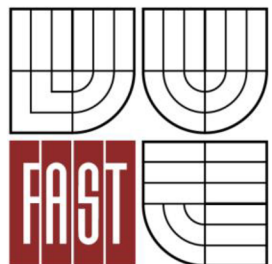


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

OPTIMALIZACE SLOŽENÍ BETONŮ S VYUŽITÍM PLNIV Z RECYKLOVANÝCH BETONŮ

OPTIMIZATION OF THE CONCRETE COMPOSITION WITH THE USE OF RECYCLED
CONCRETE AGGREGATES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. EVA SKRIŇÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Eva Skriňáková
Název	Optimalizace složení betonů s využitím plniv z recyklovaných betonů
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2014

Zásady pro vypracování

Diplomová práce bude zaměřena na studium vlivu kvality kameniv vyrobených recyklací starých betonů, zejména z cementobetonových krytů vozovek. Současné výzkumy potvrzují možnosti jejich plnohodnotného využívání i do konstrukčních betonů. Optimalizací složení s využitím mikro či nano příměsí může dojít k pozitivnímu ovlivnění kvality tranzitní zrna mezi zrna plniva. Tímto lze zredukovat vyšší nasákavost recyklovaných plniv.

V teoretické části práce proveďte shrnutí současných poznatků z problematiky využívání betonových recyklátů hlavně v dopravních stavbách a možnému spojení těchto plniv s jemnozrnnými příměsemi. Včetně optimalizace křivek zrnitosti pojiv a příměsí v oblasti do 0,25 mm.

V praktické části ověřte možnosti náhrady hrubého přírodního kameniva betonovým recyklátem. Jako recyklát použijte betony z bourání CB krytů z dálnice D1. Proveďte komplexní otestování vlastností recyklátu.

Navrhněte recepturu referenční směsi tříd C25/30 až C30/37, i pro prostředí XF, případně KSC. Dále navrhněte tytéž receptury s recyklátem a vhodnou kombinací mikropříměsí. Na těchto ověřte mechanické vlastnosti ve stáří 28 a 60 dnů, případně trvanlivost při působení mrazu a CHRL. Na vybraných vzorcích proveďte posouzení mikrostruktury.

Rozsah práce minimálně 70 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Betón ako stavebný materiál podlieha neustálej inovácii a vďaka pokrokovým technológiám a množstvám výskumov sa jeho vlastnosti stále vylepšujú. Je logické, že čím viac betónu vyrobíme, tým viac odpadu z neho vznikne. Objem tohto odpadu nie je možné donekonečna ukladať na depónie, preto sa v súčasnosti väčšina odpadových hospodárstiev na svete snaží o recykláciu betónovej sute. Samotná recyklácia nie je až takým problémom, táto technológia je už dlhšiu dobu overená, avšak kvalita recyklátu je nesporne jedným z primárnych predpokladov k dosiahnutiu požadovaných vlastností betónu. Proces recyklovania je v podstate „rozbíjanie“ betónu na čiastôčky, so snahou eliminovať cementový tmel na povrchu kameniva. Ideálnym prípadom by bolo vytvoriť povlak dostatočne odolný a pevný na povrchu recyklátu, ktorý by dokonale prilnul k cementovej matici. Táto diplomová práca je zameraná na vlastnosti betónových recyklátov a spôsoby ich vylepšenia, ako aj optimalizáciu zloženia betónovej zmesi s využitím týchto plnív.

Kľúčové slová

kamenivo z recyklovaného betónu, betón, vylepšovanie, prímiesm, mikromletý vápenec, vysokopecná troska, mikrosilika, recyklácia, tranzitná zóna, prírodné kamenivo

Abstract

Concrete as a building material is subject to continuous innovation and thanks to advanced technology and quantum of research, its properties are still improved. It is logical that the more concrete we produce, the more waste it arises. The volume of this waste can not be stored in landfills endlessly, nowadays most of the waste economies in the world are trying to recycle concrete rubble. The recycling is not such a problem, the technology has been long verified but the quality of the recycled concrete aggregate is unquestionably one of the primary assumption which leads to accomplish required properties of concrete. In fact, the recycling process is „crushing“ the concrete into particles with an effort to eliminate the cement paste on the surface of the aggregate. An ideal solution would be create a resistant and firm coating that would adhere perfectly to the cement matrix. This diploma thesis is focused on the properties of recycled concrete aggregate and methods of improvement and optimization of the concrete mix composition.

Key words

recycled concrete aggregate, concrete, improving, addition, limestone powder, blast furnace slag, silica fume, recycling, interfacial transition zone, natural aggregate

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Eva Skriňáková *Optimalizace složení betonů s využitím plniv z recyklovaných betonů*. Brno, 2015. 89 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prehlásenie:

Prehlasujem, že som diplomovú prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 15. 1. 2016

.....
podpis autora
Bc. Eva Skriňáková

Pod'akovanie

Ďakujem prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. za jeho odborný dohľad pri spracovaní tejto diplomovej práce a celkovo za čas a pomoc, ktoré mi počas troch rokov ako vedúci oboch mojich záverečných prác venoval. Chcem poďakovať zamestnancom laboratórií Ústavu THD FAST VUT v Brně, ktorí mi pomohli s praktickou časťou a jedno veľké ďakujem patrí mojim najbližším za lásku, podporu a dôveru počas celého štúdia.

Bc. Eva Skriňáková

Obsah

Úvod	11
I. Teoretická časť	12
1 Potreba betónu v stavebníctve	12
2 Prímеси	13
2.1 Mikrosilika	14
2.1.1 Spojenie mikrosiliky a betónového recyklátu	15
2.2 Mikromletý vápenec	15
2.2.1 Spojenie mletého vápenca a betónového recyklátu	15
2.3 Vysokopecná troska	15
2.3.1 Spojenie vysokopecnej trosky a betónového recyklátu	15
3 Stavebný odpad	16
3.1 Recyklácia stavebného odpadu	16
4 Problematika využitia betónového recyklátu	18
4.1 Betónový recyklát v dopravných stavbách	18
4.2 Krivka zrnitosti recyklovaného kameniva pre podkladné vrstvy CB krytov	20
4.3 Krivka zrnitosti pojív a prímеси	21
5 Mikroštruktúra betónu	22
6 Možnosti zlepšenia vlastností recyklovaných kamenív z betónu	25
6.1 Metódy ošetrenia betónového recyklátu	25
6.1.1 Termická metóda	25
6.1.2 Mechanická metóda	26
6.1.3 Termicko-mechanická metóda	26
6.1.4 Metóda ponárania do kyseliny	27
6.1.5 Chemicko-mechanická metóda	27
6.1.6 Mikrovlnná metóda	27
6.1.7 Metóda dvojfázového miešania	28
II. Experimentálna časť	31
1 Cieľ	31
2 Metodika	31
3 Legislatíva	32
4 Použité suroviny	33
4.1 Kamenivo	33
4.1.1 Granulometria	34
4.1.2 Objemová hmotnosť a nasiakavosť kamenív	37

4.1.3	Obsah síranov a chloridov	39
4.2	Cement	40
4.3	Voda.....	40
4.4	Prísady	40
4.5	Prímesi	40
5	Čerstvý betón.....	42
5.1	Označenie receptúr	42
5.2	Receptúry	43
5.3	Zhutnenie, uloženie a ošetrovanie skúšobných telies	46
5.4	Konzistencia.....	46
5.5	Objemová hmotnosť čerstvého betónu	48
5.6	Vyhodnotenie výsledkov	49
6	Zatvrdlý betón	50
6.1	Objemová hmotnosť zatvrdlého betónu a pevnosti v tlaku	50
6.2	Mrazuvzdornosť	52
6.3	Mikroštruktúra	53
6.4	Metóda párového porovnania - Fullerov trojuholník.....	59
6.4.1	Postup výpočtu	59
6.4.2	Receptúra C 25/30	61
6.4.3	Receptúra C 30/37	63
6.5	Rozbor zloženia receptúr z ekonomického hľadiska	66
6.6	Vyhodnotenie výsledkov	67
	Záver	68
	Zoznam použitých zdrojov	71
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	76
	Zoznam tabuliek	77
	Zoznam obrázkov	78
	Zoznam grafov.....	80
	Príloha č. 1 - Protokol o chemickom rozbere recyklátu Velká Bíteš	81

Úvod

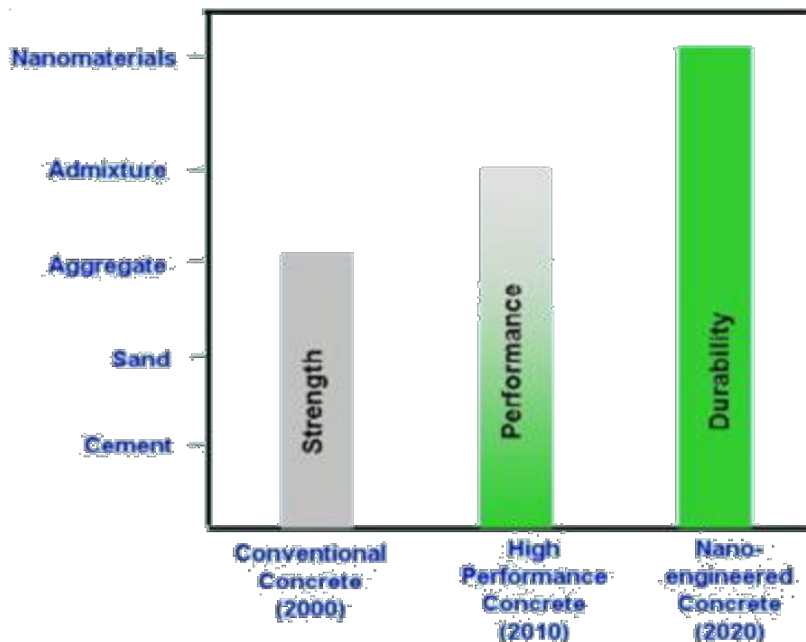
Rozmach stavebného priemyslu je v súčasnosti úplne iný, ako tomu bývalo. V minulosti sa značne rozširovali mestá vznikom progresívnych obytných domov, tzv. panelákov. Základom bola rýchla výstavba, ktorú tieto konštrukcie umožňovali. V súčasnosti sa prioritou stavebníctva stal trvale udržateľný rozvoj. Tento pojem spája sociálne, ekonomické a enviromentálne aspekty, čím vytvára akúsi kompromisnú cestu v ďalšom rozvoji nie len stavebného, ale všetkých odvetví priemyslu. Práve z hľadiska udržateľnosti sa stále do popredia dostávajú nové stavebné materiály, ktoré sú zakomponované do vopred komplexne premyslených konštrukcií z pohľadu ekologického, energetického a užívateľského. Neustále napredovanie však nemôže byť nekonečné, je s ním spojená aj likvidácia. Materiál stráca svoju životnosť a vzniká potreba efektívneho spracovania vzniknutého odpadu. Táto práca sa zaoberá práve znovupoužitím recyklovaných betónov ako plniva do konštrukčných betónov. V súčasnosti existuje dostatočné množstvo výskumov, ktoré potvrdilo používanie tejto alternatívnej suroviny.

Ciele tejto práce sú rozdelené do dvoch častí. Prvou je teoretická časť so stručným rozborom prímiesí, ktoré boli použité v experimentálnej časti. Pozornosť je venovaná aj objasneniu problematiky recyklátov, ich mikroštruktúre v betóne a metódam ošetrovania povrchu kameňa od cementového tmelu. Druhá je praktická časť, ktorá má za úlohu prezentovať výsledky základných skúšok recyklátov a návrhy rôznych druhov receptúr. Na záver je uvedená jednoduchá kalkulácia použitých materiálov a zhodnotenie najoptimálnejšej varianty s ohľadom na dosiahnuté výsledky.

