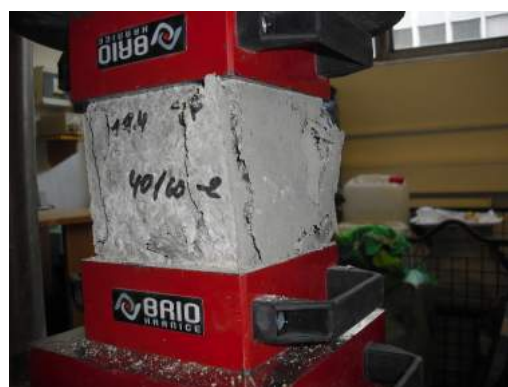
Pevnost po 7 dnech byla měřena na krychlích⁴ o hraně 100x100x100 mm. Pevnost byla zkoušena pro obsahy gumového recyklátu 40 kg/m³, 80 kg/m³ a 120 kg/m³. Od každé receptury byla vyrobena 3 zkušební tělesa.

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.1 a 11.2.

⁴V tabulce 6.1 je pevnost převedena na rozměr krychle 150x150x150 mm. Převodní poměr: $f_{k,150} = 0,9f_{k,100}$

Tabulka 6.1: Pevnost v tlaku po 7 dnech - obsah gumového recyklátu 40 kg/m^3

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
REF	2315,6	38,6	100,00
GUM 100/0	2210,1	25,7	66,67
GUM 80/20	2247,6	26,6	68,85
GUM 60/40	2212,9	28,3	73,46
GUM 40/60	2226,6	27,8	72,14
GUM 20/80	2210,2	30,9	80,26
GUM 0/100	2248,2	30,4	78,84



Obrázek 6.6: Vzorek po tlakové zkoušce Obrázek 6.7: Vzorek po tlakové zkoušce

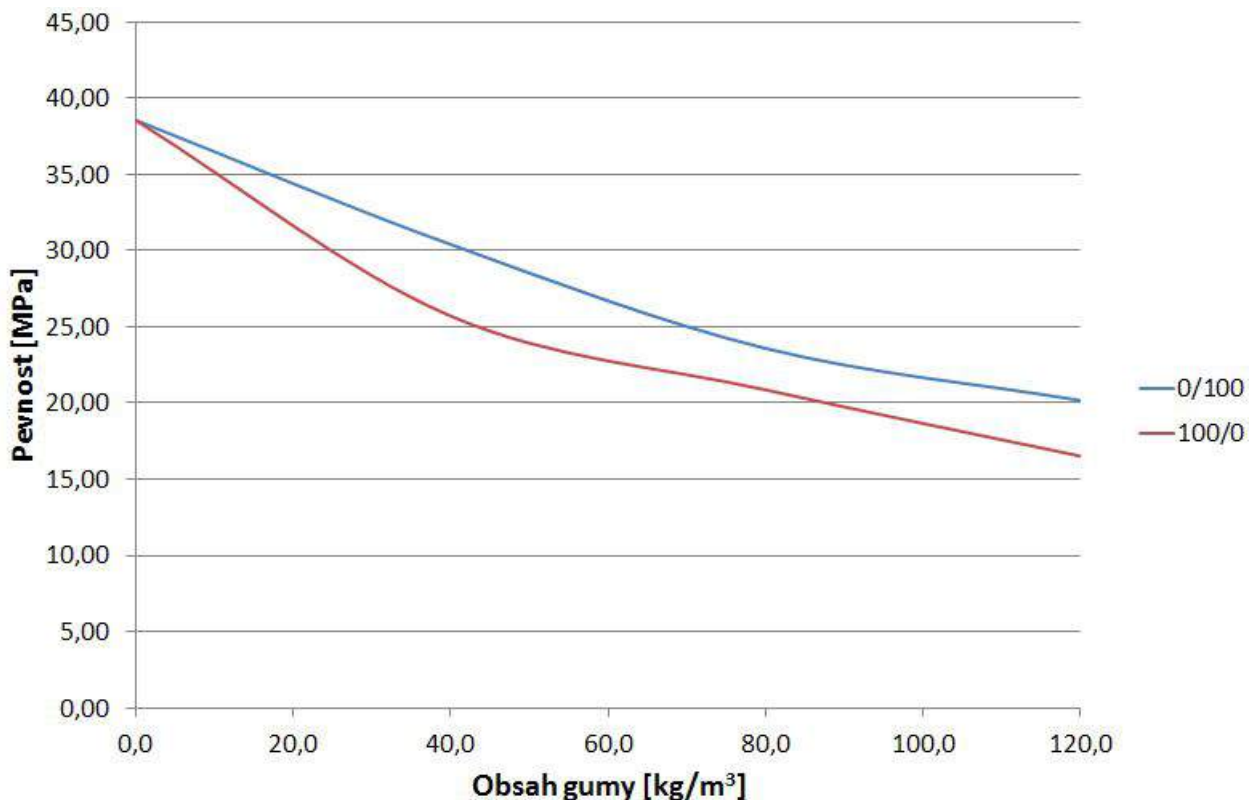
Tabulka 6.2: Pevnost v tlaku po 7 dnech - obsah gumového recyklátu 80 kg/m^3

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
80 - GUM 100/0	2124,9	20,87	54,11
80 - GUM 0/100	2170,3	23,58	61,15

Tabulka 6.3: Pevnost v tlaku po 7 dnech - obsah gumového recyklátu 120 kg/m^3

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
120 - GUM 100/0	2095,2	16,51	42,82
120 - GUM 0/100	2139,1	20,17	52,30

Na obrázku 6.8 je znázorněna závislost pevnosti v tlaku na obsahu gumového recyklátu v receptuře betonu pro poměry 0/100 a 100/0.



Obrázek 6.8: Závislost pevnosti v tlaku na obsahu gumového recyklátu

Numerické vyjádření závislosti pevnosti betonu po 7 dnech ⁵ na obsahu gumového recyklátu v receptuře betonu pro poměry 0/100 a 100/0 je v rovnicích (6.4) a (6.5).

$$f_c = 0,0007x^2 - 0,244x + 38,668 \quad (6.4)$$

$$f_c = 0,0013x^2 - 0,3369x + 38,188 \quad (6.5)$$

- f_c - pevnost [MPa]
- x - obsah gumového recyklátu [kg/m^3]

6.2.2 Pevnost v tlaku po 28 dnech

Pevnost po 28 dnech byla měřena na krychlích o hraně 150 mm. Pro každou recepturu byla vyrobena 4 zkušební tělesa.

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.3.

⁵Pro orientační hodnotu pevnosti betonu v tlaku v závislosti na obsahu gumového recyklátu po 28 dnech, lze spočítat pevnost betonu v tlaku po 7 dnech a hodnotu zvětšit o $\pm 20\%$ pro poměr 100/0 a o $\pm 10\%$ pro poměr 0/100

Tabulka 6.4: Pevnost v tlaku po 28 dnech

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
REF	2312,9	48,6	100,00
GUM 100/0	2209,7	31,8	65,49
GUM 80/20	2248,4	31,4	64,52
GUM 60/40	2219,7	31,7	65,10
GUM 40/60	2232,1	34,8	71,65
GUM 20/80	2192,3	33,8	69,47
GUM 0/100	2248,2	34,2	70,33



Obrázek 6.9: Vzorek před zkouškou



Obrázek 6.10: Vzorek po zkoušce

6.2.3 Pevnost v tlaku po 45 dnech

Pevnost po 45 dnech byla měřena na krychlích o hraně 150 mm. Pro každou recepturu byla vyrobena 3 zkušební tělesa.

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.4.

Tabulka 6.5: Pevnost v tlaku po 45 dnech

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
REF	2280,0	49,3	100
GUM 100/0	2137,9	30,4	61,74
GUM 80/20	2185,7	35,6	72,17
GUM 60/40	2207,1	32,2	65,40
GUM 40/60	2224,2	32,1	65,12
GUM 20/80	2219,3	34,8	70,51
GUM 0/100	2209,5	34,0	69,00

6.2.4 Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tlaku

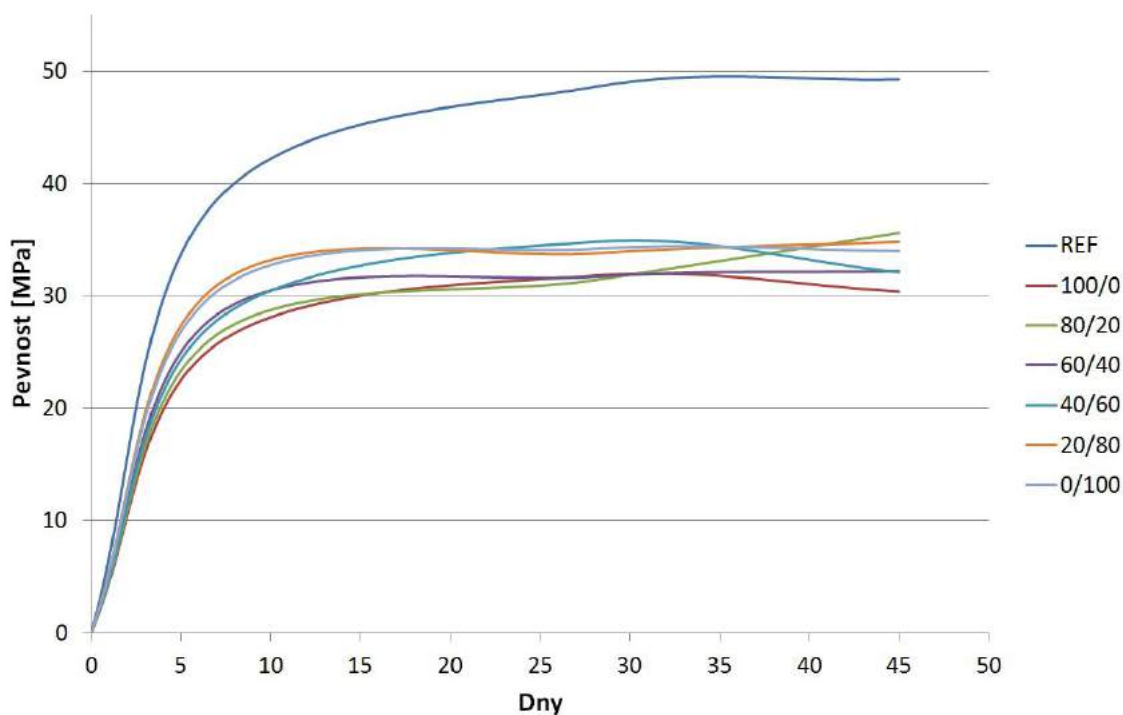
Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku těles s přísadou gumového recyklátu vykazují po 28 dnech pokles pevnosti o 30 - 35% oproti referenční receptuře. Nejvýraznější pokles zaznamenaly vzorky s vyšším podílem jemné gumy, tedy receptury s nejvyšším obsahem vzduchu v čerstvém betonu.

Byla tedy potvrzena teorie Aïctina, [15] o poklesu pevnosti v závislosti na provzdušnění. Dle Aïctina vychází pokles pevnosti o 20,4 - 30,6 %. Dosadíme-li do rovnice (6.2) 40 kg/m^3 , získáme orientační pevnost [Kaloush, Way a Zhu] $f_c = 31,0 \text{ MPa}$. Naměřené pevnosti jsou přibližně o 2 MPa vyšší, než vypočtená hodnota.

Na obrázku 6.11 je znázorněn vývin pevnosti betonu v závislosti na stáří.

Významný je také fakt, že čím starší vzorek, tím menší rozdíly pevnosti v tlaku v závislosti na frakci použité gumy. Přestává platit vztah mezi rozdílem provzdušnění a tomu odpovídající rozdílné pevnosti. Podrobnější představu o pórech v cementové matici poskytuje elektronová mikroskopie. (viz. kapitola 9)

Důvodů, proč beton s příměsí gumového recyklátu dosahuje nižších pevností je více. Kromě již výše zmíněného provzdušnění má na pevnost betonu v tlaku vliv soudržnost. Soudržnost gumových částic s cementovou pastou je výrazně nižší než soudržnost cementové pasty s kamenivem. Dále, rozmístění gumového recyklátu v objemu betonu není zcela homogenní. Je tedy možné, že dojde ke shluku těchto částic a výraznému lokálnímu snížení pevnosti.



Obrázek 6.11: Průběh pevnosti betonu v tlaku v čase

6.3 Vliv přečištěné gumy

Vliv gumového recyklátu na pevnost betonu v tlaku lze zmírnit přečištěním gumového recyklátu [2]. Hanbing Liu, Xianqiang Wang, Yubo Jiao a Tao Sha provedli testy několika druhů čistících látek. Cílem přečištění je zbavit povrch gumy hydrofobní⁶ a sorpční⁷ povahy, omezit podíl zachyceného vzduchu a zajistit lepší spojení s cementovou maticí. Jako čistící látky byly použity pryskyřice, nenasyčené pryskyřice, syntetické pryskyřice, aminoakrylát a chloropren. V tabulce 6.6 jsou znázorněny hodnoty pevností v tlaku, tahu a příčném tlaku vzhledem k referenční hodnotě⁸. [2]

Tabulka 6.6: Změna pevnosti vlivem přečištění gumy [2]

Čistidlo	Tlak [<i>MPa</i>] (%)	Tah [<i>MPa</i>] (%)	Příčný tah [<i>MPa</i>] (%)
None	25,38 (100)	1,86 (100)	19,96 (100)
Emulsion	20,15 (79)	2,12 (114)	17,93 (90)
Ethoxyline resin	27,44 (108)	2,44 (131)	20,03 (100)
Synthetic resin	28,40 (112)	2,61 (140)	20,96 (105)
Amino-acrylate	25,90 (102)	2,30 (124)	20,80 (104)
Chloroprene adhesive	26,24 (103)	2,26 (122)	20,40 (102)
Unsaturated resin	26,12 (103)	1,80 (97)	20,07 (101)

Hanbing Liu, Xianqiang Wang, Yubo Jiao a Tao Sha [2] prokázali, že přečištění gumy vede ke zvýšení pevnosti v tlaku až o 12%, v tahu o 40% a pevnosti v příčném tlaku o 5%. Tento fakt je spjat se snížením provzdušňovací funkce gumového prášku.

⁶Hydrofobní látky - látky vodu odpuzující. Molekuly na povrchu nenesou žádný náboj a jsou schopny vytvářet jen velmi málo nebo žádné vodíkové můstky.

⁷Sorbent - látka schopná na sebe vázat tuhé látky, kapaliny a plyny.

⁸Změna pevnosti je vztahena k referenční hodnotě 100% - beton s příměsí nepřečištěné gumy

6.4 Pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6

Zkouška pevnosti v příčném tahu dle *ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles* se provádí na krychli, válci nebo jádrovém vývrtnu. Minimální počet testovaných těles je 3. Princip zkoušky je znázorněn na obrázku 6.7. Zatěžování probíhá rychlostí od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s. [36]



Obrázek 6.12: Schéma zkoušky v příčném tahu [36]

6.4.1 Zkouška pevnosti v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu byla zkoušena pro obsahy gumového recyklátu 40 kg/m^3 , 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 . Od každé receptury byla vyrobena 3 zkušební tělesa. Stáří vzorků v době zkoušky bylo 7 dní. Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.5.