I. Teoretická časť

1 Potreba betónu v stavebníctve

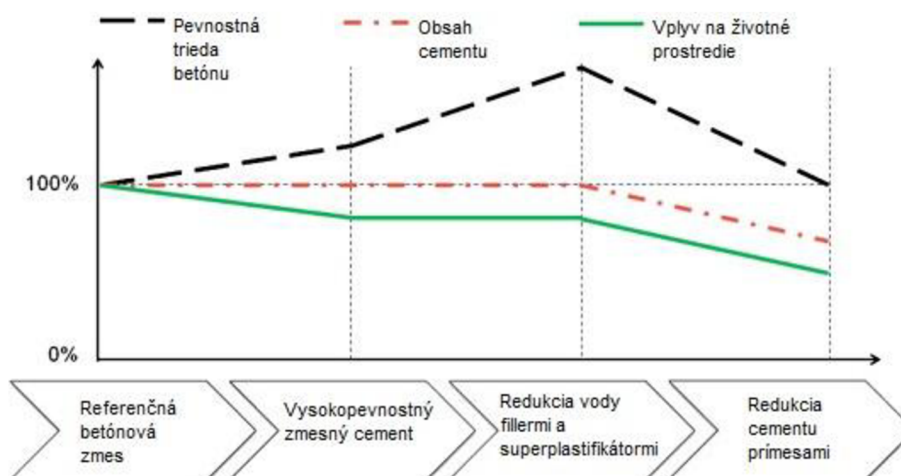
Betón je kompozitný materiál, tradične pozostávajúci z pojiva, plniva, vody, prípadne aj z prímiesí a prísad. Z týchto zložiek je najobsiahlejšie plnivo, teda kamenivo, ktoré zaberá približne 70 % z celkového objemu betónu. Ročne sa spotrebuje cca 20 miliárd tón hrubého prírodného kameniva. Postupom času sa však do základného zloženia pridávajú nové materiály a dochádza k vývoji od iba únosného betónu cez vysokohodnotný až po odolný betón s využitím nanotechnológie (graf 1). Betón sa stal najpoužívanejším materiálom v stavebníctve a je od neho závislá veľká časť stavebných konštrukcií. Jeho univerzálnosť spočíva vo vysokej pevnosti, tvarovej variabilite, pomerne nízkych nákladoch na údržbu, odolnosti voči poveternostným vplyvom a v neposlednom rade ekonomický parameter oproti iným konštrukčným materiálom. Rozsiahly nárast priemyslu a urbanizácie v dôsledku paralelného rastu hospodárstva a populácie spôsobilo, že betón sa stal aj najviac neudržateľným materiálom, pretože spotrebuje veľké množstvo prírodných zdrojov. Vzhľadom k veľkosti objemu používania betónu sa stal nepostrádateľnou súčasťou rozvoja krajín. [27]



Graf 1: Vývoj technológie betónu 2000-2020 [19]

2 Prímеси

Táto kapitola slúži ako stručný prehľad doposiaľ získaných teoretických poznatkov o jemnozrnných prímесиach, ktoré budú použité v praktickej časti tejto diplomovej práce. Nie však každý jemnozrnný materiál je prímесou, preto obecnе prímеси do betónu môžeme definovať ako prevážne práškové anorganické alebo organické minerálne látky o veľkosti častíc do 63 μm , získané mechanickou cestou z prírodných alebo umelých kamenív, ktoré môžu priaznivo ovplyvniť vlastnosti čerstvého alebo zatvrdnutého betónu. Vývin počiatočných pevností býva spomalený, ale naopak dlhodobé pevnosti sú vyššie. Na rozdiel od chemických prísad, minerálne prímеси sa dávajú v pomerne veľkých množstvách, väčšinou od 5 do 50 % z objemu cementu. Slúžia ako náhrada cementu alebo ako filler. V minulosti sa používali prírodné zdroje pucolánov, napr. sopečný popol, tufy, íly, bridlice na stavbu vodovodov, vodných nádrží a rôznych pamiatok. V posledných rokoch však výskumy umožňujú využitie odpadných materiálov ako popolček, troska, kremičitý úlet, červený kal a popol z ryžových šupiek, čo kladne pôsobí na spotrebu odpadov a tým zlepšenie ekonomického a enviromentálneho hľadiska. V grafe č. 2 môžeme vidieť vplyv prímесí na betónovú zmes a ich dopad na životné prostredie. [18][28][29][44]



Graf 2: Eco-friendly betón [45]

ČSN EN 206 rozdeľuje aditíva na dva druhy:

- typu I** - takmer inertná prímес

Majú funkciu vyplniť (fyzikálne) prázdny priestor medzi hrubšími zrnami, ktoré by inak boli pokryté vodou, nezúčastňujú sa hydratačných procesov. Dotvárajú cementový tmel, ktorý obaluje kamenivo aj výstuž. Pozitívne vplyvajú na zníženie hydratačného tepla, zlepšenie čerateľnosti a hutnosti, prídržnosti k podkladu a

vodotesnosti. Zástupcami týchto prímiesí sú najmä mikromletý vápenec, kamenné odprašky (filler) a anorganické farebné pigmenty. [28][29][30]

b) **typu II** - pucolánová alebo latentne hydraulická prímies

Na rozdiel od prvého typu majú nie len fyzikálnu funkciu ale aj chemickú. Výsledkom ich reakcie je tvorba nových materiálov, čím znižujú porozitu matrice a zlepšujú tranzitné zóny. Tieto prímiesi majú rôzny význam, ktorý je predurčený mineralogickým a chemickým zložením, obsahom reaktívnych zložiek, porozitou a merným povrchom. Obsahujú vysoký podiel aktívneho SiO_2 . Používanie týchto prímiesí prináša výhody ekologicko-ekonomické. Predovšetkým znižujú cenu betónu, omeďujú emisie CO_2 , znižujú množstvo vyvinutého tepla, zlepšujú mechanické vlastnosti, upravujú zmrštenie, permeabilitu a zvyšujú odolnosť voči chemikáliám. Druhý typ prímiesí zahŕňa aj dve rôzne látky.

Latentne hydraulické látky sú také, ktoré po zmiešaní s vodou netvrdnú a nedosahujú väznosti. Až použitím aktivačnej prísady, ktorá je obsiahnutá v portlandskom cemente sa z nich stávajú hydraulické látky. Príkladom je vysokopečná troska.

Pucolány sú látky na bázi amorfného SiO_2 alebo Al_2O_3 , ktoré po zmiešaní s vodou netuhnú, netvrdnú a nevykazujú pevnosti ani po zmiešaní s aktivačnou prísadou. Až v styku s vodou sú schopné reakcie s vápennými iónmi Ca^{2+} , čím tvoria hydratačné sploďiny, ktoré sú chemicky a mineralogicky obdobné ako hydratačné sploďiny portlandského cementu, akurát táto reakcia je pomalšia. Jedná sa o prímiesi ako elektrárenský popolček, tehelný prach a kremičitý úlet. [28][29][30]

2.1 Mikrosilika

Mikrosilika je ultra jemný materiál (kremičitý úlet) na bázi SiO_2 . Kremičité odprašky vznikajú ako vedľajší produkt pri výrobe kremíku, ferrosilicia a ďalších zliatin kremíku. Jedná sa o veľmi jemný sivý (niekedy sivobiely či čiernosivý) prášok zložený predovšetkým z amorfného oxidu kremičitého. Obsah SiO_2 sa zpravidla pohybuje v rozmedzí 80 až 98 %. Pri výrobe ferrosilicia sú prítomné často aj iné prvky, najmä železo. Častice sú sférické, vyznačujú sa priemerom najčastejšie okolo $0,15 \mu\text{m}$ a často tvoria zhľuky. Mikrosilika v betóne zlepšuje reologické vlastnosti. Na jeho spracovateľnosť má vplyv veľký merný povrch, ktorý zvyšuje potrebu zámesovej vody. Ideálne dávkovanie je do 10 % z hmotnosti cementu. Pri zvýšenej dávke sú vlastnosti betónu ovplyvnené skôr negatívne. [32][34]

2.1.1 Spojenie mikrosiliky a betónového recyklátu

- Zvyšuje pevnosti v tlaku a ťahu za ohybu betónu [34][35][41]
- Zhutňuje štruktúru betónu [34]
- Vplýva na krátkodobé aj dlhodobé vlastnosti betónu [33]
- Zlepšuje mechanickú odolnosť betónu [33]
- Priaznivo ovplyvňuje tranzitnú zónu [35][37]

2.2 Mikromletý vápenec

Proces vzniku mletého vápenca je ťažba CaCO_3 , pranie, plavenie, flotácia, elektrická separácia, mletie a triedenie. Vápenec musí mať aspoň 75 % CaCO_3 . Táto inertná prímes môže mať charakter aktívnej prímеси, používa sa ako prímes do zmesných cementov alebo ako samostatná betónová prímes. Zlepšuje spracovateľnosť a čerpatelnosť betónu a znižuje hydratačné teplo. Zaujímavosťou je použitie recyklovaného mletého vápenca do 8 % náhrady cementu bez ovplyvnenia vlastností betónu. [38]

2.2.1 Spojenie mletého vápenca a betónového recyklátu

- Tvorí povlak na povrchu recyklátu, čím zaplňuje mikrotrhliny v zbytkovej malte [37]
- V asfaltových zmesiach betónový recyklát a mletý vápenec zlepšujú odolnosť proti trvalej deformácii [39]

2.3 Vysokopecná troska

Vysokopecná troska je odpadný produkt pri výrobe surového železa vo vysokej peci. Vzniká reakciou vápenca s SiO_2 a Al_2O_3 , ktoré pochádzajú z rudy alebo koksu. Prudkým ochladením taveniny pod 800 °C sa zabráni kryštalizácii a stabilizuje sa jej sklovitý charakter. Veľkosti častíc a chemizmus má podobné ako má portlandský cement, jej výhodami oproti nemu sú ekologické a ekonomické faktory. Ideálna dávka je okolo 50 % hmotnosti cementu. [28][33]

2.3.1 Spojenie vysokopecnej trosky a betónového recyklátu

- Zvyšuje odolnosť voči chloridom [33]
- Vplýva po pomerne dlhej dobe vytvrdzovania betónu [33]
- Zlepšuje odolnosť recyklátu [33]
- Nízke počiatkové pevnosti v tlaku aj ťahu za ohybu [33][35]
- Spolu s popolčekom zmierňuje postup korózie výstuže [33][34]
- Struska a prach z recyklátu má kladný vplyv na samozhutňovacie betóny [36]

3 Stavebný odpad

S potrebou betónu v stavebnom priemysle lineárne narastá aj objem betónu, ktorý prestáva plniť svoju funkciu - odpad. Stavebný odpad, má významný podiel na celkovom množstve odpadu v spoločnosti. Podľa odborných odhadov pripadá na jedného obyvateľa viac ako 0,6 až 1,0 tón stavebného odpadu ročne. Stavebníctvo zaťažuje životné prostredie výrobou stavebných hmôt (výroba je náročná na spotrebu energie a ťažbu prírodných surovín), dopravnou náročnosťou (dopravované materiály a celé stavby majú značnú hmotnosť), lokálne a krátkodobo vlastným staveniskom (hlučnosťou, prašnosťou, stavebným odpadom) a dlhodobo užívaním budov. Súčasne je stavebníctvo schopné odľahčovať životné prostredie, a to predovšetkým schopnosťou spotrebúvať priemyselný a stavebný odpad ako náhradu prírodných surovín. Pri výstavbe alebo rekonštrukcii vzniká stavebný odpad, ktorý je môže byť znovupoužiteľný. Podľa kvality takto získaných materiálov, spôsobu odstraňovania starých konštrukcií, možností spracovania je možné takýto materiál použiť do rôznych nových konštrukčných vrstiev a na rôzne účely. Odkladanie takéhoto materiálu na skládky je vždy finančne náročnejšie ako jeho znovupoužitie. Najmä v súvislosti s opravami porušených ciest a demolíciami je potrebné odstraňovať materiály a tieto potom ďalej po vhodnej úprave využívať. [1]

3.1 Recyklácia stavebného odpadu

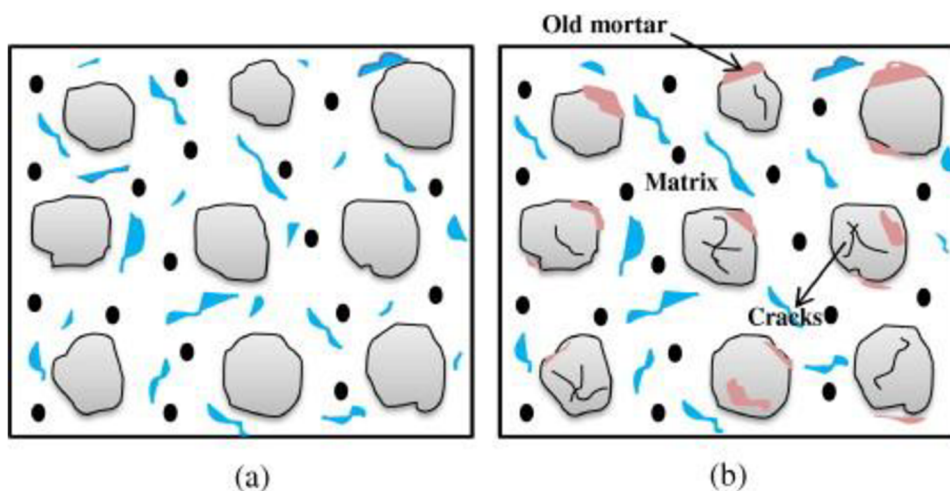
Recyklovanie umožňuje zachovávať prírodné materiály a minimalizovať tak využívanie prírodných zdrojov vo výstavbe. Každý nový materiál musí spĺňať určité technické, environmentálne a ekonomické kritériá. Inými slovami, odpadový materiál sa stane prijateľnou náhradou prírodných materiálov iba vtedy, ak jeho úžitkové vlastnosti nebudú horšie alebo budú len mierne horšie, ako vlastnosti prírodných materiálov a keď nebude mať výraznejší environmentálny alebo ekonomický vplyv. Značným problémom je tiež zdravie pracovníkov a bezpečnosť. Pred tým, ako sa použije nový odpadový materiál, treba ho overiť počas istého obdobia, aby sa zistila jeho kvalita a spoľahlivosť. Rozhodujúcim krokom pri získavaní recyklátu je spôsob vybratia konštrukčného prvku zo stavby a úroveň separácie a triedenia získaných materiálov priamo na stavbe. Z kvalitatívneho hľadiska sa uvedenými postupmi získa recyklát, ktorý bude mať vždy heterogénne zloženie, a tým aj rozličné vlastnosti. Miera reálneho využitia recyklátu je významne ovplyvnená aj úrovňou jeho separácie a osobitného uskladňovania priamo na mieste demolácie, či obnovy stavebného objektu a následného odvozu separovaného materiálu na určené skládky pri

recyklačných linkách. Stavebné materiály, ktoré bude možné opätovne využiť (vždy treba zväžiť potrebu expertízneho posúdenia), sa pri separácii ukladajú osobitne a odvážajú sa na určené skládky materiálov vhodných na opätovné zužitkovanie na výstavbu nových stavebných konštrukcií a prvkov. Separácia zvyškov stavebných výrobkov musí byť zameraná na získanie čo najhomogénnejších materiálov z hľadiska ich druhu a tvaru, aby bolo možné ich v čo najväčšom objeme odvážať na skládky pri recyklačných linkách (lepšie priamo na skládky stavebných materiálov, vhodných na ich opätovné použitie). Stanovenie základných fyzikálnych vlastností a chemického zloženia by malo byť vždy prvoradé na posúdenie vhodnosti odpadu na určité použitie. V súčasnosti vystupuje do popredia problematika životného cyklu stavby, ako konečného stavebného výrobku a environmentálne hľadisko. Tieto pozitívne environmentálne dopady zužitia recyklátu sú zjavné najmä z hľadiska trvalo udržateľného rozvoja a sú prioritnou celospoločenskou požiadavkou. Toto by z pohľadu udržania kvalitného životného prostredia malo byť podriadené a prípadná ekonomická nevýhodnosť použitia odpadu v určitej technológii by mala byť kompenzovaná prostredníctvom ekonomických nástrojov štátu. Súčasný stav recyklácie u nás stále nezodpovedá naliehavosti problému. V krajinách EÚ je rozsah recyklácie viac ako dvojnásobný. Technológie spracovania surovín sú často nedostatočné z dôvodu nedocenenia ekologického prínosu zo strany samospráv a štátu. Stále je skladovanie materiálu často lacnejšie, ako jeho opätovné použitie. Ak zoberieme do úvahy, že vlastnosti recyklátu sú napriek moderným postupom a riadeniu kvality v porovnaní s primárnymi materiálmi všeobecne horšie, je veľmi ťažké nájsť pre recyklované materiály odbyť. Recyklát je potom z tohto dôvodu často spracovávaný menej kvalitne, s ohľadom na najnižšiu možnú cenu a väčšinou potom končí ako podradný materiál. Využívanie takýchto materiálov navyše komplikuje stav, že nie sú k dispozícii technické normy, ktoré by uvádzali požiadavky na vlastnosti materiálu a posudzovali by jeho kvalitu. [1]

4 Problematika využitia betónového recyklátu

Bolo preukázané, že kamenivo z recyklovaného betónu (RCA) sa skladá z 65-70 % prírodného kameniva (NA) a z 30-35 % starej cementovej malty (CM). Práve vďaka tejto malte má recyklát horšie vlastnosti ako prírodné kamenivo. Výsledkom toho je, že recyklované kamenivá majú nehomogénne vlastnosti, hlavne nižšiu objemovú hmotnosť a zvýšenú porozitu, dôsledkom čoho je nárast nasiakavosti materiálu. Bežne používané prírodné kamenivo na stavebné účely má objemovú hmotnosť okolo $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a nasiakavosť cca 1 %, kdežto RCA má objemovú hmotnosť okolo $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a nasiakavosť do 15 %. Každé recyklované kamenivo má iné vlastnosti vďaka materskému betónu, z ktorého pochádza. Je zrejmé, že vysokohodnotné betóny, ktoré boli pripravené s nízkym vodným súčiniteľom a s použitím rôznych aditív majú vyššiu objemovú hmotnosť a sú menej pórovité ako bežne pripravené betóny s vyšším pomerom vody k cementu. [2][21]

Nasledujúci obrázok č. 1 ukazuje schematicky rozdiely medzi betónom s prírodným kamenivom (NAC) a betónom s betónovým recyklátom (RAC).

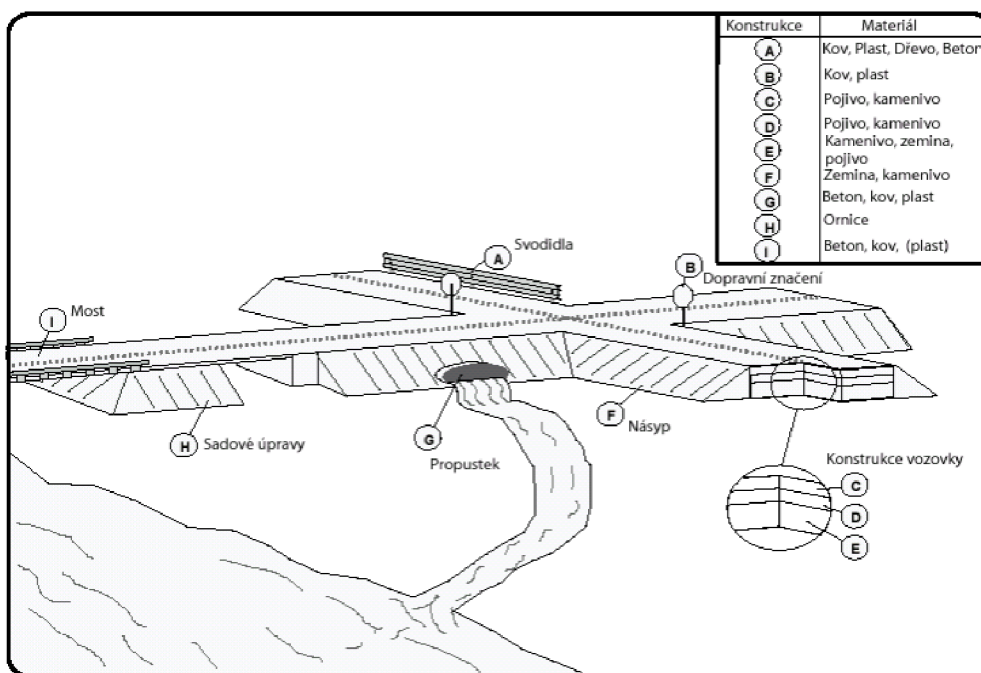


Obrázok 1: Rozdiel medzi prírodným a recyklovaným kamenivom v betóne [21]

4.1 Betónový recyklát v dopravných stavbách

Na úvod tejto kapitoly by som chcela zmieniť, že využívanie RCA stále nie je v praxi osvojené. Všetky tieto teoretické poznatky sú veľmi často prehliadané a použitie recyklátu je skôr raritnou záležitosťou. Z vlastnej pracovnej skúsenosti môžem povedať, že to nie je tak jednoduché ako sa zdá, ešte stále nevieme nakladať s týmto materiálom tak, ako napríklad v USA alebo Japonsku a to z viacerých dôvodov - nehomogenita materiálu, dostatok prírodných surovín, slabá legislatívna podpora a v neposlednom rade nechota pracovať s „menej kvalitnou“ surovinou za cenu rizika, že by sa produkt nepredal. Je

pravdou, že betón s RCA nemá rovnakú kvalitu ako s NA (napr. znížený modul pružnosti, zvýšené zmrštenie, vyššia potreba zámesovej vody, nižšie pevnosti), ale prináša aj radu výhod (priaznivý vplyv na životné prostredie, pretože šetrí prírodné zdroje, znižuje množstvo odpadu na skládkach a finančné prostriedky na palivo pre ťažobné a dopravné stroje). Napriek všetkému existujú recyklačné linky a firmy zaoberajúce sa recykláciou sute a tento recyklovaný produkt predávajú. Je otázne, či sa im tento biznis vyplatí, no dosahujú pomerne zvýšený odpyt v dopravných stavbách. Na výstavbu jedného kilometru diaľnice je potrebných cca 30 000 tón kameniva a 1 km železničnej trate 60 000 tón. Toto množstvo by mohlo byť do istej miery nahradené recyklovaným kamenivom. Pre každú aplikáciu tohto materiálu je potrebné zhotoviť aktuálne atesty. Názorné zobrazenie využitia stavebných materiálov v pozemných komunikáciách je na obr. 2. [10][31]



Obrázok 2: Schéma využívania stavebných materiálov v pozemných komunikáciách [26]

Využívanie RCA v dopravných stavbách:

- v stavebníctve na spevňovanie a stabilizáciu plošných podkladných vrstiev
- ako úprava lesných, poľných ciest mechanickou stabilizáciou
- vstupný materiál na betonárku na výrobu betónu nižších pevnostných tried
- opätovné použitie železničného kameniva do koľajového lôžka tratí [22]

Použitie RCA podľa frakcie:

1) Recyklát betónový 0-4, 0-8 mm (podsitná frakcia)

Materiál je svojimi vlastnosťami veľmi vhodný pre použitie do násypov telesa

komunikácie, k zásypom inžinierských sietí, obsypom kabelov, vodovodov, kanalizačných tokov. Materiál je dobre zhutniteľný na maximálnu objemovú hmotnosť pri vlhkosti blízkej optimálnej vlhkosti podľa ČSN 72 1006. [25]