Obrázek 6.13: Neporušený vzorek



Obrázek 6.14: Porušený vzorek

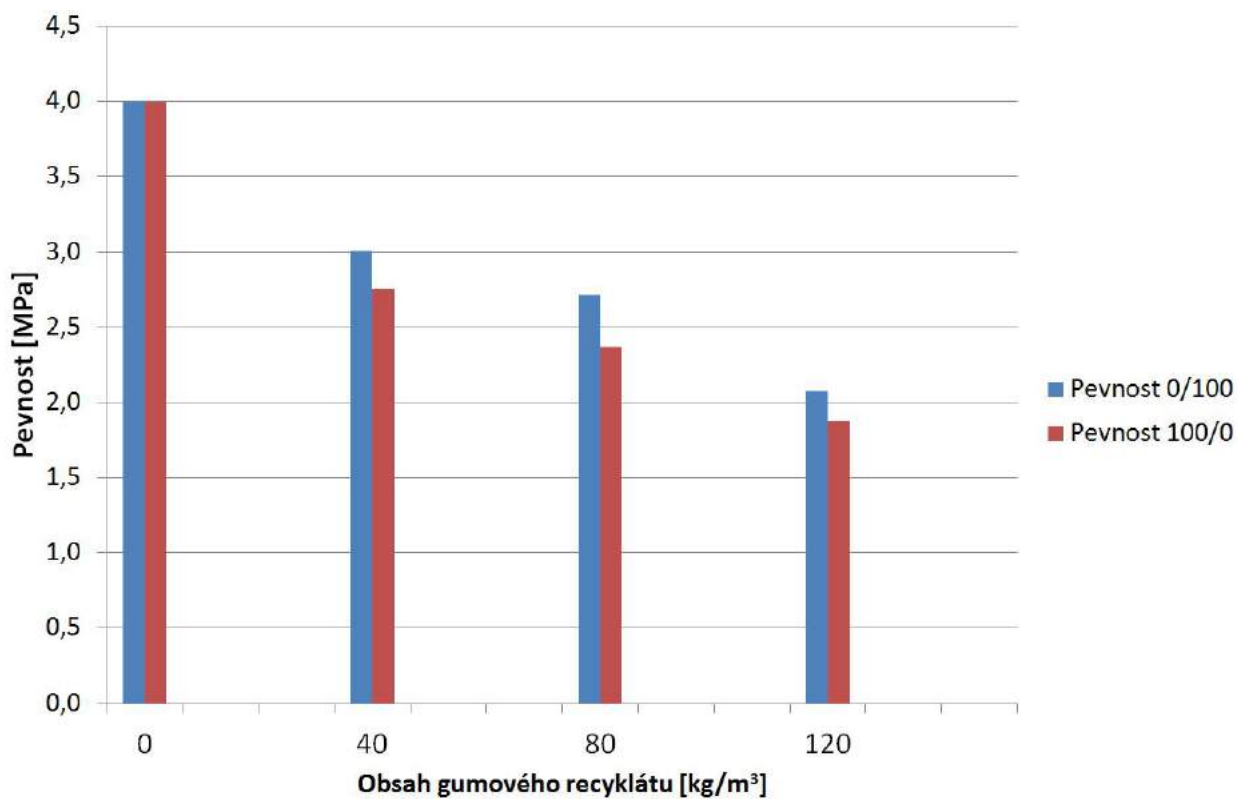
6.4.2 Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu

Tabulka 6.7: Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu

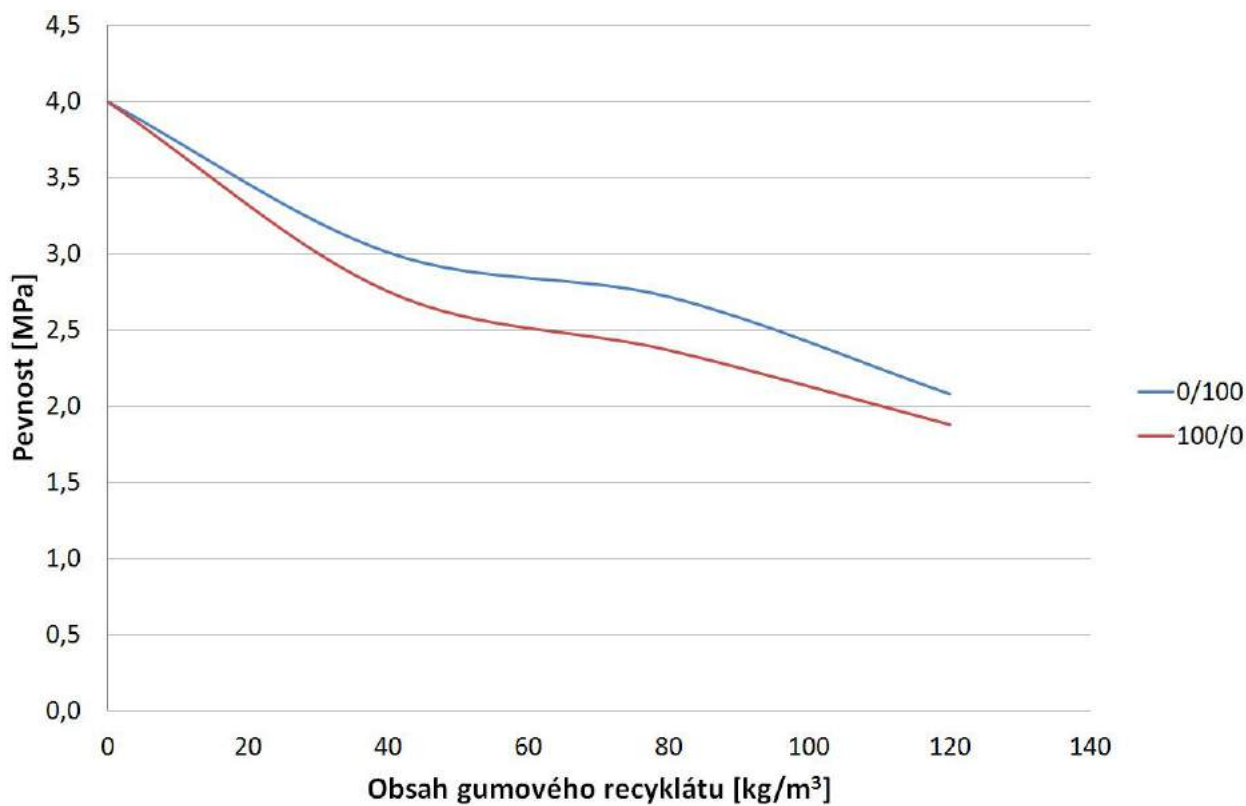
Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost [MPa]	Poměr pevnosti [%]
REF	2310,1	4,0	100
GUM 100/0	2226,2	2,8	68,82
GUM 0/100	2261,7	3,0	75,24
80 - GUM 100/0	2125,4	2,4	59,18
80 - GUM 0/100	2168,1	2,7	67,94
120 - GUM 100/0	2077,0	1,9	46,98
120 - GUM 0/100	2107,9	2,1	52,00

Na obrázcích 6.15 a 6.16 jsou graficky znázorněny pevnosti betonu v příčném tahu v závislosti na obsahu gumového recyklátu pro poměry 0/100 a 100/0.

Pevnost v příčném tahu v závislosti na obsahu gumového recyklátu lze dopočítat numericky. Z výsledků byly sestaveny numerické závislosti viz. rovnice (6.6) a (6.7)



Obrázek 6.15: Pevnost v příčném tahu



Obrázek 6.16: Pevnost v příčném tahu

$$f_{ct} = 0,00006x^2 - 0,0217x + 3,95 \quad (6.6)$$

$$f_{ct} = 0,0001x^2 - 0,0311x + 3,95 \quad (6.7)$$

- f_{ct} - pevnost v příčném tahu [MPa]
- x - obsah gumového recyklátu [kg/m^3]

6.4.3 Vyhodnocení zkoušky pevnosti v příčném tahu

Výsledky zkoušky pevnosti betonu s příměsí gumového recyklátu v příčném tahu ukázaly, že pevnost v příčném tahu je nepřímo úměrná obsahu gumového recyklátu v betonu. Dále je zřejmé, že jemná frakce gumového recyklátu (0-1 mm) snižuje pevnost o $\pm 8\%$ více v porovnání se stejným objemem frakce hrubé (1-3 mm).

6.5 Charakteristické hodnoty pevnosti betonu s příměsí gumového recyklátu

Charakteristické hodnoty byly počítány dle Přílohy D ČSN EN 1990 [37]. Charakteristická hodnota je stanovena jako 5% kvantil. Při výpočtech se uvažuje Gaussovo rozdělení základního souboru.

Výpočet charakteristické hodnoty f_{ck} - rovnice (6.8)

$$f_{ck} = f_{m(n)} * (1 - k_n * V) \quad (6.8)$$

Kde:

- f_{ck} - charakteristická pevnost
- $f_{m(n)}$ - průměr hodnot
- k_n - součinitel z tabulky 6.8 závislý na počtu hodnot n
- V - variační koeficient vlastností⁹

Výpočet průměru $f_{m(n)}$ - rovnice (6.9)

$$f_{m(n)} = \frac{1}{n} * \sum_n f_n \quad (6.9)$$

Variační koeficient vlastností V - rovnice (6.10)

$$V = \frac{s}{f_{m(n)}} \quad (6.10)$$

Směrodatná výběrová odchylka s - rovnice (6.11)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_n (f_i - f_{m(n)})^2} \quad (6.11)$$

Tabulka 6.8: Variační koeficient vlastností [37]

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V známý	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V neznámý	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

⁹Při výpočtu byl uvažován Variační koeficient V - neznámý. Z tabulky 6.8 byly odečítány hodnoty V - neznámý.

6.5.1 Charakteristická pevnost v tlaku po 7 dnech

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.6.

Tabulka 6.9: Charakteristická pevnost v tlaku po 7 dnech

Vzorek	Průměrná pevnost [MPa]	Charakteristická pevnost [MPa]
REF	38,6	35,0
40 - GUM 0/100	30,4	28,5
40 - GUM 100/0	25,7	24,5
80 - GUM 0/100	23,6	22,8
80 - GUM 100/0	20,9	19,1
120 - GUM 0/100	20,2	19,0
120 - GUM 100/0	16,5	14,5

6.5.2 Charakteristická pevnost v tlaku po 28 dnech

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.7.

Tabulka 6.10: Charakteristická pevnost v tlaku po 28 dnech

Vzorek	Průměrná pevnost [MPa]	Charakteristická pevnost [MPa]
REF	48,6	44,3
40 - GUM 0/100	34,2	29,9
40 - GUM 100/0	31,8	25,8

6.5.3 Charakteristická pevnost v příčném tahu po 7 dnech

Kompletní výsledky jsou uvedeny v kapitole 11 tabulka 11.8

Tabulka 6.11: Charakteristická pevnost v příčném tahu po 7 dnech

Vzorek	Průměrná pevnost [MPa]	Charakteristická pevnost [MPa]
REF	4,0	2,9
40 - GUM 0/100	3,0	1,2
40 - GUM 100/0	2,8	2,6
80 - GUM 0/100	2,7	0,6
80 - GUM 100/0	2,4	1,0
120 - GUM 0/100	2,1	1,7
120 - GUM 100/0	1,9	1,1

Kapitola 7

Vliv gumového recyklátu na trvanlivost

7.1 Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám je jednou ze základních vlastností materiálu. V odborných kruzích neexistuje jednotný názor na to, jak dochází k porušení materiálu vystavenému současnému působení chemických rozmrazovacích látek a mrazu.

Nejjednodušší teorie říká, že k porušení struktury materiálu dochází vlivem zvětšení objemu vody obsažené v materiálu po její změně na led. Tento nárůst objemu činí cca 9%. Realita porušování materiálu vlivem mrazu je však výrazně složitější. Beton obsahuje značné množství pórů různých typů a velikostí. Tyto póry, pokud jsou naplněny vodou, zamrzají za různých teplot. Experimentální výzkumy prokázaly, že ve specifických typech pórů za specifických podmínek nemrzne voda ani při teplotách hluboko pod bodem mrazu.

Rozšířenější teorie je založena na principu porušení materiálu vlivem hydraulického tlaku vody působící na kapiláry po vzniku ledových krystalů. V případě, že tento hydraulický tlak dosáhne větší hodnoty než je tahová pevnost daného materiálu, dochází k porušení.

Další z teorií je založena na principu rozdílné teplotní roztažnosti kameniva, pojiva a vody. [16]

V případě porušení za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek je nutné do procesu zahrnout degradační účinek krystalického tlaku těchto látek. Degradace se projevuje odlupováním povrchových vrstev materiálu. O schopnosti materiálu odolávat účinkům chemických rozmrazovacích látek rozhoduje zejména pevnost povrchových vrstev a obsah a velikost pórů. [33]

7.1.1 Vliv koncentrace rozmrazovací látky

Jako chemické rozmrazovací látky se používají zejména $NaCl$ (chlorid sodný), $CaCl_2$ (chlorid vápenatý) a $MgCl_2$ (chlorid hořečnatý). Nejčastěji je beton vystaven, a to jak v laboratorních testech tak v reálných podmínkách, chloridu sodnému. Obecně je znám fakt, že slaná voda má nižší bod tuhnutí. Čím vyšší salinitu¹ roztok vykazuje, tím nižší

¹Salinita - označuje obecně koncentraci minerálních látek (solí) rozpuštěných v roztoku (obvykle ve vodě). Nejčastěji bývá měřena v promile (‰) nebo v gramech na litr roztoku.[32]

bod tuhnutí má. Například mořská voda vykazuje salinitu 3,5% a bod tuhnutí $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pokud přijde led o teplotě 0°C do kontaktu s chloridem sodným, začne tát. Energie potřebná ke změně skupenství je dána snížením teploty vzniklého roztoku. Získáme tedy kapalinu o teplotě nižší než 0°C . Interval, ve kterém se vyplatí využívat chlorid sodný jako rozmrazovací látku, se nejčastěji uvádí od -1 až -10°C . Při poklesu pod tyto hodnoty přestává roztok chloridu sodného plnit svoji požadovanou funkci. Problém lze vyřešit za pomoci chloridu vápenatého, jehož teplota tuhnutí dosahuje až -29°C . V reálných podmínkách se ovšem nevyužívá kvůli finanční nákladnosti. [33]

Nejúčinnější koncentrace chloridu sodného je 3%. Při poklesu koncentrace roztoku pod uvedenou hodnotu 3% nevznikají při mrznutí roztoku dostatečné síly, respektive napětí, které by překročily tahovou pevnost betonu. V materiálu by mrzla především voda, krystalický tlak soli není výrazný. Nedochovalo by tak k významné destrukci materiálu.

Při překročení hodnoty 3% pak převažuje vliv krystalů soli nad krystalky ledu. [33]

7.1.2 Omezení účinku chemických rozmrazovacích látek

K omezení účinků chemických rozmrazovacích látek se používá zejména provzdušnění. Záměrně se vytváří v betonu póry vhodné velikosti a optimálního rozložení. V těchto pórech je umožněno rozpínání ledových krystalů, čímž se zvyšuje odolnost. Optimální vzdálenost pórů v betonu je 250-300 μm a provzdušnění dosahuje hodnot 4 - 6 %.

7.2 Zkouška odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám dle ČSN 73 1326/Z1 - Met. A

Jako zkušební tělesa se používají krychle o hraně délky 150 mm, válce průměru podstavu 150 mm o výšce 300 mm nebo hranoly 40x40x160 mm. Hranol se využívá zejména pro jemnozrnné směsi.

Zmrazovací cyklus je znázorněn na obrázku 7.1. Zkouška začíná na teplotě $+T=20^{\circ}\text{C}$. Za 45 minut (čas C1) dojde k ochlazení na teplotu $-T=-15^{\circ}\text{C}$. Teplota -15°C je držena 15 minut (C2), poté dochází opět k ohřátí na teplotu $+T=20^{\circ}\text{C}$. Doba ohřátí je 45 minut (C3). I zde je teplota $+T=20^{\circ}\text{C}$ držena po dobu 15 minut (C4). Celková doba zmrazovacího cyklu je rovna 120 minut.

7.2.1 Postup zkoušky

- Výroba zkušebních krychlí, zhutnění betonu po třetinách výšky krychle a upravení betonované hrany pilovitým pohybem hladítka
- Tvrdnutí vzorků po dobu 28 dní
- Ponoření vzorků do vody a nasáknutí
- Uložení vzorku betonovanou plochou do misky s roztokem NaCl o koncentraci 3% do výšky 5 mm
- Zmrazování a ohřívání v normových cyklech

- Zvážení suchého odpadu po 25, 50, 75 a 100 cyklech ²
- Vyhodnocení zkoušky viz kapitola 7.2.2



Obrázek 7.1: Zmrazovací cyklus [43]

7.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení zkoušky odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám probíhá výpočtem hodnoty D1. D1 udává počet cyklů, kdy množství odpadu ze vzorku dosáhne hodnoty 1000 g/m^2 .

Obecně platí:

$$\text{Odpad}[\text{g/m}^2] = \frac{\text{Odpad}[\text{g}]}{\text{Plocha vystavena NaCl} [\text{m}^2]} \quad (7.1)$$

V případě krychle o hraně 150 mm platí:

$$\text{Odpad}[\text{g/m}^2] = \frac{\text{Odpad}}{0,15 * 0,15 + 4 * 0,15 * 0,005} \quad (7.2)$$

Dále probíhá vyhodnocení charakteru odpadu a zařazení odpadů do příslušné kategorie dle tabulky 7.1.

² Tabulky 7.2, 7.6 a 7.10 neukazují souhrnný odpad po 25, 50, 75 a 100 cyklech, ale hodnotu odpadu za 25 cyklů. V případě odpadu po 50 cyklech se tedy jedná o odpady mezi 25 a 50 cyklem. V případě odpadu po 75 cyklech se jedná o odpady mezi 50 a 75 cyklem. Hodnota odpadu po 100 cyklech odpovídá odpadu mezi 75 a 100 cyklem. V tabulkách 7.3, 7.7 a 7.11 jsou odpady nasčítané. V případě odpadu po 100 cyklech se jedná o součet odpadů po 25, 50, 75 a 100 cyklech z tabulek 7.2, 7.6 a 7.10.

Tabulka 7.1: Zatřídění dle odpadů od chemických rozmrazovacích látek [18]

Stupeň porušení	Odpad [g/m^2]	Charakter odpadu
1 - nenarušený	do 50	velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 - slabě narušený	do 500	jako u stupně 1, větší množství částic do 1mm, podíl částic do 2 mm menší než 50% hmotnosti
3 - narušený	do 1000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g/m^2
4 - silně narušený	do 3000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g/m^2
5 - rozpadlý	přes 3000	jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20% hmotnosti odpadu

7.2.3 Zkouška CHRL Č. 1

Zkouška probíhala na 6 krychlích receptury GUM 20/80. Tato receptura byla vybrána s ohledem na vyšší hodnotu obsahu vzduchu než u referenčního betonu, ačkoliv ne tak vysokou jako směsi s vyšším podílem jemné frakce. Směs 20/80 ovšem nabývala po 7 a 28 dnech největší pevnosti z receptur obsahující gumu.

Na obrázku 7.2 jsou vzorky v mrazicím zařízení ponořené upravovanou plochou v roztoku chloridu sodného. Na obrázcích 7.3 až 7.7 jsou vzorky v průběhu zkoušky. Za povšimnutí stojí zvětšení odpadu mezi 50. a 75. cyklem. Podobné chování bylo i u ostatních vzorků.