2) *Recyklát betónový 4-32, 8-32, 8-50 mm (stredná frakcia)*

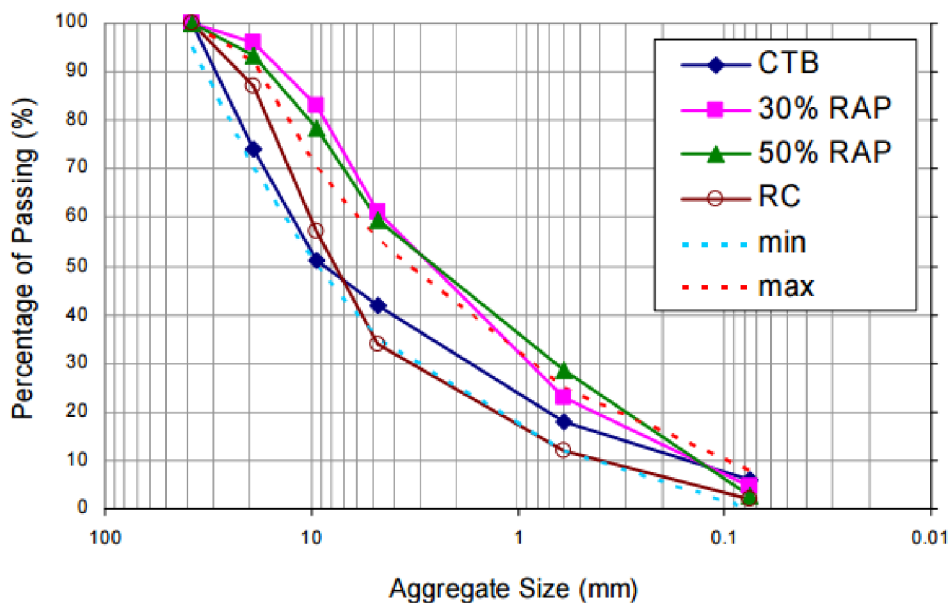
Stredná frakcia betónového recyklátu nachádza svoje uplatnenie ako náhrada štrku pri vytváraní podkladových a podsypových vrstiev, u ktorých je vyžadovaná vyššia pevnosť než pre štandardný suťový recyklát. [25]

3) *Recyklát betónový 32-64, 50-64 mm (nadsitná frakcia)*

Tento produkt je vhodný pre použitie ako umelé kamenivo pri vytváraní podkladových vrstiev komunikácií s väčšou záťažou než dovoľuje recyklát vytváraný zo zmesnej stavebnej sute. [25]

4.2 Krivka zrnitosti recyklovaného kameniva pre podkladné vrstvy CB krytov

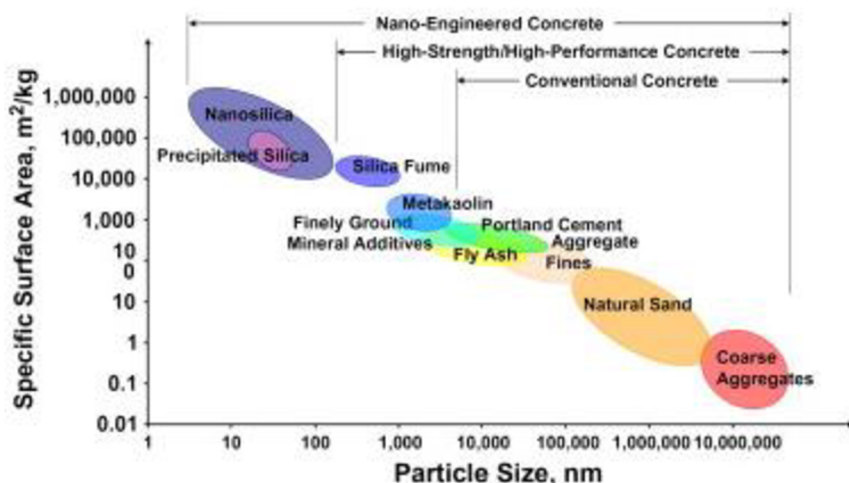
Recyklované kamenivo z betónu má všeobecne horšiu krivku zrnitosti ako prírodné kamenivo. Výsledný produkt drtenia má vždy iný pomer hrubej a drobnej frakcie, čo je zapríčinené kvalitou recyklátu a typom drtiaceho zariadenia. Obecne obsahuje RCA viac drobnej frakcie, ktorej vlastnosti majú významný vplyv na pevnosti v tlaku a modul pružnosti betónu. Povrch recyklátu je drsnejší a nepravidelný, väčšinou so zaoblenými hranami vďaka zostatkovej malte. Môže byť kontaminovaný organickými a anorganickými nečistotami ako textílie, polyméry, alkálie, hlinitanový cement, bahno, íly, sírany, chloridy a prach. Recyklované kamenivo z betónu sa do konštrukčných aplikácií veľmi nepoužíva. Je to z dôvodu zvýšeného obsahu cementového kameňa, ktorý spôsobuje nehomogénne vlastnosti betónu. Ak už sa využíva, tak do 20% náhrady prírodného kameniva a iba pre nekonštrukčné betóny. Hrubé recyklované kamenivo môže nahradiť prírodné v plnom rozsahu, avšak výsledné pevnosti nedosahujú požadovaných hodnôt. Niekoľko štúdií uvádza, že max. 30% náhrada vôbec nezmení vlastnosti betónu s recyklátom. Zrnitosť kameniva pre aplikáciu vo vrstvách vozovky môžeme vidieť v grafe č. 3. Svetlo modrá a červená čiarková čiara sú limitné ohraničenia optimálnej krivky zrnitosti pre frakcie recyklovaného kameniva podľa ASTM D 2940-03. Hnedou farbou je uvedený príklad zrnitosti betónového recyklátu. [21][42][43]



Graf 3: Limity optimálnej krivky zrnitosti recyklovaného kameniva - ASTM D 2940-03 [42]

4.3 Krivka zrnitosti pojív a prímiesí

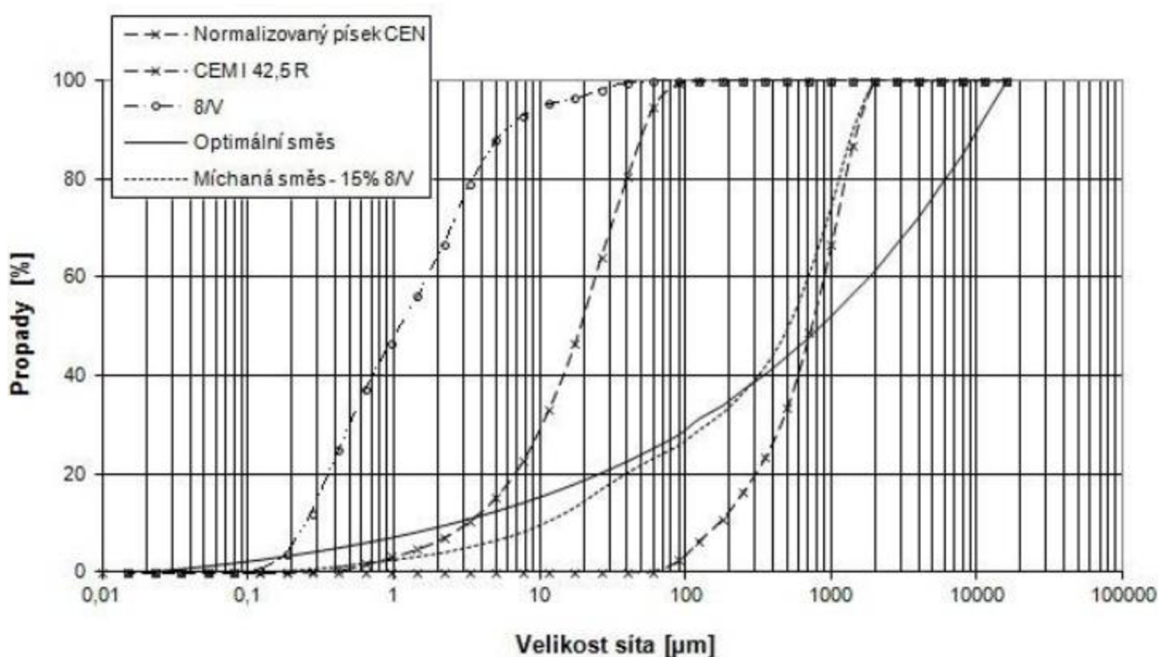
To čo predurčuje lepšie dosahované výsledky betónu sú práve najmenšie častice - cement a prímiesi. Krivka zrnitosti plniva a pojiva by mala byť plynulá a obsiahnutá čo najdokonalejšie, tzn. aby vytvorila hutnú štruktúru betónu. Dôležitý je aj tvar zrn, ktorý by mal byť sférický. Graf č. 4 ukazuje závislosť merného povrchu od veľkosti častíc komponent betónu a ich obsah v jednotlivých druhoch betónu. [21][45]



Graf 4: Zrnitosť a merný povrch betónových komponent[24]

Krivky zrnitosti materiálov použitých na výrobu betónu majú dominantný vplyv na medzerovitosť cementovej matrice a na hydratačný proces cementu. Určenie krivky zrnitosti je možné pomocou rôznych metód. Okrem sitového rozboru, môžeme určiť zrnitosť sedimentáciou vo vhodnej kvapaline alebo difrakciou svetla. Sitový rozbor je

najpoužívanejšou metódou pre hrubú frakciu. Oblasť pod 0,25 mm je obtiažne analyzovať, prevažne sa používa laserová difrakčná analýza (Low Angle Laser Light Scattering). Princípom je veľkosť uhla, pod ktorým sa odráža laser od jednotlivých zrníčok. Zrná väčšieho priemeru vykazujú malé uhly a menšie zrná uhly väčšie. Graf č. 5 zobrazuje príklad optimálnej krivky zmesi, v ktorej bol nahradený cement do 15 % mletým vápencom frakcie 8/V. [23]

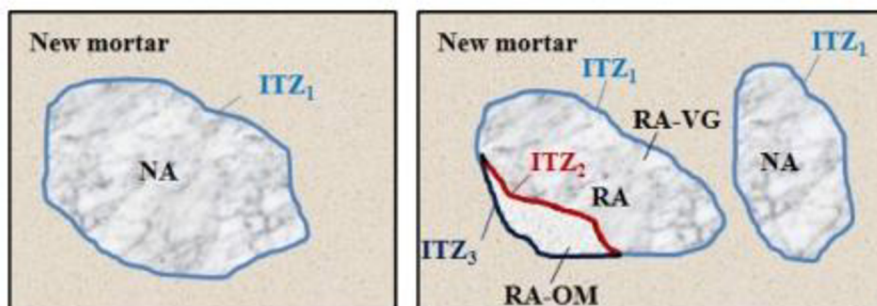


Graf 5: Optimálna krivka zrnitosti frakcie mletého malty s 15% nahradením cementu vápencom 8/V

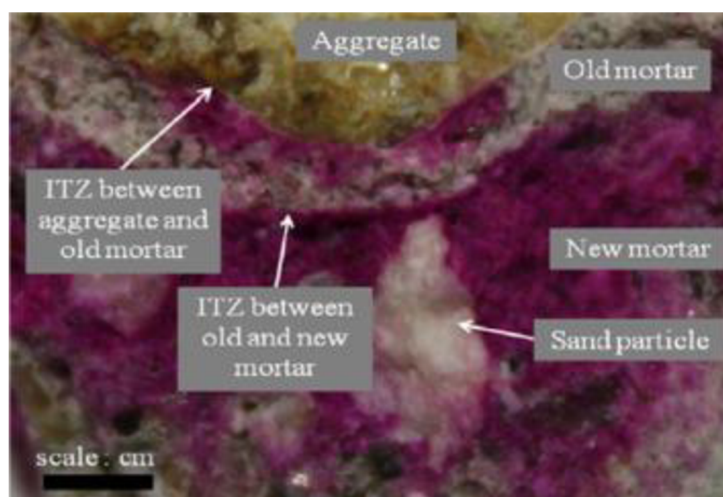
5 Mikroštruktúra betónu

Kľúčom k porozumeniu nehomogenity RCA je rozhranie medzi jednotlivými materiálmi, tzv. tranzitná zóna (ITZ). Ich veľkosť určuje vodný súčiniteľ a pomer kameniva voči cementu. So zvyšujúcim sa vodným súčiniteľom dochádza k zväčšeniu veľkosti tranzitnej zóny. Ak sú navyše použité prímеси na bázi pucolánov, štruktúra betónu sa zhutní a zvýši sa jeho pevnosť a odolnosť. U bežného betónu je tranzitná zóna iba jedna, zatiaľ čo pri betóne s RCA sú tieto zóny tri. Ako je vidieť na obrázku č. 3, prírodné kamenivo (na obrázku značené ako NA), má jednu tranzitnú zónu a to ITZ₁ medzi cementovou maticou a kamenivom. Recyklované kamenivo (na obrázku značené ako RA) má týchto styčných plôch viac, ITZ₁ (styk pôvodného prírodného kameniva s novou maticou), ITZ₂ (plocha medzi pôvodným NA a starou cementovou maticou) a ITZ₃ (zóna medzi starou a novou maltou). Je dôležité poznamenať, že RCA sa získava drtením, pri ktorom dochádza

k eliminácii starej malty z kameniva, preto tranzitná zóna medzi starou maltou a kamenivom (ITZ_2) môže byť narušená alebo úplne odstránená, čím vznikne odhalené prírodné kamenivo, ktoré napriek tomu, že je recyklované tvorí tranzitnú zónu ITZ_1 s novou maltou. Pre lepšiu predstavivosť uvádzam obrázok 4, kde je reálny snímok recyklátu zakomponovaného do betónu. [3][4][29]

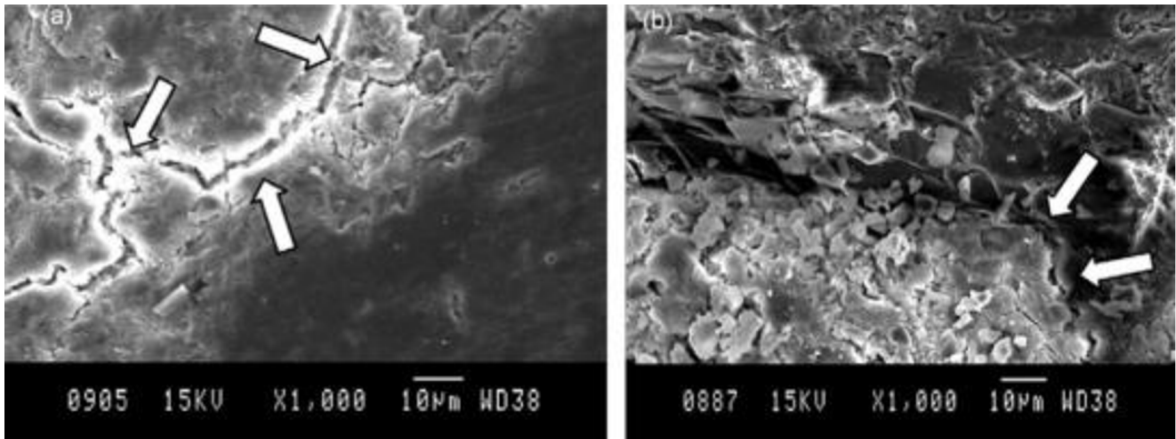


Obrázok 3: Tranzitné zóny v betóne [4]



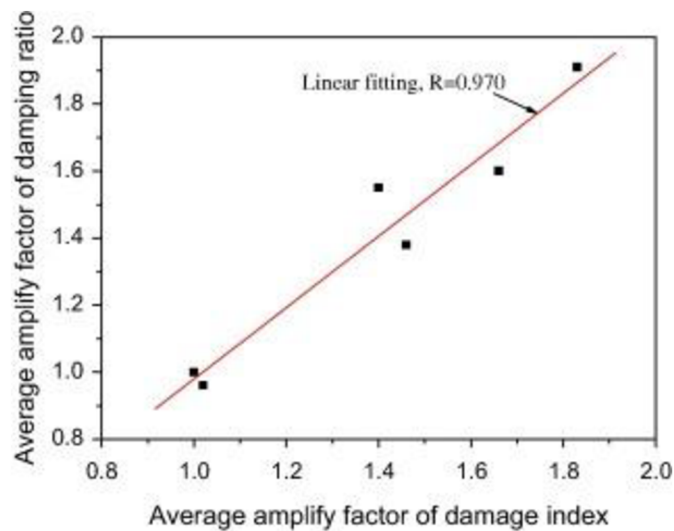
Obrázok 4: Zobrazenie tranzitných zón na reálnom príklade [14]

Zbytková malta na recykláte má veľké množstvo dutín a mikrotrhlín, vytvorenými už spomínaným recyklačným procesom (obr. 5). Existencia týchto nedostatkov má za následok vyššiu drtivosť materiálu a nasiakavosť. Vysokou absorpciou vody recyklátu sa na povrchu kameniva hromadí vodný film, čo má za následok vytvorenie veľkého plochého kryštálu $Ca(OH)_2$ kolmo k povrchu zrníčka recyklátu a tým vytvoreniu vysokoporéznej novej tranzitnej zóny. Okrem toho, v praxi sa RCA neperie, pretože to zvyšuje cenu jednak recyklácie a jednak výsledného produktu, takže povrch RCA je pokrytý veľkým množstvom prachu, čo znižuje silu spojenia starej a novej malty. Z tohto dôvodu je najslabším článkom betónu z recyklovaného kameniva ITZ_2 , čiže pôvodné kamenivo v styku s pôvodnou maltou, ale aj pôvodná zbytková malta a nová tranzitná zóna medzi RCA a cementovou pastou (ITZ_3). [14][15]



Obrázok 5: Trhliny a dutiny v zbytkovej malte a v tranzitnej zóne [14]

V jednom z mnohých výskumov, ktoré boli uskutočnené v oblasti recyklovaného kameniva z betónu, skúmal Liang a kol. betónový recyklát a jeho tlmiaču schopnosť. Výsledkom tejto prínosnej práce bolo, že čím viac recyklátu obsahuje betónová zmes, tým má väčší tlmiači efekt. Je to spôsobené poréznu zbytkovou cementovou maltou, vďaka ktorej má recyklát trhlinky a dutinky naplnené vzduchom, ktoré pohlcujú vysielanú energiu zo zdroja. Keďže Liang našiel lineárnu závislosť medzi utlmovacou funkciou a mierou poškodenia recyklátu (graf č. 6), je veľmi dôležité sa pri ďalšom skúmaní tohto materiálu zamerať na počet, hustotu a rozmer makrotrhlín. [14]



Graf 6: Závislosť indexu poškodenia a tlmiaceho koeficientu [14]

6 Možnosti zlepšenia vlastností recyklovaných kamenív z betónu

Fyzikálne vlastnosti RCA závisia najmä od kvality a množstva zostatkovej cementovej malty, ktorá nebola odstránená z povrchu kameniva pri recyklácii. Cementový kameň je pórovitý materiál a množstvo pórov je dané vodným súčiniteľom pôvodného betónu. Proces drtenia recyklátu a konečná frakcia má vplyv na množstvo tejto malty. Z vyššie uvedených poznatkov vyplýva, že objemová hmotnosť a nasiakavosť recyklátu sú značne závislé od zvyškovej cementovej malty. Vďaka zvýšenej pórovitosti a teda aj nasiakavosti recyklátu dochádza k rozdielom medzi betónom s prírodným kamenivom (NAC) a betónom s kamenivom z recyklovaného betónu (RCAC). Najviac ovplyvnené vlastnosti RCA teda sú nasiakavosť, objemová hmotnosť, odolnosť voči drteniu (súčiniteľ LA) a obsah síranov. Prítomnosť recyklátu v betóne a pórovitej zbytkovej malty narušuje dokonalé obalenie RCA novou cementovou maltou.

Obmedzenie množstva náhrady prírodného kameniva recyklátom je v súčasnosti najdostupnejšou možnosťou ako zlepšiť vlastnosti betónu obsahujúcich RCA. Najčastejšie sa frakcia 0/4 mm ponecháva prírodná a celkovú zámes je možné doplniť minerálnymi prísadami ako náhrada za cement a/alebo pridaním superplastifikačných prísad, resp. prísad redukujúcich potrebu zámesovej vody. Čím horšia je kvalita recyklátu, tým horšie je jeho využitie v praxi. [5][6]

6.1 Metódy ošetrovania betónového recyklátu

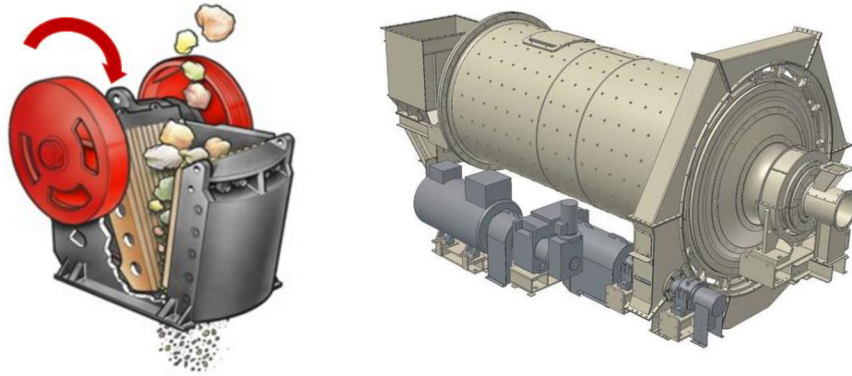
Uvádžam niektoré metódy, ktoré zlepšujú vlastnosti recyklátu redukciami zbytkovej malty.

6.1.1 Termická metóda

Kamenivo sa zahrieva dve hodiny na cca 500 °C a následné napätie vyvolané vysokou teplotou vytvorí praskliny na pôvodnej malte a tým ju odstreli. Pri teplotách nad 300 °C dochádza k dehydratácii malty, čím sa stáva krehkou a povolí z prírodného kameniva. Predpokladá sa, že ponorením recyklátu do vody pred samotným ohrevom zefektívňuje túto metódu, pretože dochádza k tlaku na póry malty, čo má za následok rýchlejšie odprýskavanie z povrchu kameniva. Niektoré výskumy ukazujú aj na možnosť okamžitého schladenia kameniva v ľadovej vode, čím dôjde k namáhaniu prostredníctvom náhlej zmeny teplôt a tým popraskaniu zbytkovej malty. Nutno podotknúť, že sa touto metódou značne predraží výsledný produkt, z dôvodu vývinu vysokých teplôt. [7]

6.1.2 Mechanická metóda

Táto technológia spočíva v použití zariadení, ktoré mechanicky odstránia zbytkovú maltu. Sú to napríklad čelustový drtič a guľový mlyn (obr. 6). [7]



Obrázok 6: Čelustový drtič (vľavo) a guľový mlyn (vpravo) [8][9]

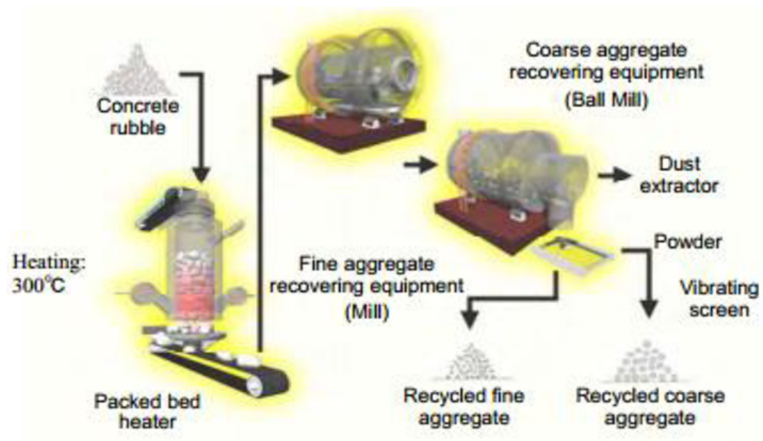
6.1.3 Termicko-mechanická metóda

Táto metóda bola vynájdená v Japonsku pod názvom Heating and rubbing method - HRM. Výhodou oproti iným spôsobom je, že z betónovej suty vzniká vysoko kvalitný recyklát.