Tabulka 7.2: Odpady [g] při zkoušce CHRL 1 - receptura GUM 20/80

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 20/80 - 1	2,90	11,75	50,65	121,75
GUM 20/80 - 2	3,55	16,25	128,10	219,80
GUM 20/80 - 3	3,60	14,85	110,70	236,15
GUM 20/80 - 4	1,45	14,40	23,70	61,65
GUM 20/80 - 5	2,80	10,55	86,15	149,20
GUM 20/80 - 6	1,85	8,15	43,15	117,35

Tabulka 7.3: Odpady [g/m^2] při zkoušce CHRL 1 - receptura GUM 20/80

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 20/80 - 1	113,7	574,5	2560,8	7335,3
GUM 20/80 - 2	131,4	768,6	5792,2	14411,8
GUM 20/80 - 3	141,2	723,5	5064,7	14325,5
GUM 20/80 - 4	56,9	621,6	1551,0	3968,6
GUM 20/80 - 5	109,8	523,5	3902,0	9752,9
GUM 20/80 - 6	72,5	392,2	2084,3	6686,3



Obrázek 7.2: Vzorky v mrazicím zařízení



Obrázek 7.3: Vzorek před zahájením zkoušky



Obrázek 7.4: Vzorek po 25. cyklu



Obrázek 7.5: Vzorek po 50. cyklu



Obrázek 7.6: Vzorek po 75. cyklu



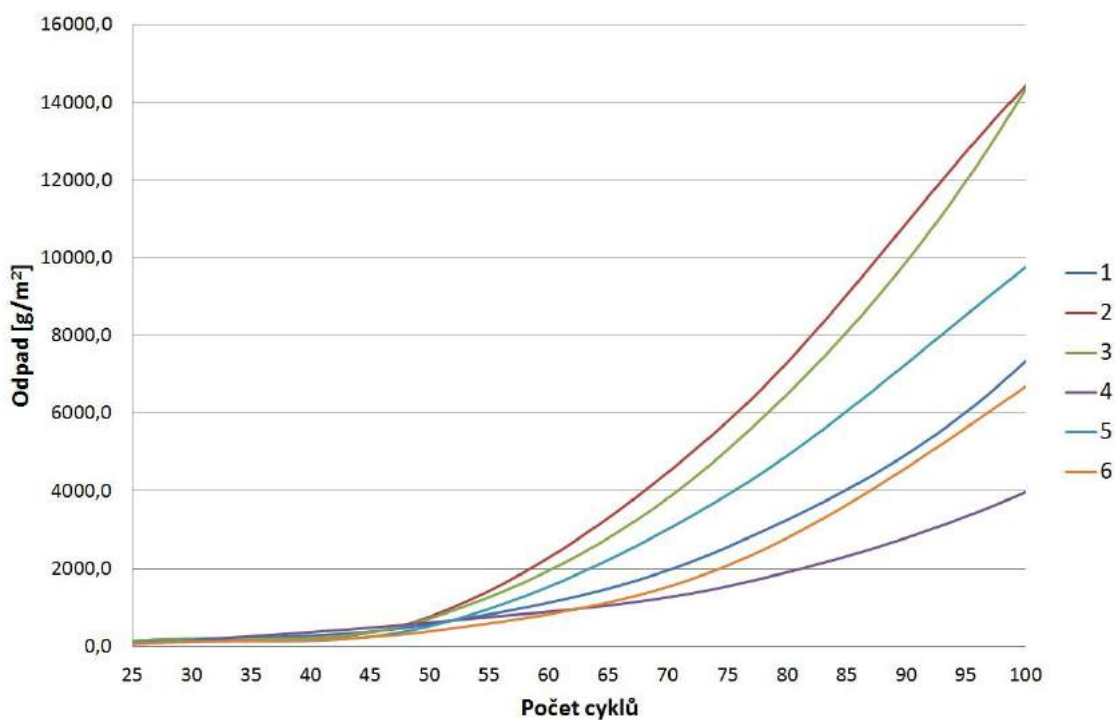
Obrázek 7.7: Vzorek po 100. cyklu

Tabulka 7.4: Hodnoty D1 - počet cyklů při odpadu větším než 1000 g/m² pro zkoušku CHRL 1

Vzorek	D1	Odchylka dle tab. 7.5	Zatřídění dle tab 7.1 po 100 cyklech
1	50,22	Splňuje	Rozpadlý
2	50,13	Splňuje	Rozpadlý
3	50,14	Splňuje	Rozpadlý
4	50,40	Splňuje	Rozpadlý
5	50,13	Splňuje	Rozpadlý
6	50,19	Splňuje	Rozpadlý

Tabulka 7.5: Průměrná hodnota D1 pro zkoušku CHRL 1

Průměrná hodnota D1	Tolerance -20%	Tolerance +20%
50,20	40,16	60,24



Obrázek 7.8: Odpady v závislosti na cyklech pro zkoušku CHRL 1

7.2.4 Zkouška CHRL Č. 2

Vzhledem k velkým rozdílům v odpadech nad 50 cyklů při zkoušce č. 1, byla zkouška provedena opakovaně. Byl kladen důraz na lepší povrchovou úpravu vzorků, zejména

pak uhlazení pilovitým pohybem hladítka. Zkouška byla provedena opět na 6 krychlích 150x150x150 mm z receptury GUM 20/80.

Tabulka 7.6: Odpady [g] při zkoušce CHRL 2 - receptura GUM 20/80

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 20/80 - 1	11,55	29,88	34,40	44,94
GUM 20/80 - 2	14,65	37,05	32,10	37,01
GUM 20/80 - 3	11,25	31,00	32,30	42,82
GUM 20/80 - 4	10,55	30,21	25,50	42,74
GUM 20/80 - 5	8,75	32,00	30,30	28,60
GUM 20/80 - 6	12,20	27,16	25,00	27,34

Tabulka 7.7: Odpady [g/m^2] při zkoušce CHRL 2 - receptura GUM 20/80

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 20/80 - 1	452,9	1624,7	2973,7	4736,1
GUM 20/80 - 2	574,5	2027,5	3286,3	4737,6
GUM 20/80 - 3	441,2	1656,9	2923,5	4602,7
GUM 20/80 - 4	413,7	1598,4	2598,4	4274,5
GUM 20/80 - 5	343,1	1598,0	2786,3	3907,8
GUM 20/80 - 6	478,4	1543,5	2523,9	3596,1

Na snímcích 7.9 až 7.12 je zachycena změna povrchu zkušebního tělesa po 25. 50. 75. a 100. cyklu.



Obrázek 7.9: Vzorek po 25. cyklu



Obrázek 7.10: Vzorek po 50. cyklu



Obrázek 7.11: Vzorek po 75. cyklu



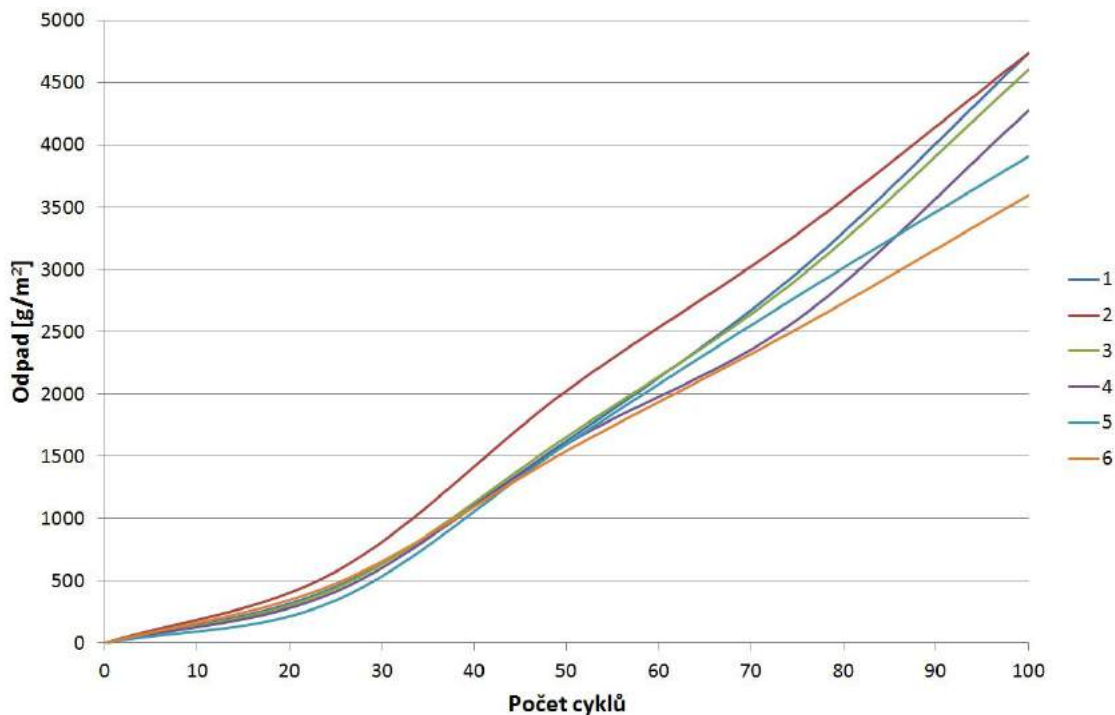
Obrázek 7.12: Vzorek po 100. cyklu

Tabulka 7.8: Hodnoty D1 - počet cyklů při odpadu větším než 1000 g/m^2 pro zkoušku CHRL 2

Vzorek	D1	Odchylka dle tab. 7.9	Zatřídění dle tab 7.1 po 100 cyklech
1	31,97	Splňuje	Rozpadlý
2	32,08	Splňuje	Rozpadlý
3	31,66	Splňuje	Rozpadlý
4	31,47	Splňuje	Rozpadlý
5	30,37	Splňuje	Rozpadlý
6	32,75	Splňuje	Rozpadlý

Tabulka 7.9: Průměrná hodnota D1 pro zkoušku CHRL 2

Průměrná hodnota D1	Tolerance -20%	Tolerance +20%
31,68	25,35	38,02



Obrázek 7.13: Odpady v závislosti na cyklech pro zkoušku CHRL 2

7.2.5 Zkouška CHRL Č. 3

Zkouška probíhala na 6 krychlích směsi GUM 100/0, tedy za přítomnosti pouze jemného gumového recyklátu (0-1mm). Dle tabulky 4.2 je zřejmé, že GUM 100/0 obsahuje nejvíce vzduchu v čerstvém betonu a dle tabulky 5.1 vykazuje příznivý obsah pórů v ztvrdlém betonu. Vzhledem k vysoké pórovitosti však směs vykazuje nejmenší odolnost povrchových vrstev.

Tabulka 7.10: Odpady [g] při zkoušce CHRL 3 - receptura GUM 100/0

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 100/0 - 1	6,21	3,68	3,92	3,27
GUM 100/0 - 2	8,14	4,48	6,30	7,09
GUM 100/0 - 3	8,58	5,70	4,98	5,55
GUM 100/0 - 4	9,81	5,73	2,85	3,61
GUM 100/0 - 5	8,71	5,58	3,33	3,45
GUM 100/0 - 6	11,29	9,08	4,75	6,41

Tabulka 7.11: Odpady [g/m^2] při zkoušce CHRL 3 - receptura GUM 100/0

Vzorek	cyklus 25	cyklus 50	cyklus 75	cyklus 100
GUM 100/0 - 1	243,5	387,8	541,6	669,8
GUM 100/0 - 2	319,2	494,9	742,0	1020,0
GUM 100/0 - 3	336,5	560,0	755,3	972,9
GUM 100/0 - 4	384,7	609,4	721,2	862,7
GUM 100/0 - 5	341,6	560,4	691,0	826,3
GUM 100/0 - 6	442,7	798,8	985,1	1236,5

Jelikož nebylo na všech vzorcích dosaženo odpadu většího než $1000 [g/m^2]$, byly následující odpady dopočítány numericky.

Tabulka 7.12: Numericky dopočítané odpady [g/m^2] pro zkoušku CHRL 3

Vzorek	cyklus 125	cyklus 150	cyklus 175
GUM 100/0 - 1	798,0	926,3	1054,5
GUM 100/0 - 2	1298,0	1576,1	1854,1
GUM 100/0 - 3	1190,6	1408,2	1625,9
GUM 100/0 - 4	1004,3	1145,9	1287,5
GUM 100/0 - 5	961,6	1096,9	1232,2
GUM 100/0 - 6	1487,8	1739,2	1990,6



Obrázek 7.14: Vzorek před zkouškou



Obrázek 7.15: Vzorek po 25. cyklu



Obrázek 7.16: Vzorek po 50. cyklu



Obrázek 7.17: Vzorek po 75. cyklu



Obrázek 7.18: Vzorek po 100. cyklu



Obrázek 7.19: Vzorek po 100. cyklu

Tabulka 7.13: Hodnoty D1 - počet cyklů při odpadu větším než 1000 g/m^2 pro zkoušku CHRL 3

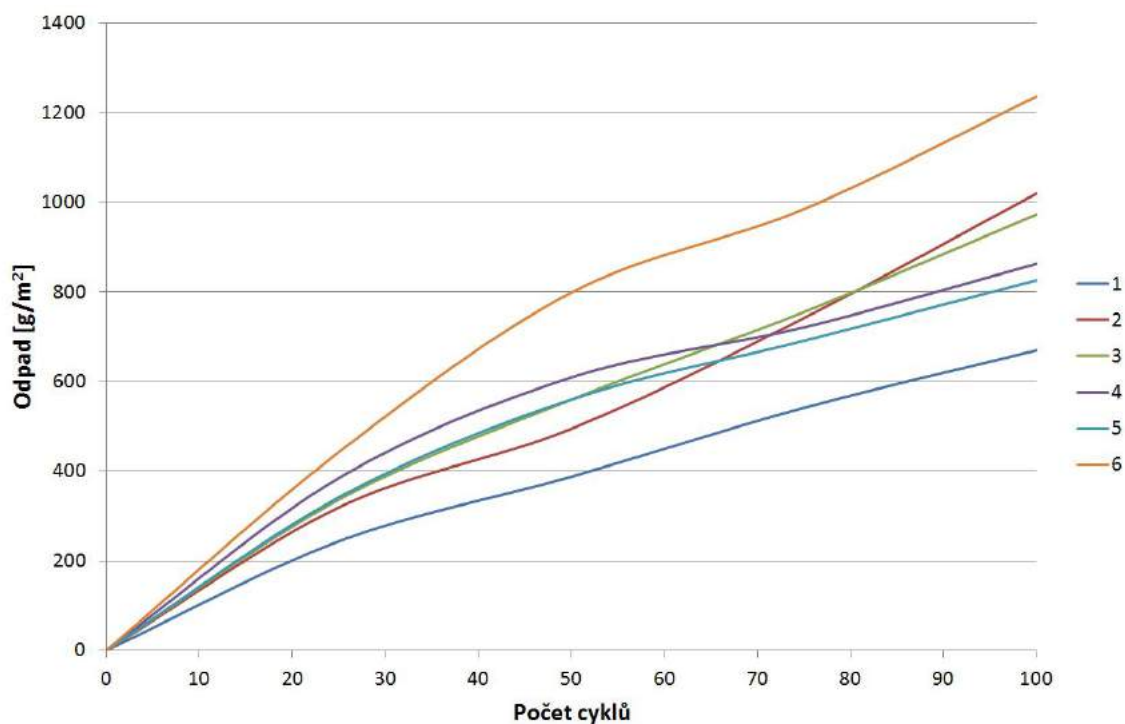
Vzorek	D1	Odchylka dle tab. 7.14	Zatřídění dle tab 7.1 po 100 cyklech
1	171,9	Nesplňuje	Narušený
2	93,2	Nesplňuje	Silně narušený
3	120,4	Splňuje	Narušený
4	121,5	Splňuje	Narušený
5	144,9	Splňuje	Narušený
6	94,9	Nesplňuje	Silně narušený

Tabulka 7.14: Průměrná hodnota D1 pro zkoušku CHRL 3

Průměrná hodnota D1	Tolerance -20%	Tolerance +20%
124,47	99,57	149,36

Tabulka 7.15: Průměrná hodnota D1 pro zkoušku CHRL 3 ze vorků spňující normovou odchylku dle tabulky 7.13

Průměrná hodnota D1
128,9



Obrázek 7.20: Odpady v závislosti na cyklech

7.2.6 Vyhodnocení zkoušek CHRL

Zkoušky CHRL byly provedeny pro recepturu GUM 20/80 a GUM 100/0. Porovnání výsledků je v tabulce 7.16. Je zřejmé, že přidání 40 kg/m^3 jemného gumového recyklátu do betonové směsi má výrazně pozitivní vliv na odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám.

Tabulka 7.16: Porovnání hodnot D1 pro provedené zkoušky CHRL

Zkouška	D1
CHRL 1	50,20
CHRL 2	31,68
CHRL 3	128,9

Dle požadavků "TKP (Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komu-

nikací) - kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty” je pro stupeň vlivu prostředí XF4³ a zkušební metodu A limitní odpad 1000 g/m² při 100 cyklech. Tuto hodnotu splňuje receptura GUM 100/0, použita ve zkoušce číslo 3.

Všeobecné podmínky pro stupeň vlivu prostředí XF4 dále jsou:

- Pevnostní třída C30/37 - dle tabulky 6.10 - Není splněno
- Minimální dávka cementu 340 kg/m³ - dle tabulky 3.1 - Splněno
- Obsah vzduchu min. 4% - dle tabulky 4.2 - Splněno
- Max v/c=0,5 - dle kapitoly 3.3 - Splněno

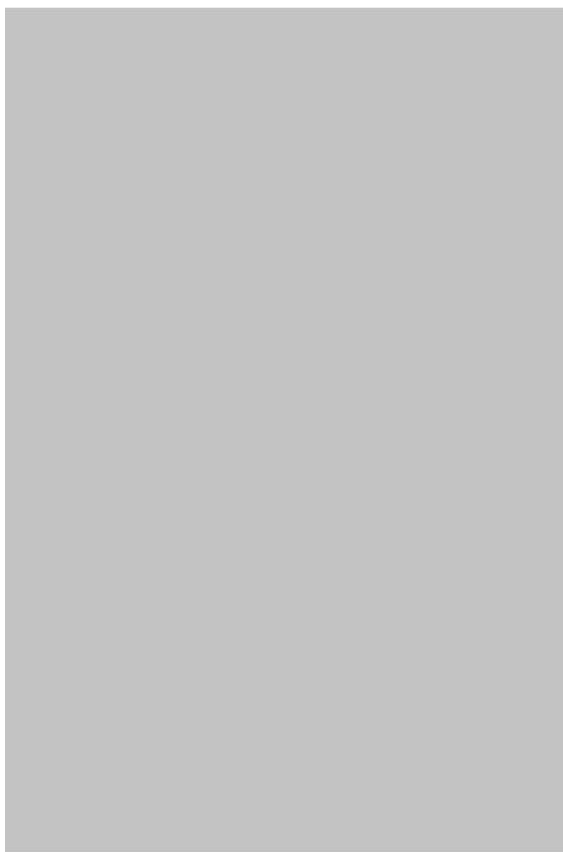
Nesplnění podmínky pevnostní třídy C30/37 omezuje využití receptury GUM 100/0 na konstrukce vystavené účinku CHRL, kde není vysoká únosnost požadována.