Proces je nasledovaný (obr. 7):

1. Rozdrtenie betónu na častice do 50 mm
2. Zahriatie betónu na 300 °C vo vertikálnej peci (palivo - petrolej)
3. Horúci betón je nasypaný do guľového mlyna (médium - kovové gule)
4. Bubón mlyna sa skladá z dvojitej steny, vo vnútornej sú otvory, cez ktoré prepadajú zbytky malty
5. Jemná frakcia je odobraná do ďalšieho mlyna kde sa zbaví zbytkov malty (médium - hrubé kamenivo)
6. Následne kamenivo prejde vibračným sitom a roztriedi sa na jemnú a hrubú frakciu
7. Jemný prach vzniknutý pri sekundárnom mletí sa odoberá do textílnych filtrov
8. Z pôvodnej navážky betónu vznikne asi 35 % hrubej frakcie, 30 % jemnej frakcie a 35 % jemného prachu

Takto získané kamenivo spĺňa japonskú normu JIS A 5308. Bolo dokázané, že sa líši len mierne od prírodného kameniva a pri použití do betónu má skoro rovnakú pevnosť, odolnosť, spracovateľnosť a čerpatelnosť ako betón s NA. Navyše, jemný prach získaný z recyklovania nachádza uplatnenie ako prímes spolu s vysokopecnou troskou. Pri nahradení trosky 10 % prachu sa vlastnosti trosky vôbec nezmenia. [7][10]



Obrázok 7: Princíp termicko-mechanickej metódy [10]

6.1.4 Metóda ponárania do kyseliny

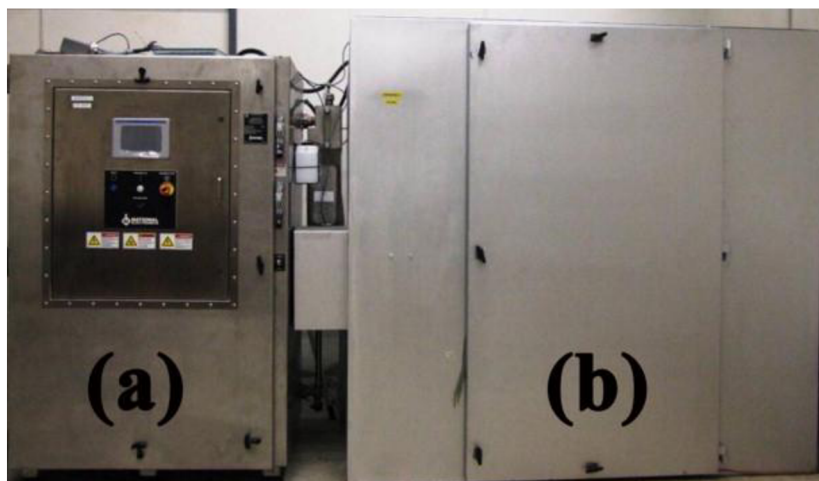
Kamenivo sa ponorí do roztokov rôznych kyselín s molaritou 0,1 M a nechá sa máčať po dobu 24 hodín. Bolo overené, že účinnosť majú kyseliny HCl, H₂SO₄ a H₃PO₄. Síce táto metóda znižuje nasiakavosť o cca 10 %, môže zhoršiť spracovateľnosť a zvýšiť obsah chloridov. [11]

6.1.5 Chemicko-mechanická metóda

Jedná sa o kombináciu chemického prostredia (roztok síranu sodného) a mechanického namáhania, ktoré vznikne pri zmrazovaní a rozmrazovaní kameniva. Táto technológia nie je vhodná pre bežnú prax. [7]

6.1.6 Mikrovlnná metóda

Postup je veľmi jednoduchý, kamenivo sa ideálne namočí do vody a po nasiaknutí sa vloží do zariadenia (obr. 8), v ktorom bude ohrievané mikrovlnným žiarením. Výhodou tejto metódy je kratšia doba vystavenie lúčom, čiže väčšia pravdepodobnosť, že sa prírodné kamenivo nenaruší a nižšie náklady spojené s energiou použitou pri dostatočne rýchlych procese. Dokonca náhradou až 40 % prírodného kameniva recyklátom ošetreným mikrovlnnou metódou (obr. 9) nedochádza k žiadnym značným zmenám vo vlastnostiach (pevnosť v tlaku, pevnosť v ťahu za ohybu a modul pružnosti) betónu. [7]



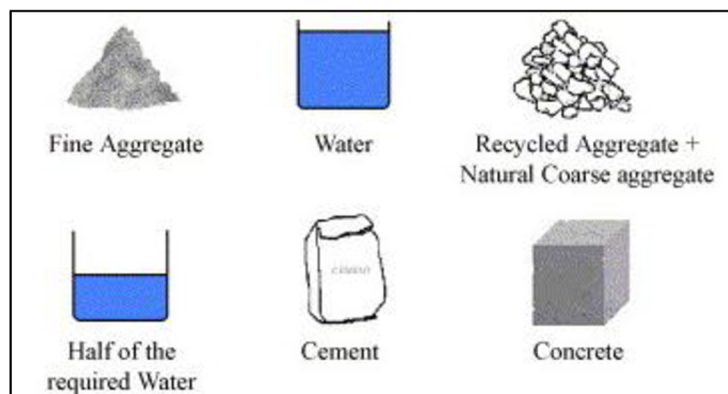
Obrázok 8: Zariadenie pre mikrovlnnú metódu (vľavo generátor mikrovlnného žiarenia, vpravo komora s RCA)[7]



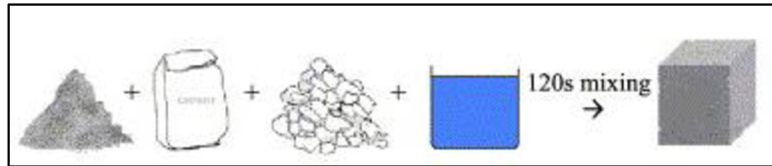
Obrázok 9: Vľavo kamennivo pred mikrovlnnou metódou, vpravo kamennivo po mikrovlnnej metóde [7]

6.1.7 Metóda dvojfázového miešania

Dôvodom vzniku tejto metódy bolo zlepšenie tlakových pevností betónu s recyklovaným kamenivom a ustálenie variabilných pevnostných výsledkov. Dvojfázové miešanie betónu má za následok zaplnenie trhlín a dutín, lepšie zhutnenie zmesi, úpravu ITZ a tým dosiahnutie vyšších pevností betónu oproti tradičnému postupu. Na obrázkoch 10, 11 a 12 je demonštrácia princípu dvojfázového miešania. [3][13]



Obrázok 10: Vysvetlivky symbolov použitých v nasledujúcich postupoch[13]

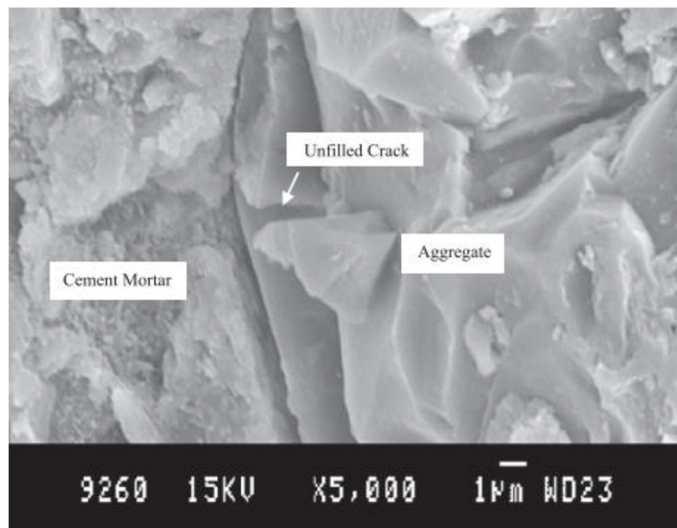


Obrázok 11: Normálny postup miešania betónu [13]

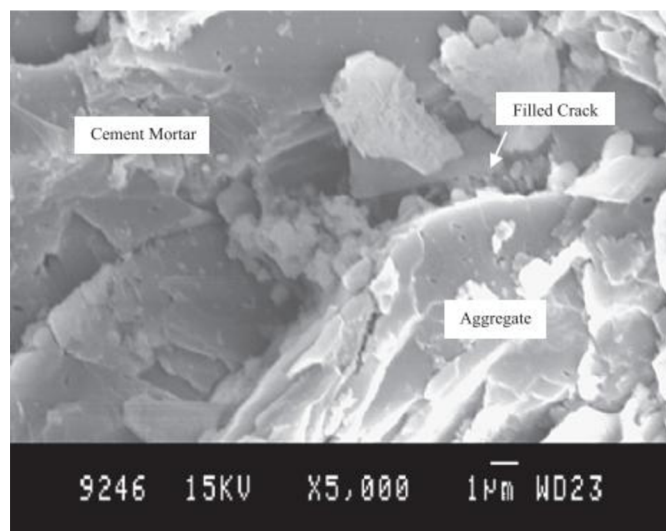


Obrázok 12: Dvojfázový postup miešania betónu [13]

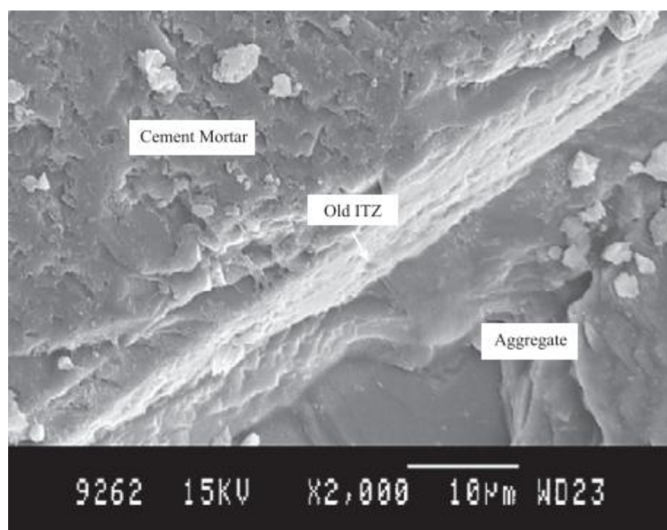
Praktickou ukážkou pôsobenia dvojfázového miešania sú obrázky 13 až 16. Cementový povlak pokryje povrch RCA a tým zaplní trhliny a zosilní ITZ. Výskum [13] dokazuje, že pevnosti v tlaku betónu boli zvýšené. Tento postup otvára širší rozsah aplikácie RCA. [13]



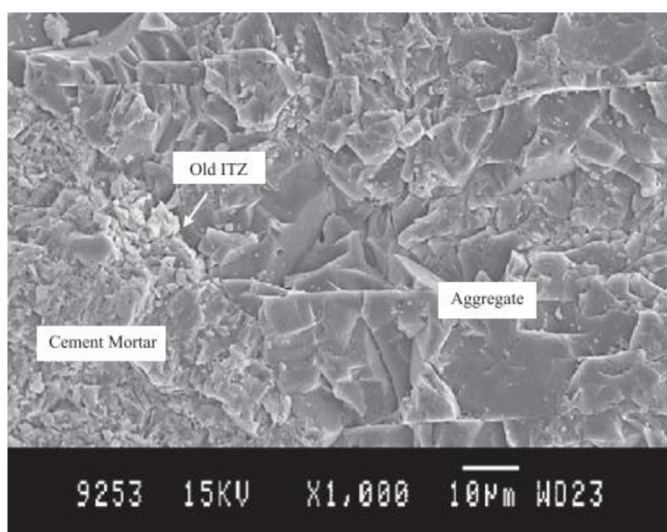
Obrázok 13: Nezaplnené trhliny v mikroštruktúre betónu s RCA pri normálnom postupe miešania [13]



Obrázok 14: Zaplnené trhliny v mikroštruktúre betónu s RCA pri dvojfázovom miešaní [13]



Obrázok 15: Tranzitná zóna RCA pri normálnom postupe miešania betónu [13]



Obrázok 16: Tranzitná zóna RCA pri dvojfázovom miešaní betónu [13]

Keďže recyklovaný betón je látka odpadná, je potrebné aby jeho vlastnosti boli minimálne rovnaké ako vlastnosti prírodnej suroviny, ideálne aby ich prevyšovali. Samotný recyklát bez akejkoľvek úpravy sa môže maximálne vyrovnáť prírodnému kamenivu a to iba hrubá frakcia s najvyššou kvalitou. Možnosti zlepšenia kvality recyklátu je mnoho, hlavným kritériom ich aplikácie je však nanešťastie cena. Preto pri zvažovaní použitia niektorých z vyššie uvedených metód, musíme brať ohľad na to, aby bola dostupná pre väčšie aj menšie množstvá recyklátu a aby neprekročila cenu prírodného kameniva, ale zároveň splňovala požadované vlastnosti.

II. Experimentálna časť

1 Cieľ

Cieľom praktickej časti mojej diplomovej práce bolo skúmanie dvoch druhov recyklátu o rôznej kvalite, určenie ich základných vlastností. Bolo navrhnuté zloženie betónovej zmesi s využitím jemnozrnných prímiesí a recyklovaných plnív. Výstupom je optimalizačný proces, vypočítaný na základe metódy párového porovnania pomocou Fullerovho trojuholníku, ktorý vyhodnotí najoptimálnejšiu receptúru a distribúcia pórov pre jednotlivé receptúry, ktoré by mali byť ovplyvnené druhom prímiesí a kvalitou recyklátu.

2 Metodika

V prvej etape experimentu boli všetky kamenivá podrobené skúške objemovej hmotnosti, nasiakavosti a granulometrie, tzn. sitovému rozboru. Na recykláte z diaľnice D1 - Veľká Bíteš bol stanovený aj obsah chloridov a síranov, aby som zistila, či je vôbec použiteľný pre ďalšie skúšky. Druhým krokom bol výber typov jemne mletých prímiesí a vhodné percentuálne zastúpenie recyklátu pre jednotlivé receptúry. Cieľovou konzistenciou bol stupeň sadnutia kužela S3 až S4 (130 - 160 mm), preto pôvodne zamýšľané rovnaké množstvo vody bolo upravované. Pre porovnateľnosť výsledkov bolo potrebné zachovať čo najidentickejšie receptúry, len s obmenou typu recyklátu a prímiesí. Bolo skoncipovaných 9 receptúr pre pevnostnú triedu betónu C 25/30 a 5 receptúr pre triedu C 30/37 (vysvetlivky skratiek značenia viz tabuľka č. 5). Pre označenie receptúr C 25/30 boli použité dva druhy recyklátu (Spiroll, Veľká Bíteš), zatiaľ čo pre C 30/37 iba RCA Spiroll, z dôvodu lepších vlastností má totiž vyššiu pravdepodobnosť, že vydrží v skúške mrazuvzdornosti betónu. Z každej receptúry bolo vyrobených 6 skúšobných kociek $150 \times 150 \times 150$ mm (dokopy 84 kusov) pre stanovenie objemových hmotností (čerstvého aj zatvrdlého betónu) a pevností v tlaku po 28 a 60 dňoch normového zrenia. Pre každú zames triedy C 30/37 boli navyše zhotovené 2 trámce $100 \times 100 \times 400$ mm (dokopy 10 ks) pre stanovenie skúšky mrazuvzdornosti betónu. Na základe výpočtu optimalizačnej metódy párového porovnania (Fullerov trojuholník) a mnou zvolených kritérií výberu som určila najvhodnejšiu receptúru triedy C 25/30, C 30/37 a túto som porovnala s ekonomickým parametrom. V neposlednej rade bola vyhodnotená pórovitosť receptúr pevnostnej triedy C 30/37, ktorej výstupom bol vplyv typu prímiesí na získané výsledné hodnoty čerstvého a zatvrdnutého betónu.

3 Legislatíva

Pri vypracovaní praktickej časti som sa riadila nasledujúcimi normami z tabuľky 1:

Tabuľka 1: Výpis noriem

Kamenivo	
ČSN EN 1097-6	Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti
ČSN EN 933-1	Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor
Betón C 25/30	
ČSN EN 12350-2	Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím
ČSN EN 12350-6	Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost
ČSN EN 12390-7	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
ČSN EN 12390-3	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
Betón C 30/37	
ČSN EN 12350-2	Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím
ČSN EN 12350-6	Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost
ČSN EN 12390-7	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
ČSN EN 12390-3	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
ČSN EN 12390-5	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles
ČSN 73 1322	Stanovení mrazuvzdornosti betonu

4 Použité suroviny

4.1 Kamenivo

Kamenivo tvorí 75 % surovinovej zmesi, preto je jeho kvalita pre betón dôležitá. Na výrobu skúšobných telies boli použité prírodné kamenivá, konkrétne TK 0/4 mm Žabčice, DK 4/8 Olbramovice, DK 8/16 Olbramovice a taktiež kamenivá recyklované, z výroby betónových predpínaných dutinových stropných panelov SPIROLL ($f_{ck} = 55$ MPa) zo závodu Prefa Brno a. s. (obr. 17 až 19) a z cementobetónových krytov z diaľnice D1, úsek Velká Bíteš (obr. 17 až 20). Na obrázkoch sú síce všetky frakcie recyklovaných kamenív, no použité boli iba frakcie 4/8 mm a 8/16 mm. Frakcia 0/4 mm je zložená z vysokého podielu cementového kameňa, jej použitie by malo degradačný vplyv a frakcia 16/22 mm presahovala maximálne zrno kameniva, ktoré bolo použité pre navrhnuté receptúry.



Obrázok 17: Betónový recyklát frakcia 0/4 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll



Obrázok 18: Betónový recyklát frakcia 4/8 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll



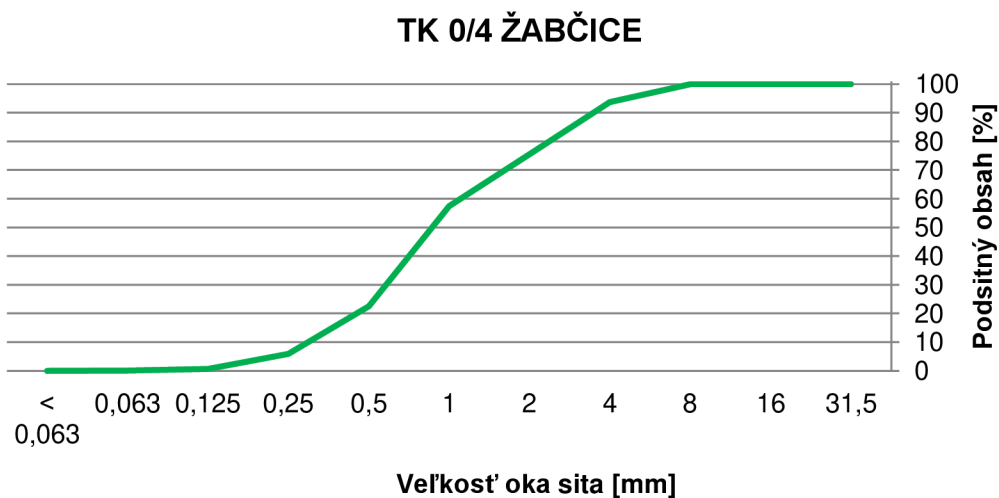
Obrázok 19: Betónový recyklát frakcia 8/16 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll



Obrázok 20: Betónový recyklát frakcia 16/22 mm Velká Bíteš

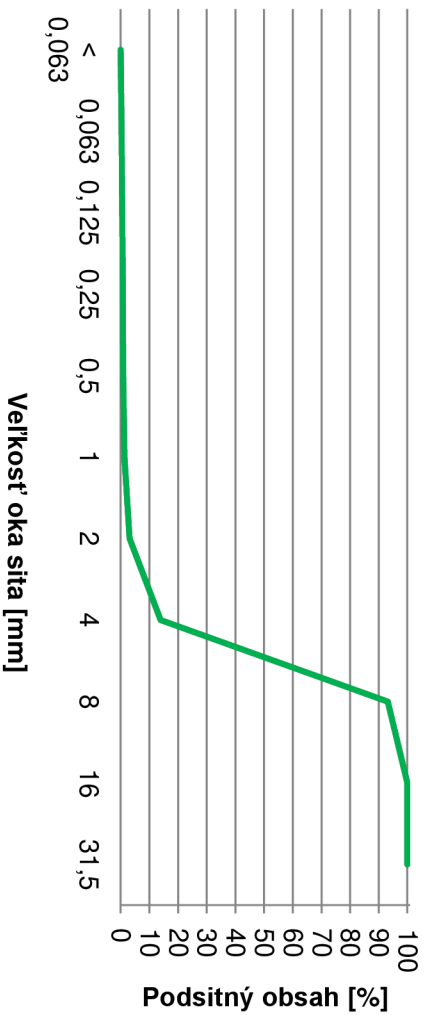
4.1.1 Granulometria

Granulometria popisuje fyzikálne vlastnosti zrna a má zásadný vplyv na medzerovitosť betónu. Pre návrh jednotlivých receptúr bolo smerodajné poznať krivku zrnitosti kamenív použitých do zámesí. Bola vykonaná skúška granulometrie na základe normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. Výsledné zastúpenie jednotlivých frakcií je uvedené v grafe č. 7-13.



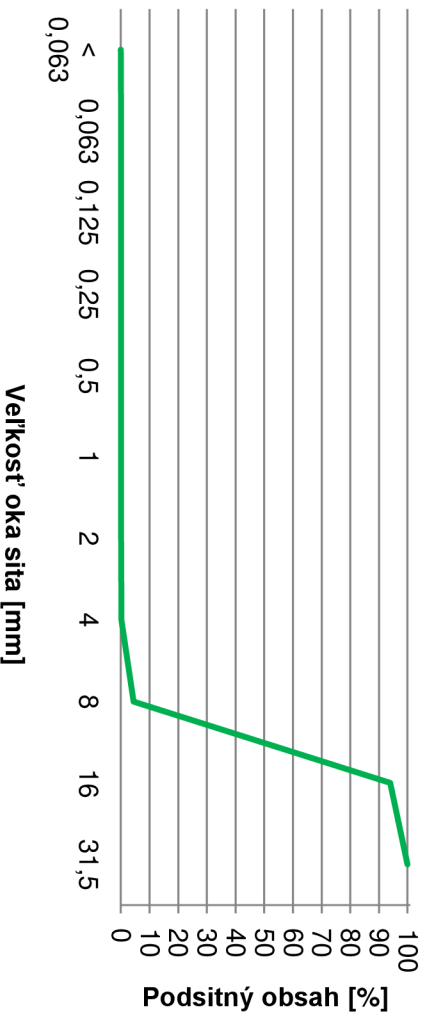
Graf 7: Krivka zrnitosti frakcie 0/4 mm Žabčice

DK 4/8 OLBRAMOVICE



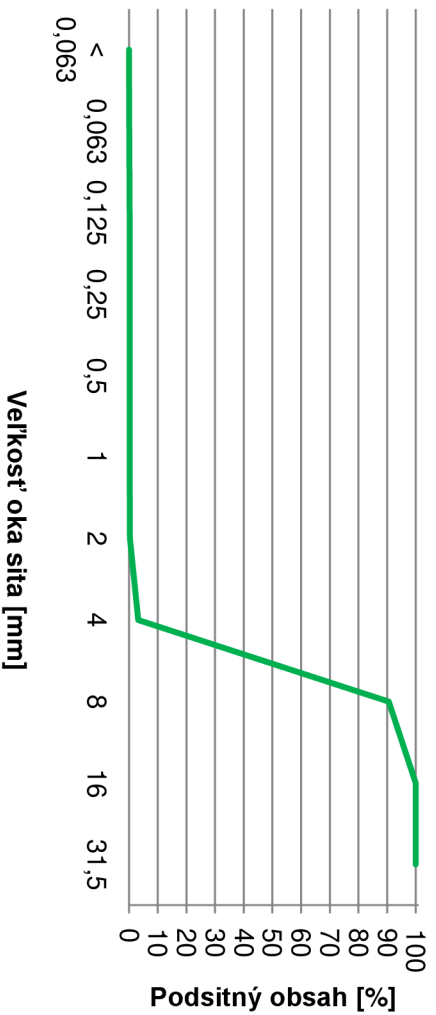
Graf 8: Křivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Olbramovice