³XF4 - prostředí značně nasycené vodou s rozmrazovacími prostředky. V praxi se jedná o vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům, betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostř. a mrazu, omývaná část staveb na moři vystavená mrazu

7.3 Odolnost proti působení tlakové vody

Principů, kterými lze dosáhnout výroby betonu odolného proti tlakové vodě je několik. V současné době není platná žádná norma na specifikaci, výrobu a vlastnosti betonu odolného proti působení tlakové vody. V posledních letech se hojně využívají krystalizační přísady. Výrobci těchto přísad je uvádějí jako jediné fungující řešení. Zdali je toto tvrzení pravdivé, však není prokázáno.

Odolnost proti působení tlakové vody je závislá zejména na nepropustnosti cementové matrice. Cementovým kamenem je voda transportována kapilárními póry. Čím menší je množství kapilárních pórů v cementové matrici, tím je vyšší voděodolnost betonu. Vznik a množství kapilárních pórů je ovlivněno především vodním součinitelem. Při dodržení vodního součinitele $<0,4$ je cementový kámen téměř nepropustný. [21] Nižší vodní součinitel tedy vede k lepší odolnosti betonu proti tlakové vodě, ale zhoršuje zpracovatelnost směsi. Je tedy možné, že beton nebude kvalitně uhuťněn, vzniknou kaverny⁴, velké dutiny a efekt malého vodního součinitele na vodonepropustnost betonu bude opačný.



Obrázek 7.21: Vliv hodnoty vodního součinitele na hydrataci cementového tmele. 1 - cementové zrno, 2 - voda, 3 - nezhydratovaný cement, 4 - hydratovaný cement, 5 - kapilární póry; [24]

Kromě nepropustnosti cementového kamene o vodonepropustnosti betonu jako celku

⁴ Kaverny neboli hnízda jsou vzduchové kapsy v betonu vzniklé špatným uložením a zhuťněním směsi

rozhodují trhliny. V betonových konstrukcích vznikají trhliny zejména od zatížení a objemových změn. Pro vodonepropustný beton je tak nutné tyto trhliny eliminovat.

- Trhliny od zatížení - stupeň vyztužení je nejdůležitější konstrukční zásadou pro omezení šířky trhlin, případně vzniku trhlin. Stupeň vyztužení zpravidla bývá vyšší než by bylo nutné z hlediska únosnosti prvku
- Trhliny od smršťování - optimalizace složení betonové směsi souvisí se snahou omezit smršťování betonu a tím vznik trhlin. Vychází z vhodné granulometrie kameniva, vhodného typu cementu - cement s nízkým vývinem hydratačního tepla, nízkého vodního součinitele a využití stavební chemie (zpomalovače tuhnutí a tvrdnutí, reduktanty smršťování, plastifikátory, blokátory pórů)[23]

7.4 Zkouška tlakové vody dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou

7.4.1 Popis zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou

Zkouška tlakové vody dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou probíhá standardně na krychlech o hraně 150 mm. Stáří vzorků je minimálně 28 dní. Pokud není vzorek při betonáži upraven ocelovým hladítkem, je nutné po odformování zkoušenou plochu zdrsnit ocelovým kartáčem. Zkušební těleso se upne do zkušebního zařízení a nechá se působit hydrostatický tlak 500 kPa v kruhové ploše o průměru 75 mm. Doba působení tlakové vody je 72±2 hodiny. Po uplynutí zkušební doby se vzorek rozlomí a měří se hloubka průsaku. [25]

7.4.2 Výsledky

Tabulka 7.17: Vyhodnocení průsaku tlakové vody

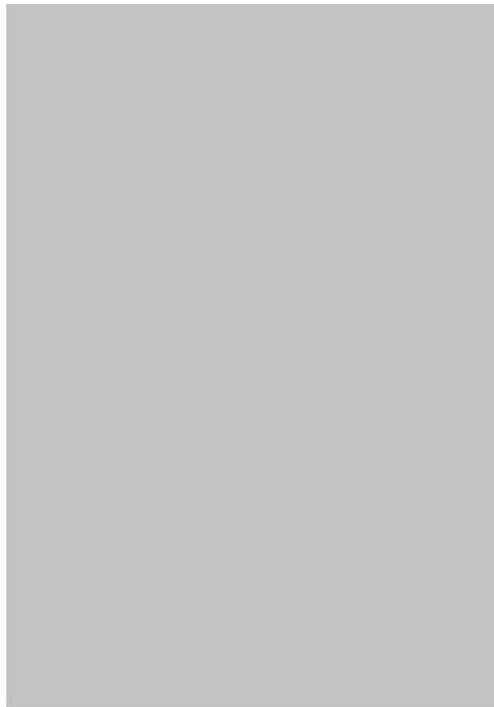
Označení vzorku	Hloubka průsaku [mm]
1 - GUM 20/80	83
2 - GUM 20/80	120
3 - GUM 20/80	90

7.4.3 Vyhodnocení

Maximální povolená hodnota průsaku tlakové vody pro stupeň XF2 - současné působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek je 35 mm. Naměřené hodnoty povolenou hranici nesplňují.



Obrázek 7.22: Zkouška hloubky průsaku tlakové vody na vzorcích GUM 20/80



Obrázek 7.23: Zkouška průsaku tlakové vody. 1 - opěrný kroužek, 2 - těsnící kroužek, 3 - upevňovací deska, 4 - stahovací šroub, 5 - tlaková voda, 6 - upevňovací deska; [25]

Kapitola 8

Vliv gumového recyklátu na objemové změny betonu

8.1 Smršťování betonu

Smršťování betonu (shrinkage of concrete) patří mezi základní objemové změny betonu. Jedná se o trvalou deformaci, která je závislá na stáří betonu. Smršťování betonu, důsledky a projevy nelze zcela eliminovat, lze je pouze omezit nebo kompenzovat. [9] Probíhá-li smršťování volně, není jeho vliv nikterak zásadní. Pokud je deformaci od smršťování betonu bráněno, vznikají v konstrukci dodatečné vnitřní síly nebo trhliny. U obvyklých receptur dosahuje hodnota smršťování v laboratorních standardních podmínkách přibližně $0,7 \text{ mm/m}$. V případě receptur jemnozrnných nebo z hlediska smršťování nevhodných může dosahovat smršťování až $2,5 \text{ mm/m}$. [10]

Smršťování betonu rozlišujeme dle typu:

- Plastické smršťování
- Autogenní (chemické) smršťování
- Smršťování z vysychání
- Karbonatační smršťování

Plastické smršťování (plastic shrinkage) je způsobeno úbytkem vody z betonu, který se nachází v přechodu ze stavu plastického do stavu tuhého. Z hlediska trvání má krátkodobý charakter. Náchylné jsou zejména velké plošné konstrukce, kde je velké procento povrchu na styku se vzduchem. Velikost plastického smršťování je do značné míry ovlivněna prostředím, ve kterém se beton nachází. Při 100 % vlhkosti okolního prostředí k plastickému smršťování nedochází, s klesající relativní vlhkostí jeho hodnota roste. Mezi další faktory ovlivňující velikost plastického smršťování patří teplota a proudění vzduchu. Oba faktory souvisí s již výše zmíněnou vlhkostí. Možnosti, jak plastické smršťování omezit, jsou vyztužit beton rozptýlenou výztuží ve struktuře kompozitu a udržovat beton vlhký, tj. v době tuhnutí a z počátku tvrdnutí je vhodné ošetřovat povrch betonu kropením.

Autogenní smršťování, Chemické smršťování (autogenous shrinkage, chemical shrinkage) je důsledek změny objemu látek vstupujících do procesu tvrdnutí betonu a z něj vystupujících. Jedná se o dlouhodobé smršťování. Objem pojiva a vody ve směsi před hydratací, je větší než výsledný objem zhydratovaného cementového tmelu. Autogenní smršťování lze definovat jako složku smršťování chemického. [Hammer, 1991] ztotožňuje na počátku hydratace smršťování chemické a autogenní. Ve chvíli tuhnutí betonové směsi se vlivem narůstající pevnosti tlumí vliv autogenního smršťování a převažuje vliv chemického smršťování. Pokračující chemické smršťování má za následek vzrůstající porozitu. [Holt, 2001] považuje za počátek chemického smršťování počátek tuhnutí směsi - viz obrázek 8.2. Od ukončení tuhnutí a tvrdnutí je přírůstek autogenního smršťování potlačen pevností materiálu. Chemické smršťování však pokračuje.

Velikost autogenního smršťování je přímo závislá na typu cementu, složení směsi a vodním součiniteli. Autogenní smršťování nabývá výrazných hodnot vzhledem k ostatním typům smršťování u směsí s nízkým vodním součinitelem. Udává se, že vysokopevnostní betony s vodním součinitelem nižším než 0,3 nabývají hodnoty autogenního smršťování 0,2 až 0,4 mm/m [10].

Smršťování z vysychání (drying shrinkage) nastává ve chvíli, kdy se ze zhydratovaného betonu odpařuje zbylá záměsová voda z kapilár. Z časového hlediska se jedná též o smršťování dlouhodobé. Hodnotu tohoto smršťování lze ovlivnit výztuží nebo vhodným složením betonové směsi, zejména pak kamenivem, jelikož kamenivo nepodléhá smršťování. Je-li beton řádně zhutněn, hrany kameniva se dotýkají a beton vykazuje menší smršťování vysycháním. Experimentálně bylo ověřeno, že ke smršťování vysycháním nedochází v prostředí s relativní vlhkostí větší jak 95%. Oddálení ukončení ošetřování nemá vliv na celkovou hodnotu smršťování z vysychání, jen na dobu jeho začátku a konce. [11]. U masivních konstrukcí klesá hodnota smršťování z vysychání směrem od povrchu do vnitřku konstrukce.

Karbonatační smršťování (carbonation shrinkage) se vyskytuje u konstrukcí dlouhodobě vystavených účinkům oxidu uhličitého. Největších hodnot dosahuje karbonatační smršťování při relativní vlhkosti 50 %. Za nízké relativní vlhkosti není v pórech dostatečné množství vody nutné pro vznik kyseliny uhličité, za vysoké relativní vlhkosti pak zaplňuje celé póry voda, která zamezí transportu oxidu uhličitého. [12]. V betonových konstrukcích umístěných v interiérech budov dochází k větším hodnotám karbonatačního smršťování v zimním období, jelikož v budovách bývá vyšší koncentrace oxidu uhličitého.[12]



Obrázek 8.2: Vztah chemického a autogenního smršťování [Holt, 2001]



Obrázek 8.1: Vztah chemického a autogenního smršťování [Kosmatka, 2008]

8.2 Experimentální měření

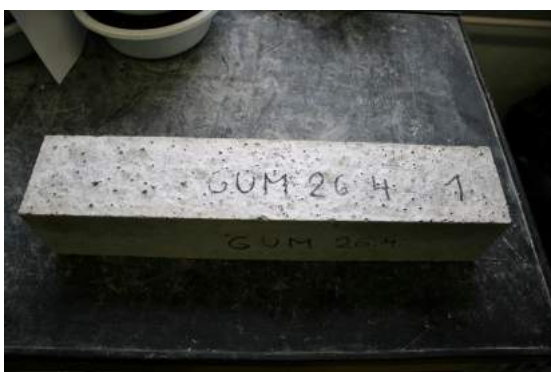
8.2.1 Experimentální měření smršťování

Experimentální měření smršťování bylo provedeno dle *ČSN 73 1320 Stanovení objemových změn betonu*. Měření probíhalo na trámci 100x100x500 mm obr.8.3. Beton byl do formy ukládán v souladu s *ČSN EN 12 390-2*. Do čela trámce byly zabetonovány měřicí čepy viz obr. 8.4. Povrch tělesa nebyl nijak ošetřován ani zakryt. Po celou dobu zkoušky bylo umožněno volné vysychání, aby zkouška simulovala nejhorší možné podmínky. Druhý den po betonáži byl vzorek vyjmut z formy, změřen a zvážen.

Následně byly v pravidelných intervalech sledovány změny délkové difference trámce oproti etalonu a úbytek hmotnosti.

Měření bylo provedeno na 5 různých betonových směsích FC (Fibre Concrete), UH-PFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforcement Concrete), GUM 20/80, HPC (High Performance Concrete), C30/37 (Concrete Strength 30/37 MPa), aby bylo možno detailní porovnání. Z každé záměsi byly vyrobeny 3 trámce. Každý trámec byl v rámci jednoho měření měřen 3x. Výsledná hodnota smršťování je aritmetický průměr ze všech tří trámců. Celkem tedy bylo provedeno 9 měření pro zjištění výsledné hodnoty smršťování v požadovaný den.

Ačkoliv norma ČSN 73 1320 doporučuje měřit smršťování ve stáří vzorku 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 a 360 dní, byl vzorek v prvním měsíci stáří měřen každý den, druhý měsíc každý týden, následně pak 1x za měsíc. Naměřené hodnoty byly proloženy logaritmickou křivkou. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.2 a 8.3. Na obrázku 8.7 je zaznamenán průběh smršťování¹.



Obrázek 8.3: Betonové trámce



Obrázek 8.4: Měřicí čepy



Obrázek 8.5: Detail měřicího zařízení



Obrázek 8.6: Vzorek v měřicí formě

¹Hodnoty smršťování [mm] na obrázku 8.7 jsou vztaženy k velikosti trámce tj. 500 mm, nikoliv v mm/m jako v tabulce 8.3

Tabulka 8.1: Experimentálně změřené hodnoty změny hmotnosti vlivem vysychání [kg]

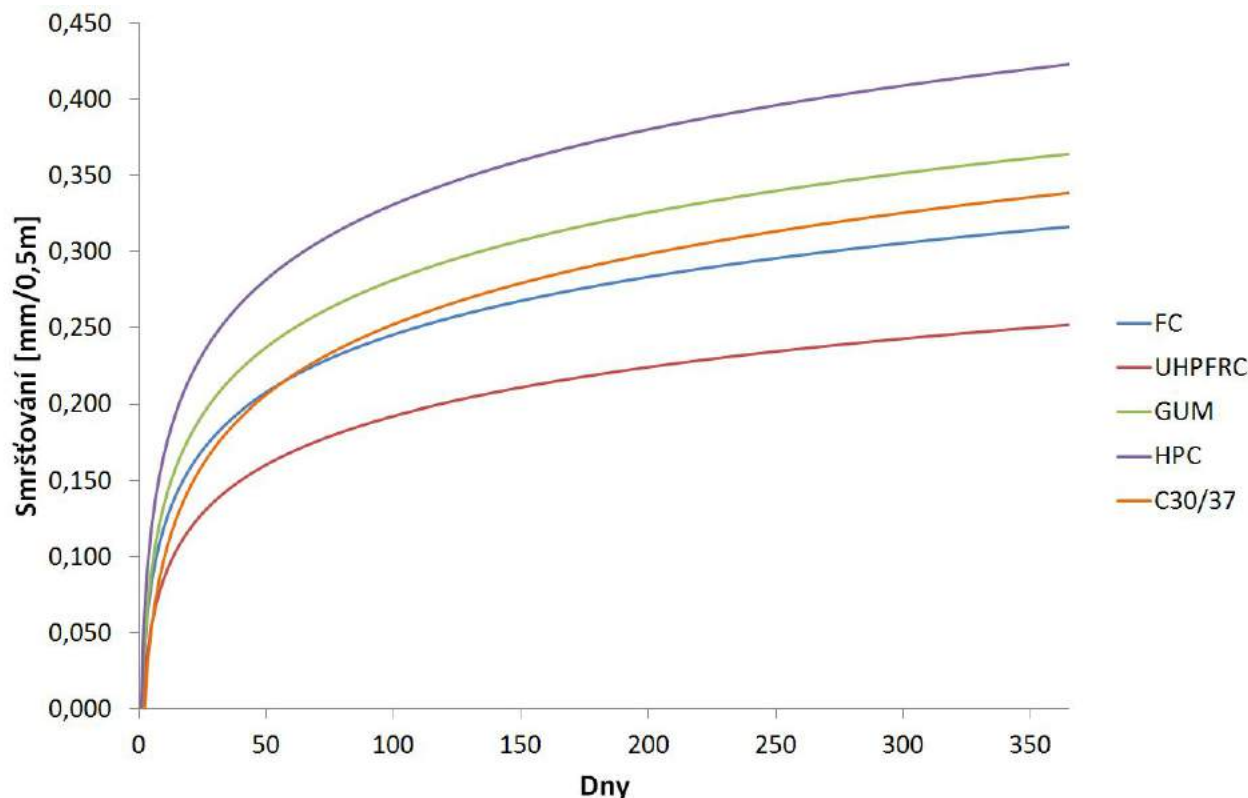
Dny	FC	UHPFRC	GUM	HPC	C30/37
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,023	0,022	0,028	0,016	0,030
3	0,037	0,035	0,044	0,025	0,047
7	0,065	0,062	0,079	0,045	0,083
14	0,088	0,084	0,107	0,061	0,112
21	0,102	0,097	0,123	0,071	0,130
28	0,111	0,107	0,135	0,077	0,142
56	0,134	0,129	0,163	0,093	0,171
90	0,150	0,144	0,182	0,104	0,192
360	0,196	0,188	0,238	0,136	0,251

Tabulka 8.2: Experimentálně změřené hodnoty smršťování [mm/0,5m]

Dny	FC	UHPFRC	GUM	HPC	C30/37
1	0,031	0,012	0,031	0,053	-0,009
2	0,054	0,030	0,057	0,082	0,018
3	0,069	0,044	0,076	0,102	0,038
7	0,107	0,076	0,120	0,151	0,184
14	0,142	0,105	0,160	0,196	0,126
21	0,163	0,122	0,185	0,223	0,151
28	0,178	0,135	0,202	0,243	0,170
56	0,215	0,166	0,246	0,291	0,215
90	0,240	0,188	0,275	0,324	0,246
360	0,316	0,251	0,264	0,422	0,338

Tabulka 8.3: Experimentálně změřené hodnoty smršťování [mm/m]

Dny	FC	UHPFRC	GUM	HPC	C30/37
1	0,063	0,023	0,063	0,106	-0,017
2	0,107	0,062	0,115	0,163	0,037
3	0,139	0,087	0,151	0,204	0,075
7	0,215	0,151	0,240	0,303	0,168
14	0,284	0,209	0,320	0,392	0,252
21	0,325	0,245	0,369	0,447	0,303
28	0,356	0,270	0,405	0,486	0,340
56	0,430	0,333	0,491	0,582	0,430
90	0,481	0,376	0,551	0,649	0,492
360	0,632	0,503	0,727	0,845	0,676



Obrázek 8.7: Průběh smršťování

8.2.2 Vyhodnocení

Dle tabulky 8.3 a obrázku 8.7 je zřejmé, že gumobeton dosahuje standardní hodnoty smršťování $0,727 \text{ mm}/m$ tak, jak je uvedeno v úvodu. Tato hodnota je blízká hodnotě referenčního vzorku C30/37. Dále je ukázáno, že nejmenší hodnoty smršťování dosahují trávce z vláknobetonu s ocelovými drátky tj. FC (Fibre Concrete) a UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforcement Concrete). Nejvyšší hodnoty smršťování dosahuje vysokopevnostní beton bez drátků HPC (High Performance Concrete).

Předchozí výzkumy Raghvan, [13] naznačují, že příměs gumového recyklátu má pozitivní vliv na šířku smršťovacích trhlin. Přidání 5 hmotnostních procent do betonu snižuje šířku trhlin od smršťování o 30 - 50 %.

Výrazně pozitivní nebo negativní vliv gumového recyklátu na výsledné hodnoty smršťování však měření neprokázalo.

Kapitola 9

Elektronová mikroskopie

Pro lepší pochopení vlivu gumového recyklátu na cementovou matrici byly pořízeny snímky elektronovým mikroskopem. Snímky byly pořízeny z receptury REF, GUM 0/100 a GUM 100/0. Postup přípravy snímků probíhal následovně:

- Rozřezání betonového vzorku na malé kousky do rozměru 25x25 mm
- Vysušení nařezaných vzorků
- Zalití vzorků pryskyřicí (zalití probíhá ve vakuu)
- Broušení vzorků pomocí nanodiamantů

Pro snímání povrchu byly použity jak primární, tak sekundární elektrony. Zvětšení snímků bylo 20x, 50x a 150x.



Obrázek 9.1: Vzorky před úpravou

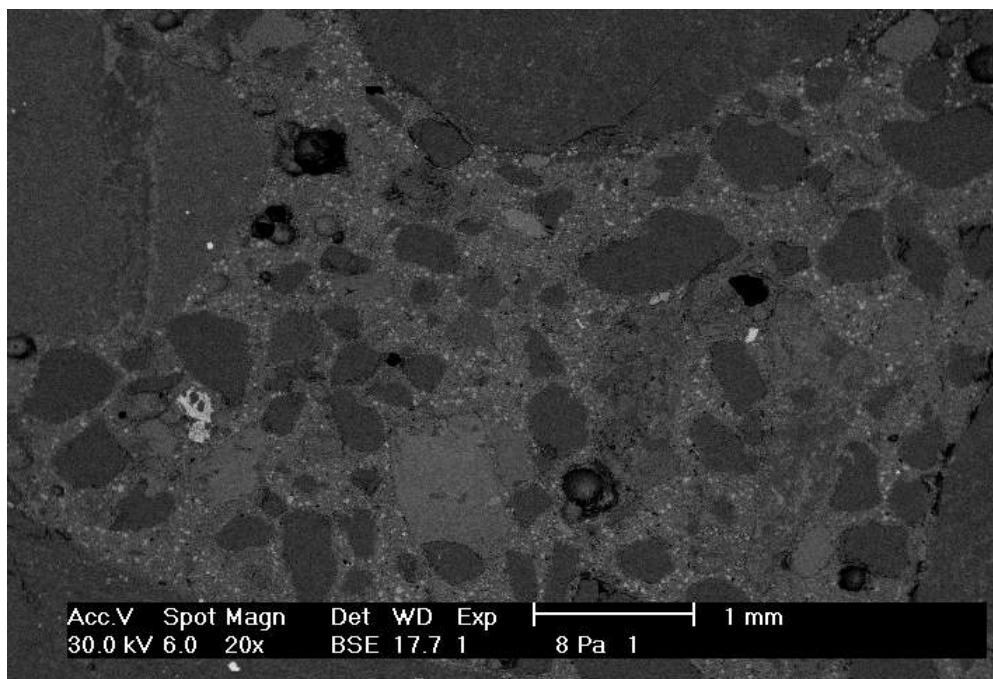


Obrázek 9.2: Vzorky po úpravě

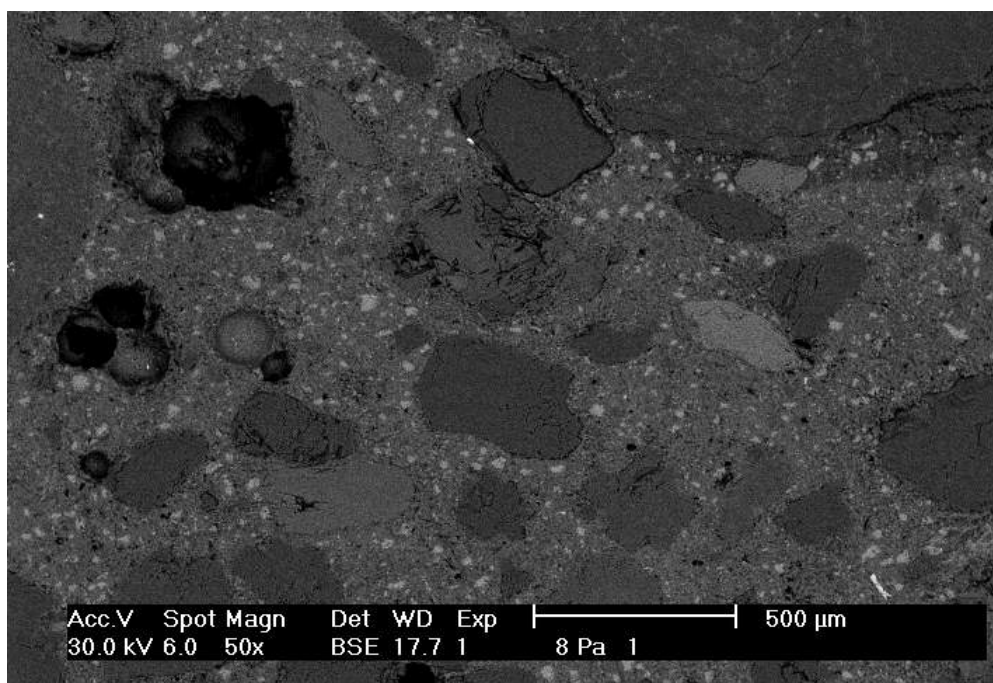
Snímky s přiblížením 20x a 50x byly pořízeny jak pomocí primárních, tak pomocí sekundárních elektronů. Sekundární elektrony (SE) se používají pro zobrazení povrchu, primární tzv. zpětně odražené elektrony (BSE) se používají na rozlišení fází materiálu.

9.1 Primární a sekundární elektrony

9.1.1 Receptura REF

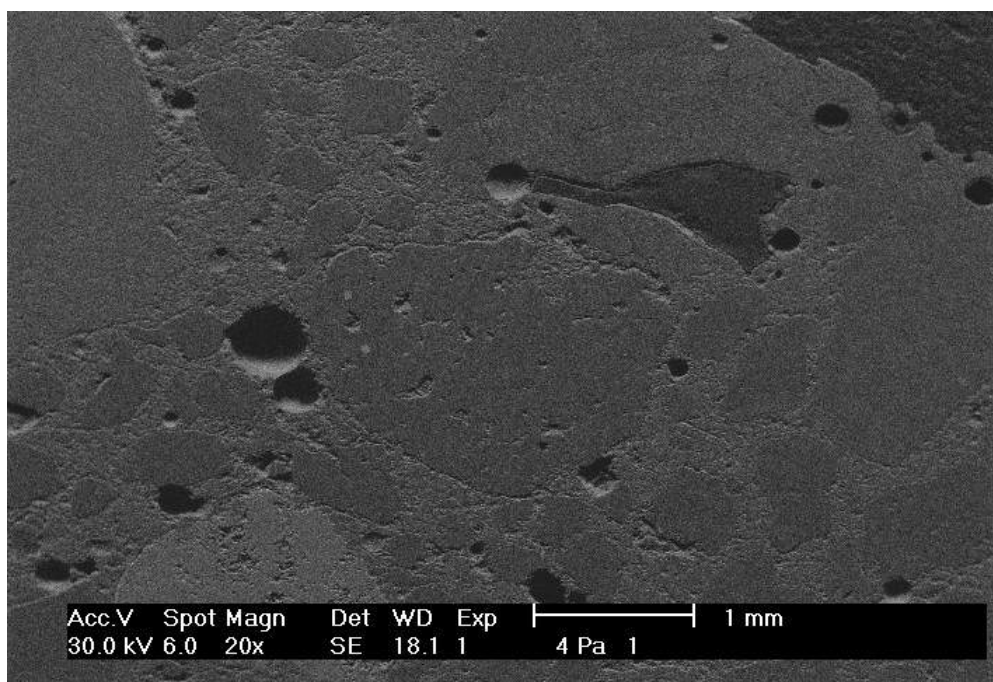


Obrázek 9.3: Snímek pomocí primárních elektrónů - přiblížení 20x

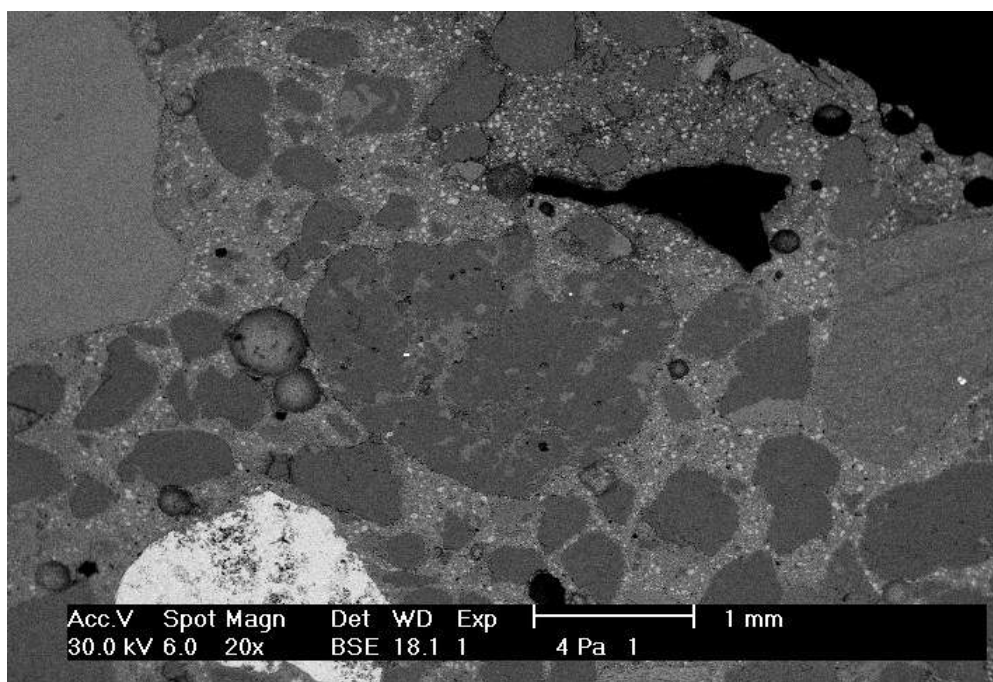


Obrázek 9.4: Snímek pomocí primárních elektrónů - přiblížení 50x

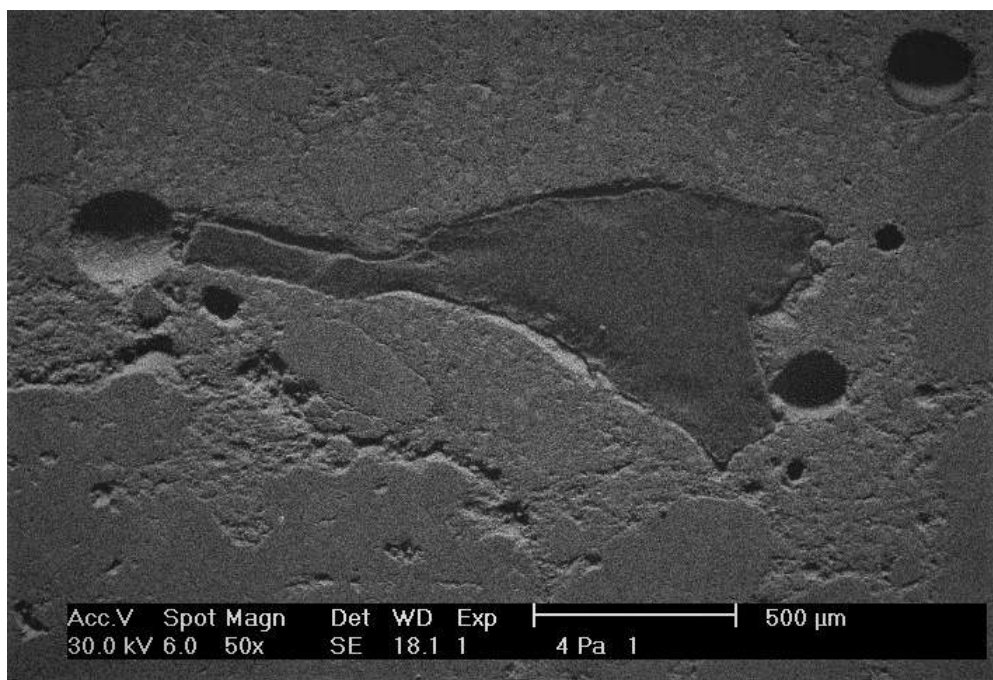
9.1.2 Receptura GUM 0/100



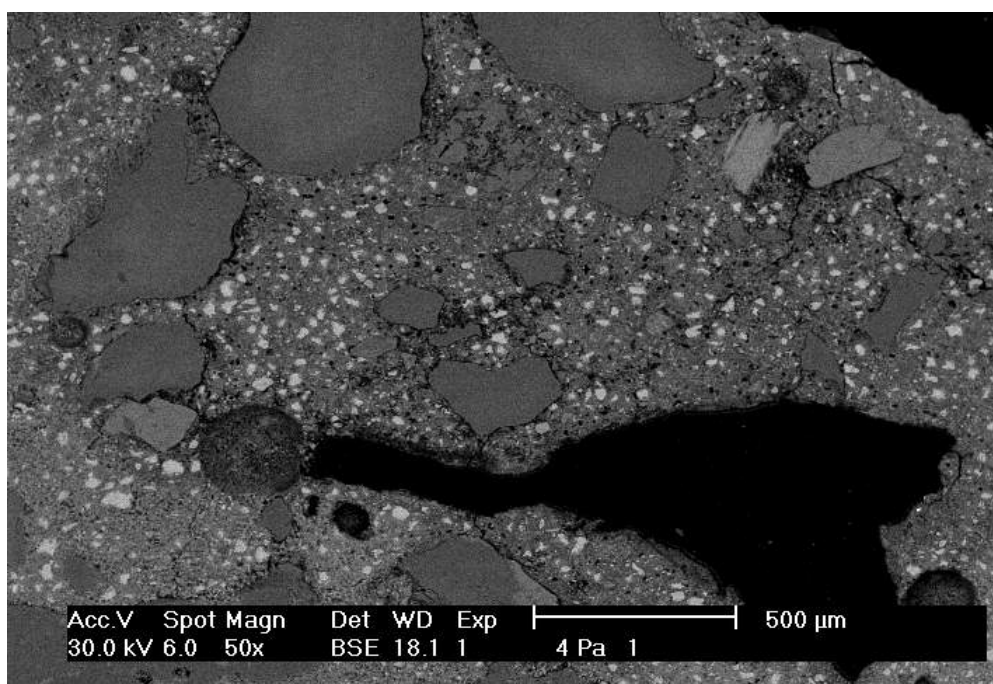
Obrázek 9.5: Snímek pomocí sekundárních elektronů - přiblížení 20x



Obrázek 9.6: Snímek pomocí primárních elektronů - přiblížení 20x

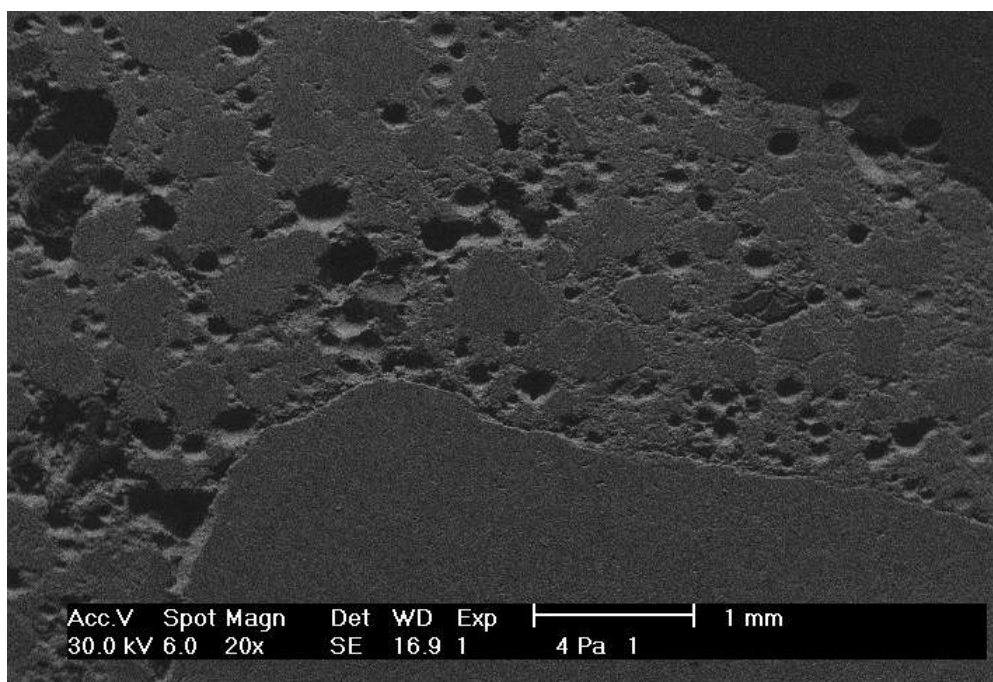


Obrázek 9.7: Snímek pomocí sekundárních elektronů - přiblížení 50x

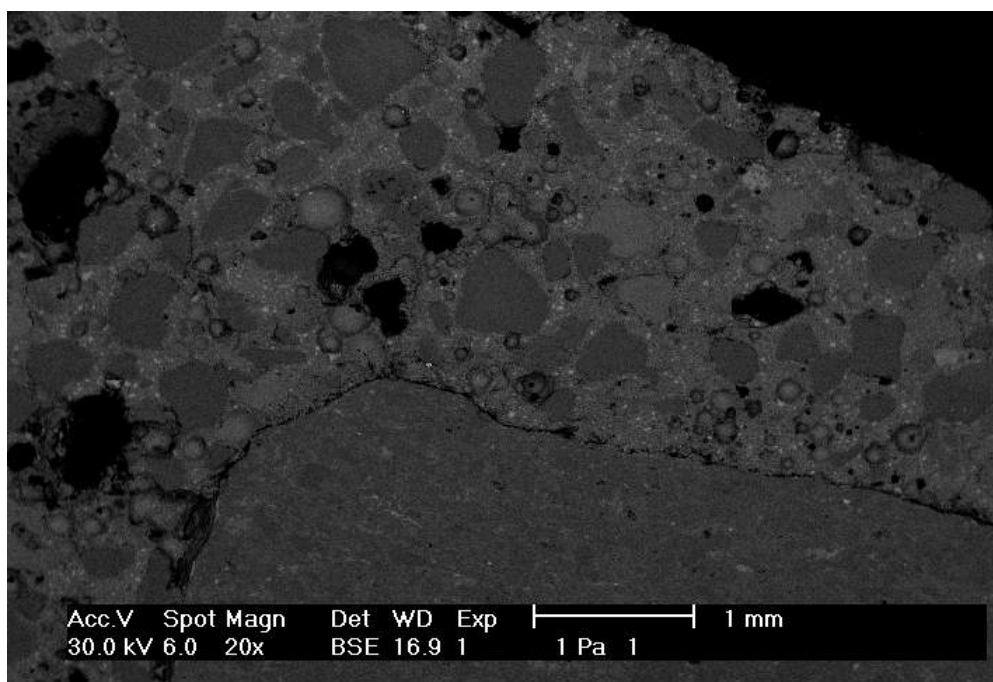


Obrázek 9.8: Snímek pomocí primárních elektronů - přiblížení 50x

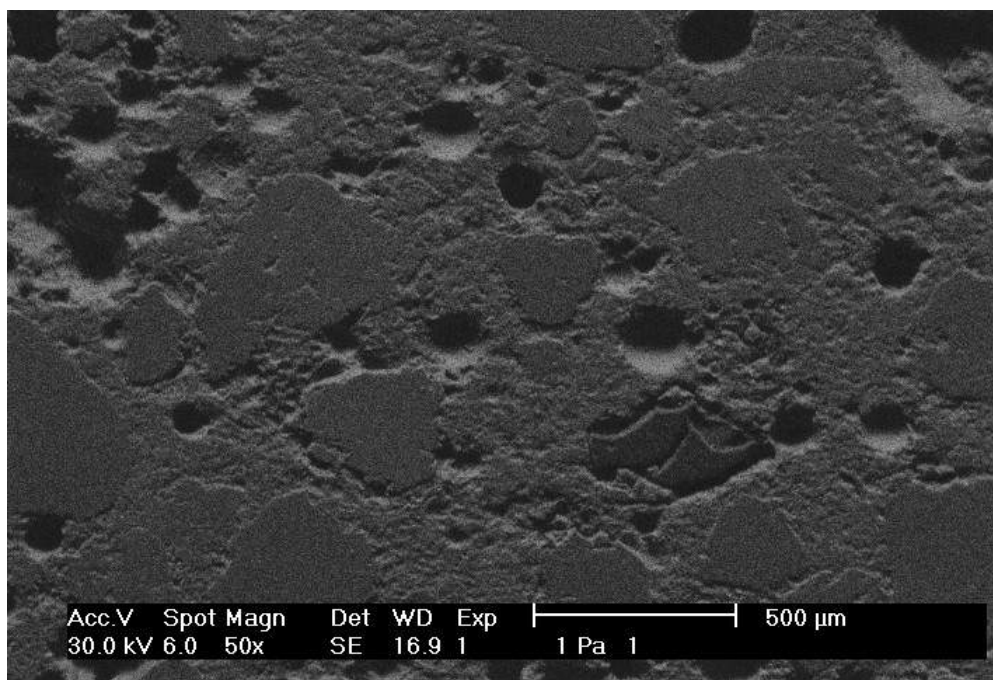
9.1.3 Receptura GUM 100/0



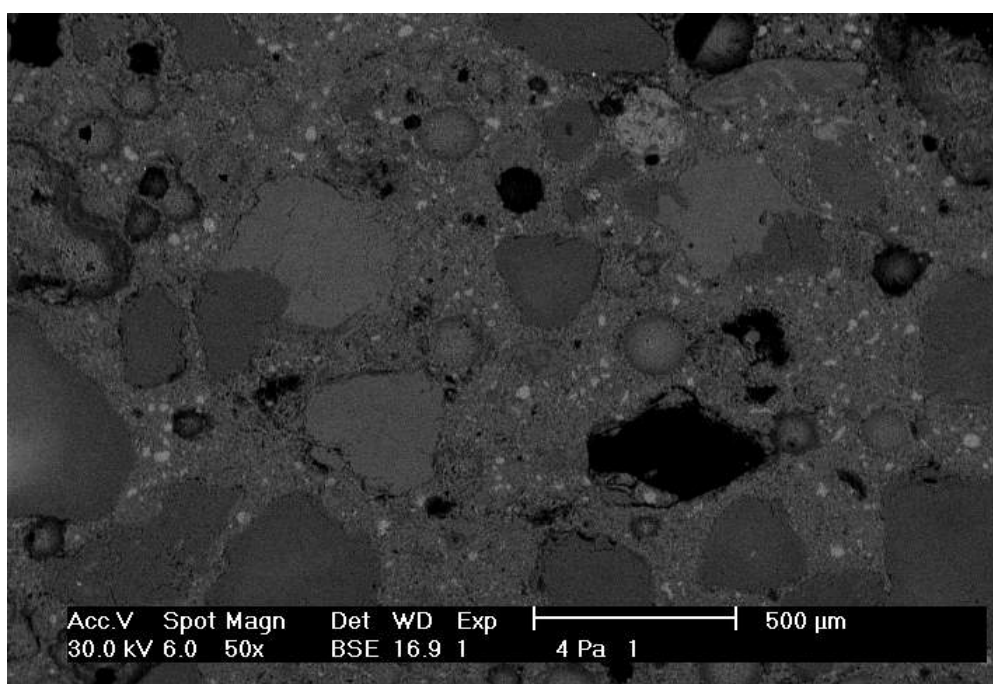
Obrázek 9.9: Snímek pomocí sekundárních elektronů - přiblížení 20x



Obrázek 9.10: Snímek pomocí primárních elektronů - přiblížení 20x



Obrázek 9.11: Snímek pomocí sekundárních elektronů - přiblížení 50x



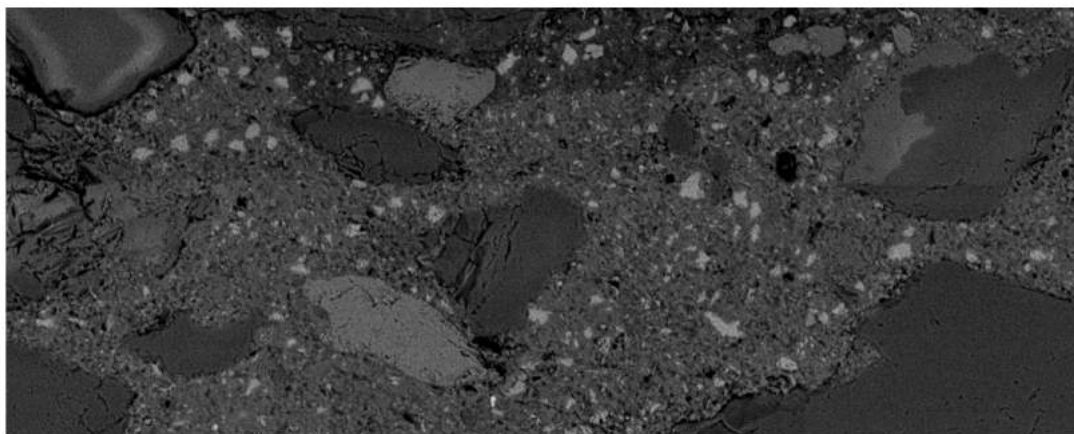
Obrázek 9.12: Snímek pomocí primárních elektronů - přiblížení 50x

9.2 Vyhodnocení množství nezhydratovaných cementových zrn a pórů

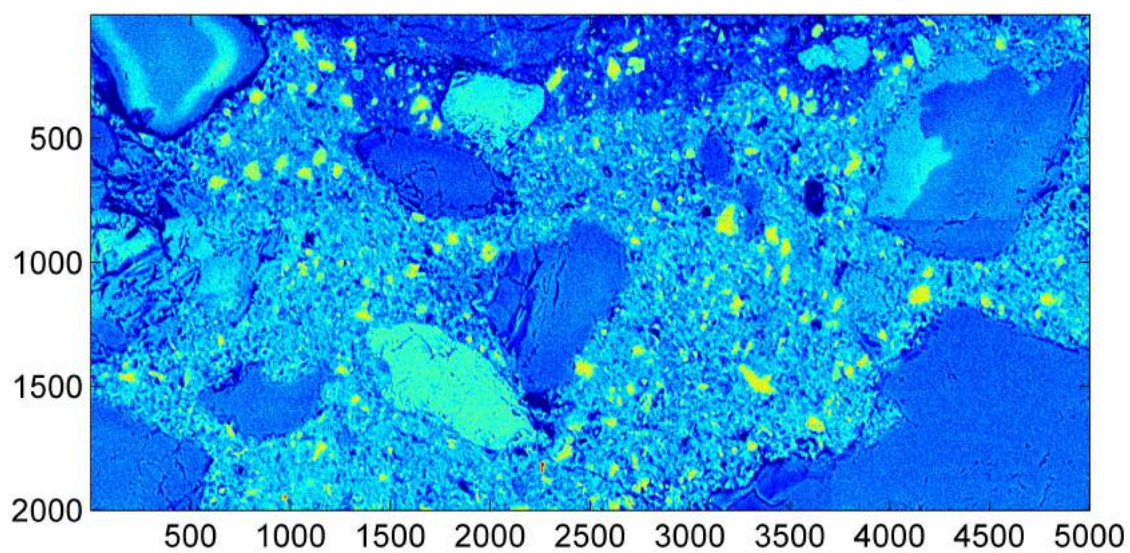
Pomocí programu Matlab R2012b bylo provedeno vyhodnocení snímků REF, GUM 0/100 a GUM 100/0. Vyhodnocení je založeno na zvýraznění intervalu odstínu šedé od-

povídající vzduchovému póru, gumě, nezhydratovanému cementovému zrně nebo kamenivu.

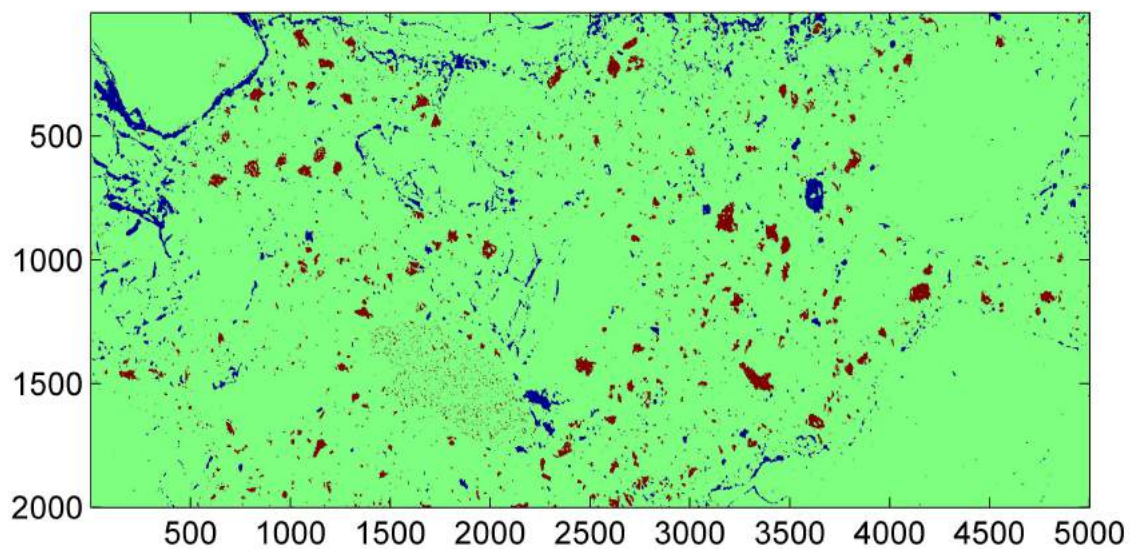
9.2.1 Receptura REF



Obrázek 9.13: Načtený snímek

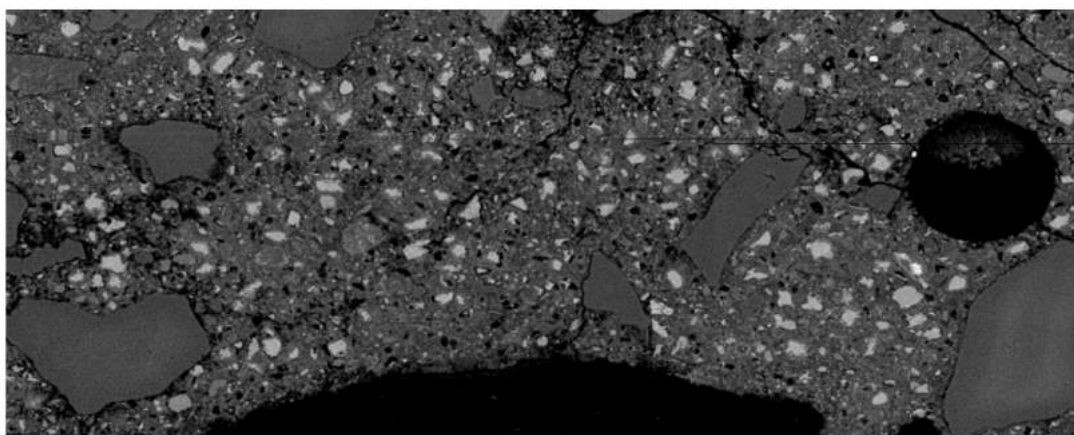


Obrázek 9.14: Zvýraznění snímku dle indexu odstínu šedé

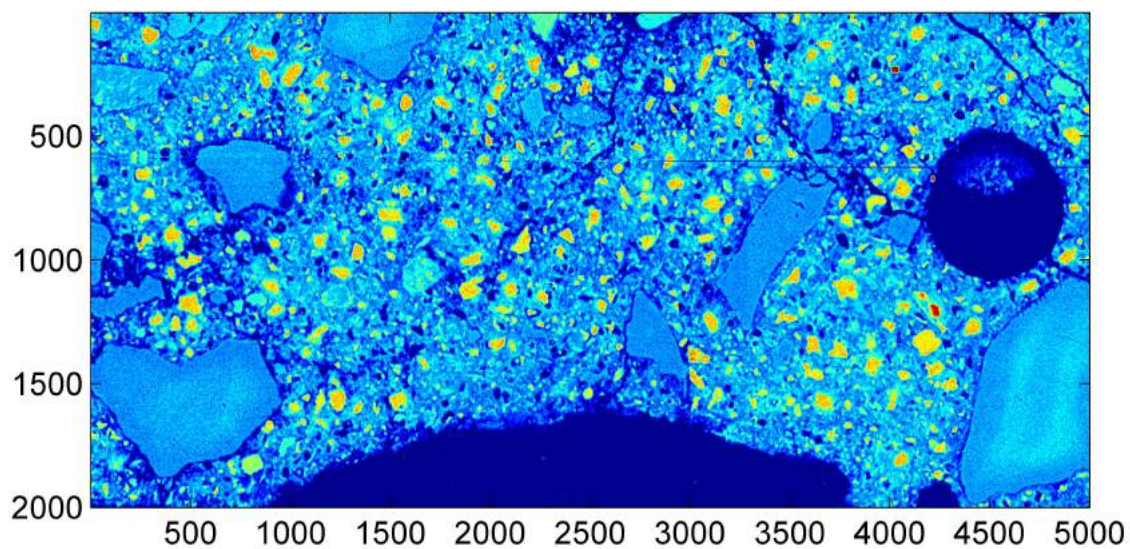


Obrázek 9.15: Roztřídění matrice materiálu na póry a nezhydratovaná cementová zrna

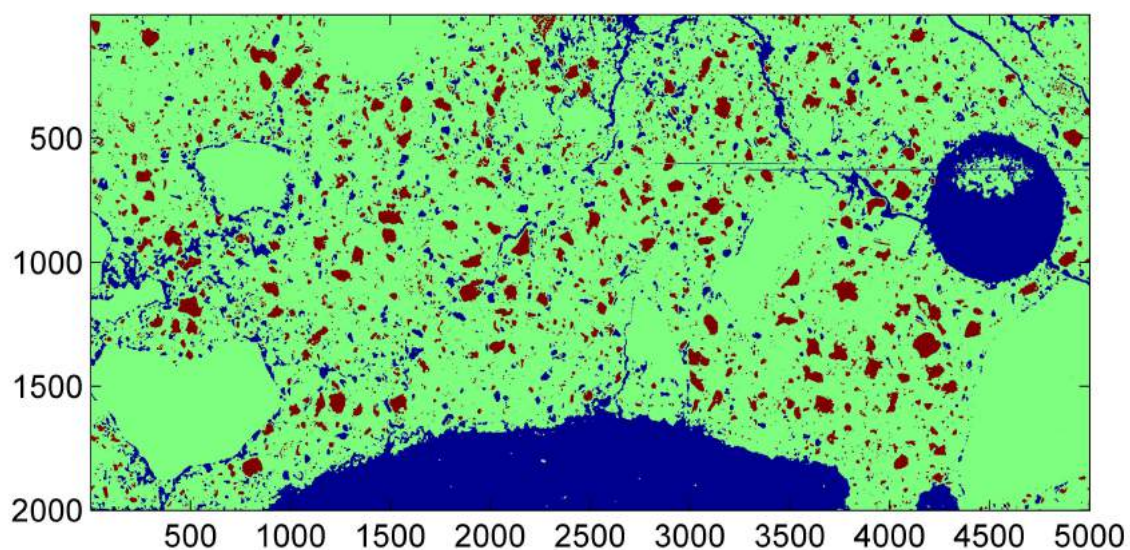
9.2.2 Receptura GUM 0/100



Obrázek 9.16: Načtený snímek

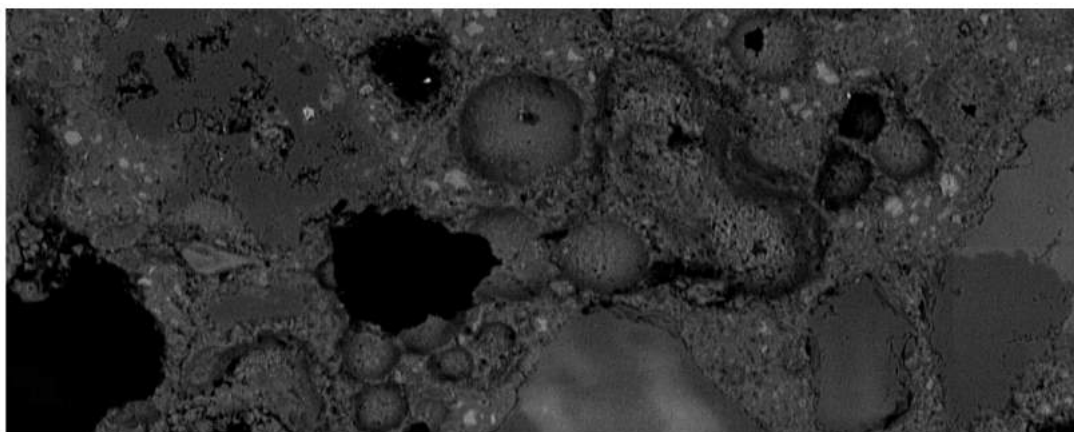


Obrázek 9.17: Zvýraznění snímku dle indexu odstínu šedé

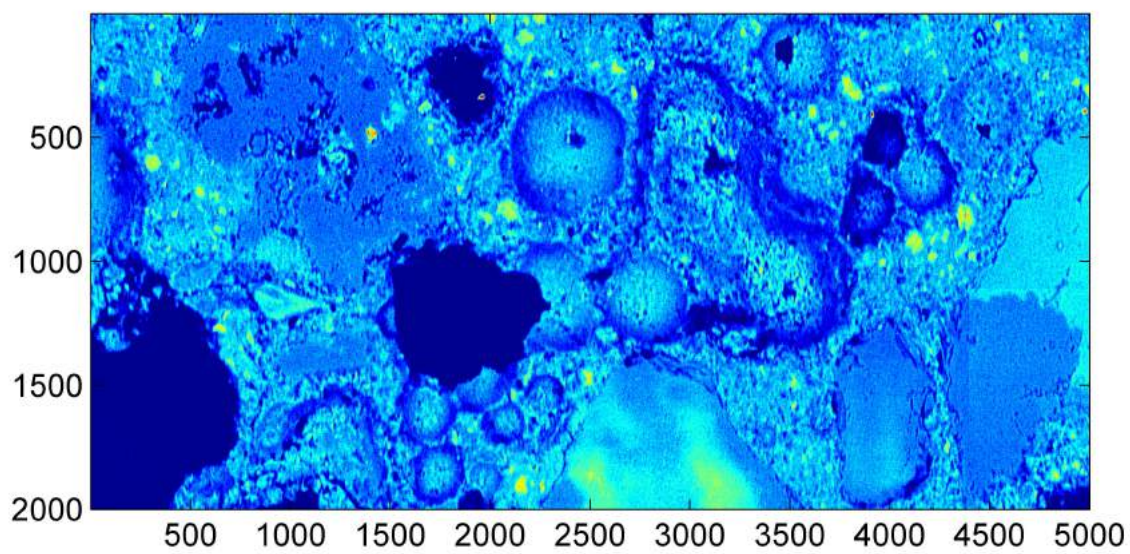


Obrázek 9.18: Roztřídění matrice materiálu na póry a nezhydratovaná cementová zrna

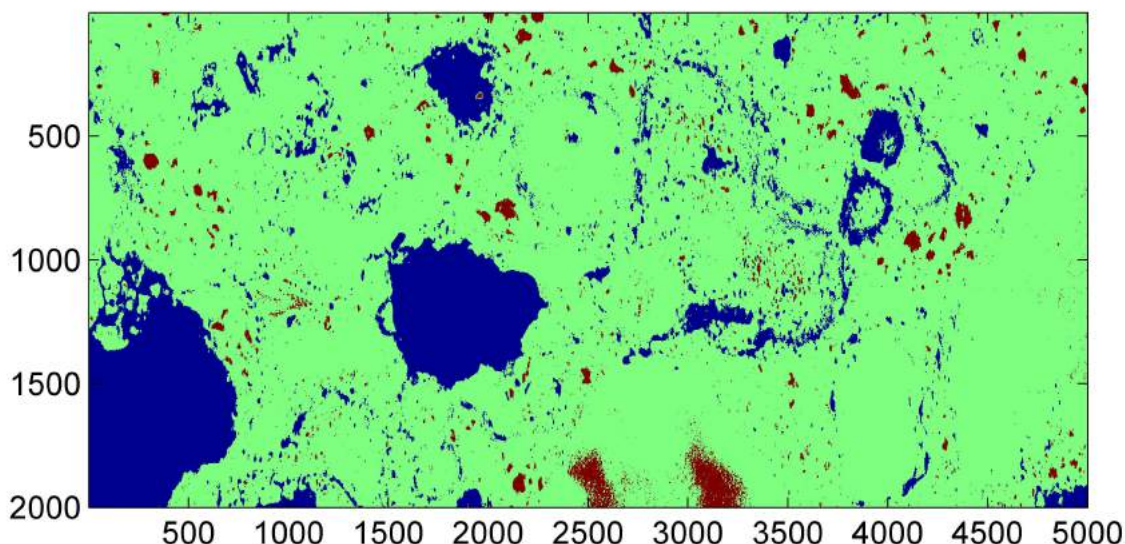
9.2.3 Receptura GUM 100/00



Obrázek 9.19: Načtený snímek



Obrázek 9.20: Zvýraznění snímku dle indexu odstínu šedé



Obrázek 9.21: Roztřídění matrice materiálu na póry a nezhydratovaná cementová zrna

9.3 Vyhodnocení elektronové mikroskopie

Porovnání snímků z elektronového mikroskopu ukázalo, že v okolí hrubého gumového zrna na obrázku 9.6 a 9.8 je výrazně vyšší množství nezhydratovaných cementových zrn v porovnání s okolím jemného gumového zrna na obrázku 9.10 a 9.12 a také v porovnání se vzorkem gumový recyklát neobsahující. Numericky spočtené hodnoty obsahu nezhydratovaných cementových zrn jsou uvedeny v tabulce 9.1. Vzorek obsahující jemný gumový recyklát vykazuje výrazně vyšší množství makro a mikro pórů. Vzdálenost těchto pórů je v průměru 0,1 - 0,5 mm. Zvýšený obsah vzduchu v receptuře GUM100/0 potvrzuje i zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu (tabulka 4.2).

Elektronovou mikroskopií bylo dokázáno nejen zvýšené provzdušnění gumobetonu z receptury GUM 100/0, ale také vhodná vzdálenost a velikost pórů z hlediska zvýšení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám. Teoretický předpoklad potvrdila i zkouška CHRL 3 popsaná v kapitole 7.2.5.

Tabulka 9.1: Vyhodnocení obsahu pórů a nezhydratovaných cementových zrn

Receptura	Obsah pórů [%]	Obsah nezhydratovaných zrn [%]
REF	3,124	2,748
GUM 0/100	16,503	7,482
GUM 100/0	14,510	2,514

Kapitola 10

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zhodnocení mechanických vlastností a trvanlivosti betonu s příměsí gumového recyklátu. Byla provedena řada zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu. Na závěr byly pořízeny snímky pomocí elektronové mikroskopie. Celý soubor zkoušek byl proveden z receptury obsahující $40\text{kg}/\text{m}^3$ gumového recyklátu v betonové směsi. Některé zkoušky byly navíc provedeny s obsahem $80\text{kg}/\text{m}^3$ a $120\text{kg}/\text{m}^3$ gumového recyklátu. Veškeré zkoušky byly porovnány s referenční recepturou, která gumový recyklát neobsahuje. Kromě vlivu množství gumového recyklátu byl zkoumán i vliv jeho frakce na chování betonu.

Zkoušky čerstvého betonu prokázaly, že s přibývajícím množstvím gumového recyklátu v betonu klesá zpracovatelnost a roste obsah vzduchu v čerstvém betonu. Dále bylo prokázáno, že jemný gumový recyklát ($0 - 1\text{mm}$) snižuje zpracovatelnost a zvýší provzdušnění čerstvého betonu více, než hrubý gumový recyklát ($1 - 3\text{mm}$). Zatímco referenční záměs vykazovala provzdušnění 2,1%, receptura obsahující hrubý gumový recyklát 2,7% a receptura obsahující jemný gumový recyklát 7% při obsahu gumového recyklátu $40\text{kg}/\text{m}^3$. Ve snaze pro zachování stejné zpracovatelnosti gumobetonu jako referenční receptury, je nutná úprava vodního součinitele.

Zkoušky provedené na ztvrdlém betonu, mezi které patří zkouška pevnosti v tlaku, zkouška pevnosti v příčném tahu, měření porozity, zkouška odolnosti povrchu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám a zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou prokázaly zejména negativní důsledky gumového recyklátu na ztvrdlý beton. Pevnost betonu v tlaku a pevnost betonu v příčném tahu klesá s tím, jak obsah gumového recyklátu roste. Obdobně, jako u zkoušek čerstvého betonu, bylo prokázáno, že hrubý gumový recyklát snižuje pevnost méně, než jemný gumový recyklát při stejném množství. Gumový recyklát rovněž nevykazuje pozitivní vliv na hloubku průsaku tlakové vody.

Velmi pozitivní vliv má gumový recyklát na odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Přidání $40\text{kg}/\text{m}^3$ jemného gumového recyklátu ($0 - 1\text{mm}$) do receptury betonu zvýšilo odolnost cca 2,5x oproti receptuře obsahující hrubý gumový recyklát ($1 - 3\text{mm}$) o stejném obsahu. Toto souvisí s nárůstem provzdušnění betonu s jemným gumovým recyklátem.

V rámci experimentálního programu bylo měřeno smršťování gumobetonu v porovnání s několika dalšími recepturami betonu a drátkobetonu. Zatímco nejmenší hodnotu smršťování vykazovala receptura UHPFRC (Ultra - High Performance Fibre - Reinforced Concrete) a to $0,503 \text{ mm/m}$, nejvyšší hodnotu dosáhla receptura HPC (High Performance Concrete) $0,845 \text{ mm/m}$. Beton s gumovým recyklátem dosáhl na hodnotu $0,727 \text{ mm/m}$, což je srovnatelné se standardní betonovou recepturou C30/37, která dosáhla na hodnotu $0,676 \text{ mm/m}$.

Výrazně negativní ani pozitivní vliv gumového recyklátu na hodnoty smršťování nebyly prokázány.

V poslední části diplomové práce byly pořízeny snímky betonu s příměsí gumového recyklátu pomocí elektronové mikroskopie. Snímky byly provedeny pro referenční receptuře a recepturách obsahující pouze jemný a hrubý gumový recyklát v množství 40 kg/m^3 . Použité přiblížení bylo 20x, 50x a 150x. Povrch byl snímán jak pomocí primárních, tak sekundárních elektronů. Vyhodnocení pořízených snímků bylo provedeno pomocí programu MATLAB R2012b. Zjištěn byl vliv gumového recyklátu nejen na obsah pórů, ale především na množství nezhydratovaných cementových zrn. Zatímco obsah pórů se u receptur s pouze jemným a hrubým gumovým recyklátem zvýšil shodně 5x oproti referenční receptuře, obsah nezhydratovaných cementových zrn vzrostl pro recepturu obsahující hrubý gumový recyklát z 2,7 % na 7,5 %. U receptury s jemným gumovým recyklátem zůstala hodnota obsahu nezhydratovaných cementových zrn téměř totožná s referenční recepturou.

Provedené zkoušky ukázaly potenciál využití betonu s příměsí gumového recyklátu na konstrukce vyžadující vyšší odolnost proti mrazu a proti chemickým rozmrazovacím látkám. Využití gumobetonu je například v silničním stavitelství, ať už jako podkladní vrstvy nebo povrchy parkovišť a ploch, kde není vysoká návrhová rychlost pojezdu motorových vozidel. Další možnost uplatnění má gumobeton na konstrukce nosného i nenosného charakteru namáhané zmrazovacími cykly. Vzhledem k tomu, že se gumový recyklát stává materiálem stále dostupnějším a je předpoklad jeho zlevnění, je potenciál využívat gumový recyklát jako náhradu provzdušňovacích přísad i z hlediska ekonomického, nejen ekologického. Provedené zkoušky zcela jistě neodhalily všechny pozitivní vlastnosti gumového recyklátu na chování betonu. Bylo by příhodné gumobetonu i nadále věnovat pozornost a podpořit myšlenku trvale udržitelného rozvoje.

Literatura

- [1] EDITORS, John Zachar .. [et al.]. *Sustainable construction materials and technologies: Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 28-30 June 2010, Ancona, Italy*. Milwaukee, WI: UWM Center for By-Products Utilization, 2010. ISBN 9781450714907.
- [2] LIU, Hanbing, Xianqiang WANG, Yubo JIAO a Tao SHA. *Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete*. *Materials* [online]. 2016, 9(3), 172- [cit. 2016-10-23]. DOI: 10.3390/ma9030172. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/3/172>
- [3] KALOUSH, Kamil, George WAY a Han ZHU. 2005. *Properties of Crumb Rubber Concrete*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 1914, 8-14 [cit. 2016-10-23]. DOI: 10.3141/1914-02. ISSN 0361-1981. Dostupné z: <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1914-02>
- [4] Gumový granulát z pneumatik [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/gumovy-granulat-z-pneumatik/>
- [5] ČSN EN 12350-2 (731301): *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 2009.
- [6] BEKHITI, Melik, Habib TROUZINE a Aissa ASROUN. 2014. *Engineering, Technology and Applied Science Research: Properties of Waste Tire Rubber Powder*. 4. ISBN 978-960-93-4742-6.
- [7] Provozdušňovací přísady [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/provzdušnovaci-prisady>
- [8] Plastifikační přísady [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/plastifikacni-prisady>
- [9] Smršťování betonu [online]. [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu>
- [10] Smršťování betonu, platné normy a betonové podlahy [online]. [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/podlahy-pricky-povrchy/6479-smrstovani-betonu-platne-normy-a-betonove-podlahy>
- [11] ČERVENKA, Jiří. *Vliv přísad redukujících smršťování na reologické vlastnosti vysokopevnostního betonu*. Brno, 2013.
- [12] COLLEPARDI, Mario. 2009. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [13] RAGHAVAN, D a H HUYNH. 1998. *Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite*. In: *Journal of Materials Science*. 33(7), s. 1745-1752. DOI: 10.1023/A:1004372414475. ISSN 0022-2461. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1004372414475>

- [14] NOVÁČEK, Jaroslav. *Studium objemových změn pojivových silikátových směsí*. Brno, 2013. 169 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc..
- [15] AÏTCIN, Pierre-Claude. 2005. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [16] ŠMERDA, Zdeněk. 1999. *Životnost betonových staveb*. Praha: Český svaz stavebních inženýrů. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902-6978-8.
- [17] VALENZA, John J ,*A review of salt scalling: II Mechanism. Cement and Concrete Research* [online]. 2007, č. 3. Dostuné z <http://sciencedirect.com>
- [18] ČSN 73 1326/Z1. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření 1.11.2003.
- [19] MISÁK, Petr, Tomáš VYMAZAL, Oldřich ŽALUD a Barbara KUCHARCZYKOVÁ. *Beton: STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI PŮSOBENÍ CHR L PODLE ČSN 73 1326 – OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK* [online]. 2013(4), 120-124 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-4-120_2.pdf
- [20] *BETON – VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI* [online]. [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/mi1/MI6.pdf>
- [21] *STAVEBNÍ LÁTKY Beton I.* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/AI01/beton1.pdf>
- [22] *Vodní součinitel* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vodni-soucinitel>
- [23] *Bílá vana: vodonepropustná betonová konstrukce* [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/stavebnictvi/02a015/bila_vana_vodonepropustny_beton.html
- [24] SVOBODA, Luboš. 2004. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga. ISBN 80-807-6007-1.
- [25] ČSN EN 12390-8: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. 2009. Praha.
- [26] PYTLÍK, Petr. 1994. *Technologie betonu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-858-6707-9.
- [27] KADA-BENAMEUR, H., E. WIRQUIN a B. DUTHOIT. 2000. *Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry*. Cement and Concrete Research. 30(2), 301-305. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00250-1. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699002501>
- [28] MAEKAWA, Koichi, Rajesh CHAUBE a Toshiharu KISHI. 1999. *Modelling of concrete performance: hydration, microstructure formation, and mass transport*. New York: E. ISBN 04-192-4200-7.
- [29] P. KUMAR MEHTA, PAULO J.M. MONTEIRO., P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro., Rajesh CHAUBE a Toshiharu KISHI. 2006. *Concrete microstructure, properties, and materials: hydration, microstructure formation, and mass transport*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. Betonové stavitelství. ISBN 00-715-8919-8.

- [30] JENNINGS, Hamlin M., J. J. THOMAS, D. ROTHSTEIN a J. J. CHEN. 2002. *Cements as Porous Materials. Handbook of Porous Solids*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, , 2971. DOI: 10.1002/9783527618286.ch40. ISBN 9783527618286. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527618286.ch40>
- [31] ČSN EN 12390-3 (731302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2009. Praha.
- [32] *Salinita* [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Salinita>
- [33] John J. Valenza II, George W. Scherer: *A review of salt scaling: I. Phenomenology Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 7, July 2007, Pages 1007-1021
- [34] ČSN EN 12350-7 (731301): *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. 2009.
- [35] ČSN EN 12390-6 (731302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2010.
- [36] *Pevnost betonu v příčném tahu - zkouška* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-pricnem-tahu-zkouska>
- [37] ČSN EN 1990 (730002), ČSN EN 1990 (730002): *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. 2004.
- [38] *Granulát dle jemnosti mletí*[online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: http://www.sycorex.cz/wp-content/uploads/2012/10/granulat_vzorek.jpg
- [39] *Vlastnosti portlandského cementu CEM I 42,5 R Mokrý* [online]. [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/tisk-a-media>
- [40] ČSN 73 1320 ČSN 73 1320 *Stanovení objemových změn betonu*. 10/1988
- [41] Torrent, R., Frenzer, G. *A Method for the Rapid Determination of the Coefficient of Permeability of the „Covercrete“*, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, 26.-29.09.1995, Germany, pp. 985-992
- [42] KOVALČÍKOVÁ, Hana. *Vliv změn v pórové struktuře betonu na aktuální trvanlivost ŽB a předpjatých konstrukcí*. Brno, 2011. 97 s., 22 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Adámek, CSc.
- [43] *Zmrazovací cyklus* [online]. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: http://www.ekofrost.cz/download/technicka_specifikace.pdf

Kapitola 11

Přílohy

Tabulka 11.1: Pevnost v tlaku po 7 dnech pro proměnný obsah gumy

Obsah gumy [kg/m^3]	Název vzorku	A1 [mm]	A2 [mm]	A3 [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Síla [kN]	Pevnost K100 [MPa]	Pevnost K150 [MPa]
0	REF	100,0	100,1	96,9	2249	2319	482,2	44,2	39,8
0	REF	101,0	100,0	99,1	2331	2330	421,6	42,1	37,9
0	REF	100,1	100,4	96,5	2228	2298	408,0	42,2	38,0
40	0/100	100,5	100,3	97,6	2240	2277	338,5	34,5	31,1
40	0/100	100,3	100,4	98,8	2224	2235	330,1	33,3	30,0
40	0/100	100,5	100,5	97,7	2202	2232	329,2	33,5	30,2
40	100/0	100,0	100,8	99,0	2218	2223	286,8	29,0	26,1
40	100/0	99,9	101,0	100,2	2220	2197	286,3	28,6	25,7
40	100/0	100,4	100,2	100,8	2241	2211	284,8	28,1	25,3
80	0/100	100,3	99,9	100,0	2181	2179	263,6	26,3	23,7
80	0/100	100,1	98,6	100,0	2125	2155	260,1	26,4	23,7
80	0/100	100,2	98,5	100,1	2150	2177	255,7	25,9	23,3
80	100/0	100,4	99,8	100,0	2116	2111	235,3	23,5	21,1
80	100/0	100,3	99,8	99,9	2119	2219	236,0	23,6	21,2
80	100/0	100,5	99,5	100,0	2146	2145	225,3	22,5	20,3
120	0/100	100,3	102,6	100,5	2212	2137	233,0	22,6	20,4
120	0/100	100,3	100,0	100,4	2172	2159	220,1	22,0	19,8
120	0/100	100,1	100,4	100,3	2139	2121	227,7	22,6	20,4
120	100/0	100,1	99,4	99,7	2076	2092	180,0	18,1	16,3
120	100/0	100,0	102,1	99,9	2144	2101	195,1	19,1	17,2
120	100/0	100,1	100,8	99,6	2102	2092	180,2	17,9	16,1

Tabulka 11.2: Pevnost v tlaku po 7 dnech pro obsah gumového recyklátu 40 kg/m^3

Název vzorku	Číslo vzorku	A1 [mm]	A2 [mm]	A3 [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Síla [kN]	Pevnost K100 [MPa]	Pevnost K150 [MPa]
REF	1	100,0	100,1	96,9	2249	2319	482,2	44,2	39,8
REF	2	101,0	100,0	99,1	2331	2330	421,6	42,1	37,9
REF	3	100,1	100,4	96,5	2228	2298	408,0	42,2	38,0
100/0	1	100,0	100,8	99,0	2218	2223	286,8	29,0	26,1
100/0	2	99,9	101,0	100,2	2220	2197	286,3	28,6	25,7
100/0	3	100,4	100,2	100,8	2241	2211	284,8	28,1	25,3
80/20	1	100,6	100,7	100,4	2285	2247	285,1	28,2	25,4
80/20	2	100,5	100,6	101,0	2283	2236	304,6	30,0	27,0
80/20	3	100,3	100,8	98,0	2238	2259	297,6	30,3	27,3
60/40	1	100,8	99,6	98,9	2181	2197	307,9	30,9	27,8
60/40	2	100,6	99,5	99,5	2224	2234	334,7	33,4	30,1
60/40	3	100,3	99,6	98,9	2181	2208	298,7	30,1	27,1
40/60	1	100,1	100,4	99,6	2219	2217	292,9	29,4	26,4
40/60	2	100,1	100,4	97,6	2175	2217	299,9	30,7	27,6
40/60	3	100,0	100,2	98,5	2215	2245	321,7	32,7	29,4
20/80	1	100,2	100,2	97,4	2179	2229	341,1	34,9	31,5
20/80	2	100,0	100,6	96,8	2144	2202	324,6	33,5	30,2
20/80	3	100,0	100,3	97,6	2153	2200	338,6	34,7	31,2
0/100	1	100,5	100,3	97,6	2240	2277	338,5	34,5	31,1
0/100	2	100,3	100,4	98,8	2224	2235	330,1	33,3	30,0
0/100	3	100,5	100,5	97,7	2202	2232	329,2	33,5	30,2

Tabulka 11.3: Pevnost v tlaku po 28 dnech pro obsah gumového recyklátu $40\text{kg}/\text{m}^3$

Název vzorku	Číslo vzorku	A1 [mm]	A2 [mm]	A3 [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
REF	1	149,8	146,5	149,6	7602	2315	1070,6	48,8
REF	2	149,8	150,0	149,4	7733	2305	1106,3	49,3
REF	3	149,5	146,8	149,6	7621	2322	1014,5	46,2
REF	4	149,3	146,2	149,3	7529	2310	1096,3	50,2
100/0	1	149,5	147,4	149,6	7287	2211	739,9	33,6
100/0	2	149,4	148,0	149,3	7273	2203	635,2	28,7
100/0	3	149,5	148,7	149,7	7368	2214	744,8	33,5
100/0	4	149,5	150,3	149,5	7424	2211	708,6	31,6
80/20	1	149,2	146,9	149,3	7304	2232	642,0	29,3
80/20	2	149,5	149,8	149,3	7520	2249	722,9	32,3
80/20	3	149,5	148,5	149,6	7516	2264	759,6	34,2
80/20	4	149,5	147,3	149,6	7403	2248	654,1	29,7
60/40	1	149,4	150,5	149,5	7469	2222	733,5	32,6
60/40	2	149,5	149,3	149,5	7377	2212	715,9	32,1
60/40	3	149,5	148,9	149,5	7370	2214	698,4	31,4
60/40	4	149,5	148,3	149,5	7394	2230	677,2	30,5
40/60	1	149,6	150,1	149,5	7498	2234	817,7	36,4
40/60	2	149,6	148,7	149,5	7395	2225	707,0	31,8
40/60	3	149,4	148,4	149,4	7405	2237	781,8	35,3
40/60	4	149,5	148,8	149,5	7420	2232	797,3	35,8
20/80	1	149,5	150,9	149,5	7394	2179	760,4	33,7
20/80	2	149,5	148,1	149,5	7273	2198	734,5	33,2
20/80	3	149,5	148,2	149,4	7276	2199	767,8	34,7
20/80	4	149,5	146,5	149,4	7176	2193	734,5	33,5
0/100	1	149,4	150,0	149,5	7420	2215	724,6	32,3
0/100	2	149,5	147,7	150,2	7328	2200	768,0	34,6
0/100	3	149,5	149,0	150,0	7478	2233	807,7	36,2
0/100	4	149,6	148,2	149,7	7428	2238	746,2	33,7

Tabulka 11.4: Pevnost v tlaku po 45 dnech pro obsah gumového recyklátu 40 kg/m^3

Název vzorku	Číslo vzorku	A1 [mm]	A2 [mm]	A3 [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
REF	1	149,7	149,7	145,9	7435	2274	1052,9	47,0
REF	2	149,6	149,8	149,3	7615	2276	1135,6	50,7
REF	3	149,4	149,6	148,0	7575	2290	1020,7	50,1
100/0	1	149,2	149,6	149,5	7135	2138	710,6	31,8
100/0	2	149,3	150,0	149,7	7165	2137	650,6	29,1
100/0	3	149,2	149,2	148,1	7050	2138	677,2	30,4
80/20	1	150,0	149,9	149,7	7325	2176	808,7	36,0
80/20	2	149,4	148,2	149,8	7260	2189	764,4	34,5
80/20	3	149,4	149,5	149,0	7295	2192	809,6	36,2
60/40	1	149,3	149,5	150,1	7405	2210	668,4	29,9
60/40	2	149,3	149,7	149,7	7285	2204	656,5	29,4
60/40	3	149,3	149,4	149,9	7380	2207	834,6	37,4
40/60	1	149,5	149,9	148,8	7498	2249	725,3	32,4
40/60	2	149,6	150,4	148,5	7395	2214	677,5	30,1
40/60	3	149,5	149,4	150,0	7405	2210	755,7	33,8
20/80	1	148,8	149,6	147,6	7313	2226	739,0	33,2
20/80	2	149,4	149,8	148,6	7367	2215	809,2	36,2
20/80	3	149,5	149,6	149,8	7458	2226	787,7	35,2
20/80	4	149,3	149,6	150,3	7430	2213	721,2	32,3
20/80	5	149,5	149,4	148,6	7373	2222	807,7	36,2
20/80	6	149,5	149,8	149,1	7392	2214	795,8	35,5
0/100	1	149,6	149,4	149,6	7396	2212	785,2	35,1
0/100	2	149,7	150,0	148,6	7405	2219	735,0	32,7
0/100	3	149,6	149,8	148,2	7297	2197	766,1	34,2

Tabulka 11.5: Pevnost v příčném tahu pro proměnné obsahy gumy

Obsah gumy [kg/m^3]	Název vzorku	Číslo vzorku	A1 [mm]	A2 [mm]	A3 [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
0	REF	1	149,8	153,6	149,3	7928	2308	86,5	3,8
0	REF	2	149,4	151,5	149,2	7840	2322	98,6	4,4
0	REF	3	149,5	153,9	149,2	7898	2301	89,3	3,9
40	0/100	1	149,8	150,9	149,2	7627	2261	82,1	3,6
40	0/100	2	149,4	149,6	149,3	7515	2252	60,4	2,7
40	0/100	3	149,7	150,3	149,3	7627	2271	60,5	2,7
40	100/0	1	149,6	152,0	149,3	7556	2226	62,3	2,7
40	100/0	2	149,3	148,9	149,1	7375	2225	62,4	2,8
40	100/0	3	149,8	151,9	149,2	7563	2228	61,7	2,7
80	0/100	1	149,6	151,6	149,4	7377	2177	70,0	3,1
80	0/100	2	149,1	153,1	148,8	7365	2168	45,5	2,0
80	0/100	3	149,7	152,8	149,3	7371	2158	70,3	3,1
80	100/0	1	149,9	151,5	149,3	7249	2138	63,0	2,8
80	100/0	2	149,4	149,2	149,4	7093	2130	52,8	2,4
80	100/0	3	149,5	154,8	149,3	7283	2108	45,2	2,0
120	0/100	1	149,7	152,0	149,2	7145	2105	48,4	2,1
120	0/100	2	149,4	152,2	149,2	7143	2105	49,3	2,2
120	0/100	3	149,4	147,9	149,2	6967	2114	42,9	1,9
120	100/0	1	149,4	152,1	149,0	6967	2058	47,8	2,1
120	100/0	2	149,2	153,4	149,2	7128	2088	43,7	1,9
120	100/0	3	149,4	154,4	149,2	7180	2086	37,4	1,6

Tabulka 11.6: Charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku po 7 dnech

Obsah gummy [kg/m^3]	Název vzorku	Číslo vzorku	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]	Směrodatná odchylka	Variační součinitel	k_n	Char. pevnost [MPa]
0	REF	1	39,7	38,6	1,047074	0,027152	3,37	35,0
0	REF	2	37,9					
0	REF	3	38,0					
40	0/100	1	31,1	30,4	0,577592	0,018998	3,37	28,5
40	0/100	2	30,0					
40	0/100	3	30,2					
40	100/0	1	26,1	25,7	0,37363	0,014532	3,37	24,5
40	100/0	2	25,7					
40	100/0	3	25,3					
80	0/100	1	23,7	23,6	0,222774	0,009446	3,37	22,8
80	0/100	2	23,7					
80	0/100	3	23,3					
80	100/0	1	21,1	20,9	0,519101	0,024877	3,37	19,1
80	100/0	2	21,2					
80	100/0	3	20,3					
120	0/100	1	20,4	20,2	0,348145	0,01726	3,37	19,0
120	0/100	2	19,8					
120	0/100	3	20,4					
120	100/0	1	16,3	16,5	0,589838	0,035719	3,37	14,5
120	100/0	2	17,2					
120	100/0	3	16,1					

Tabulka 11.7: Charakteristické hodnoty pevnosti v tlako po 28 dnech

Obsah gummy [kg/m^3]	Název vzorku	Číslo vzorku	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]	Směrodatná odchylka	Variační součinitel	k_n	Char. pevnost [MPa]
0	REF	1	48,8	48,6	1,699878	0,033853	2,63	44,3
0	REF	2	49,3					
0	REF	3	46,2					
0	REF	4	50,2					
40	0/100	1	32,3	34,2	1,616952	0,048045	2,63	29,9
40	0/100	2	34,6					
40	0/100	3	36,2					
40	0/100	4	33,7					
40	100/0	1	33,6	31,8	2,277547	0,072174	2,63	25,8
40	100/0	2	28,7					
40	100/0	3	33,5					
40	100/0	4	31,6					

Tabulka 11.8: Charakteristická pevnost v příčném tahu pro proměnné obsahy gumy

Obsah gumy [kg/m^3]	Název vzorku	Číslo vzorku	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]	Směrodatná odchylka	Variační součinitel	k_n	Char. pevnost [MPa]
0	REF	1	3,8					
0	REF	2	4,4	4,0	0,316649	0,079198	3,37	2,9
0	REF	3	3,9					
40	0/100	1	3,6					
40	0/100	2	2,7	3,0	0,538941	0,179148	3,37	1,2
40	0/100	3	2,7					
40	100/0	1	2,7					
40	100/0	2	2,8	2,7	0,049435	0,017965	3,37	2,6
40	100/0	3	2,7					
80	0/100	1	3,1					
80	0/100	2	2,0	2,7	0,0,409658	0,173129	3,37	0,6
80	0/100	3	3,1					
80	100/0	1	2,8					
80	100/0	2	2,4	2,4	0,409658	0,173129	3,37	1,0
80	100/0	3	2,0					
120	0/100	1	2,1					
120	0/100	2	2,2	2,1	0,121734	0,058557	3,37	1,7
120	0/100	3	1,9					
120	100/0	1	2,1					
120	100/0	2	1,9	1,9	0,241626	0,128637	3,37	1,1
120	100/0	3	1,6					