DK 8/16 OLBRAMOVICE



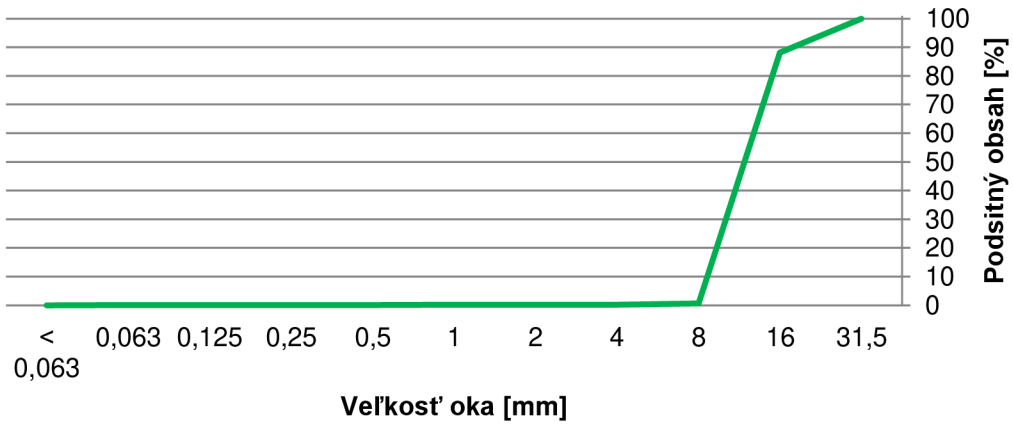
Graf 9: Křivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Olbramovice

4/8 DRK - SPIROLL



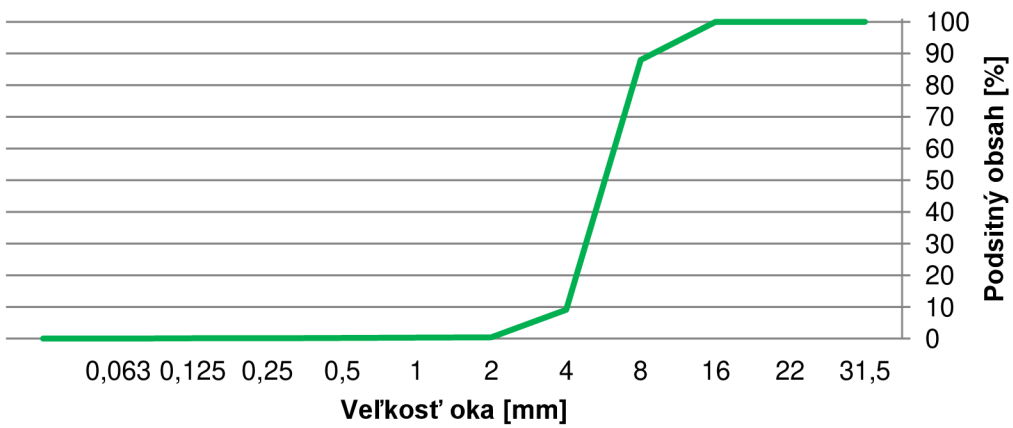
Graf 10: Křivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Spiroll

8/16 DRK - SPIROLL



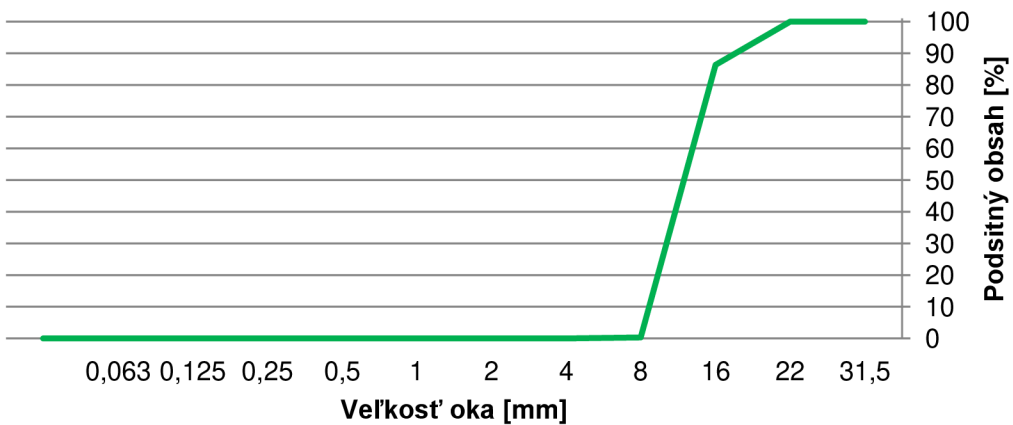
Graf 11: Krivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Spiroll

4/8 DRK - Velká Bíteš



Graf 12: Krivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Velká Bíteš

8/16 DRK - Velká Bíteš



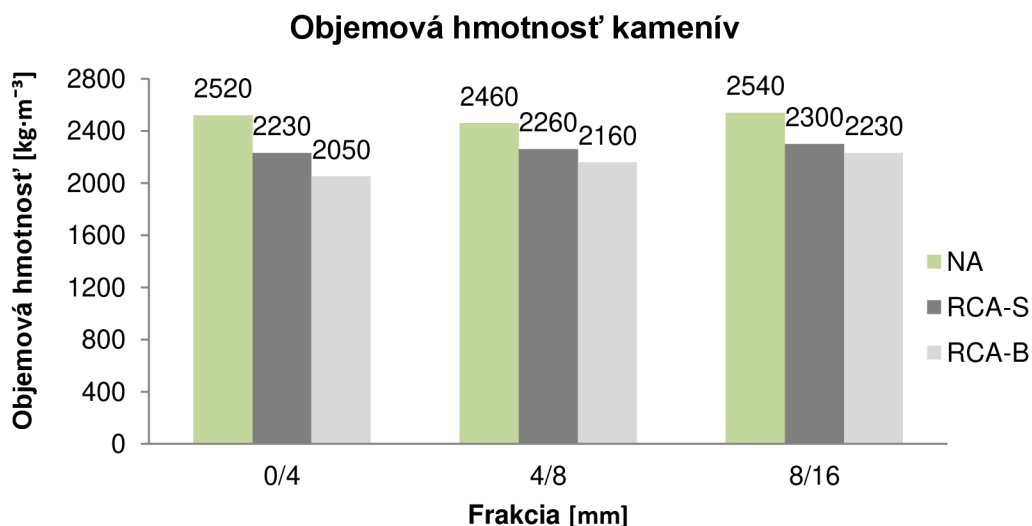
Graf 13: Krivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Velká Bíteš

4.1.2 Objemová hmotnosť a nasiakavosť kamenív

Po zistení zrnitosti kameniva nasledovalo stanovenie objemových hmotností (ρ_b) kamenív pomocou odmerného valca (objem 2 litre) pre NA aj RCA a nasiakavosti (NV) iba pre RCA. Skúšky boli vykonané v súlade s normou ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Výsledné hodnoty objemovej hmotnosti kamenív ukazuje tabuľka 2 a nasiakavosti RCA tabuľka 3. Výsledky objemových hmotností kamenív použitých v praktickej časti zobrazuje graf 14 a porovnanie nasiakavosti a objemovej hmotnosti (OH) recyklátov znázorňuje graf 15. Na základe výsledkov skúšiek recyklovaných kamenív som si ďalej zvolila iba recyklát Spiroll, ktorý bude použitý do betónu pre skúšku mrazuvzdornosti.

Tabuľka 2: Objemová hmotnosť kamenív a recyklátov

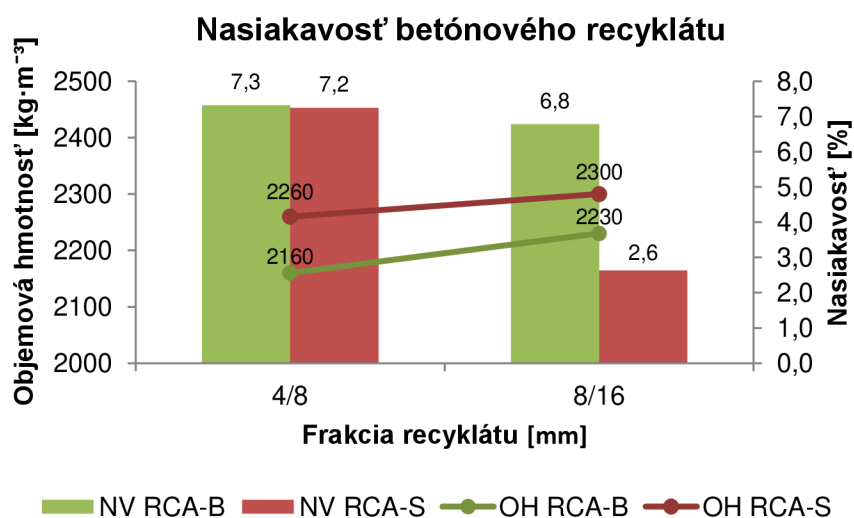
TK Žabčice	
0/4	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2520
DK Olbramovice	
4/8	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2460
8/16	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2540
DRK Spiroll	
0/4	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2230
4/8	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2260
8/16	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2300
DRK Velká Bíteš	
0/4	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2050
4/8	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2160
8/16	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2230
16/32	ρ_b [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	2340



Graf 14: Porovnanie objemových hmotností kamenív

Tabuľka 3: Nasiakavosti recyklovaných kamenív

DRK Spiroll	
Frakcia	Nasiakavosť [%]
4/8	7,2
8/16	2,6
DRK Velká Bíteš	
Frakcia	Nasiakavosť [%]
4/8	7,3
8/16	6,8



Graf 15: Porovnanie vlastností recyklátov

Môžeme si všimnúť koreláciu dvoch primárnych vlastností recyklátov, na ktoré sa poukazuje v graf 15. Bolo overené, že so znižujúcou sa objemovou hmotnosťou sa zvyšuje nasiakavosť recyklovaného kameniva v dôsledku zbytkovej cementovej malty, ktorá má nižšiu objemovú hmotnosť ako kameň a zároveň jej pórovitá štruktúra nasiakne väčšie množstvo vody.

4.1.3 Obsah síranov a chloridov

Aby mohol byť recyklát Velká Bíteš použitý, musel sa na ňom stanoviť obsah síranov a chloridov, pretože tento materiál bol dlhšiu dobu skládkovaný na otvorenom priestranstve. Hlavne sírany z kameniva by mohli spôsobiť síranovú koróziu betónu, ktorá v rannej fázi je pomerne ťažko rozpoznateľná, pretože zapríčiniť zaplnenie a zhutnenie pórového systému a nárast pevností betónu. Reakciou síranov s hydroxidom vápenatým a trikalciomaluminátom (C_3A) začne postupne vznikáť sadrovec až ettringit, ktoré majú výrazne väčší objem, čím rapidne klesne pevnosť betónu a v praxi môže spôsobiť havárie. Pred samotnou skúškou bol recyklát vysušený v sušiarňi a namletý na jemný prach. Z tabuľky č. 4 môžeme vidieť výsledky stanovenia chloridov a síranov v recykláte Velká Bíteš. Celý skúšobný protokol z laboratória LABTECH s.r.o. je vedený ako príloha č. 1 tejto diplomovej práce. Podľa normy ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda je maximálny povolený obsah síranov v kamenive 0,2 % a chloridov 0,02 %. Z tohto dôvodu bolo do receptúry C 30/37 ďalej použité iba recyklované kamenivo Spiroll, ktoré je vyššej kvality. V zahraničnej literatúre [40] uvádzajú autori obsah chloridov podľa ASTM maximálne 0,05 % pre bežné betóny, 0,015 % pre predpäté konštrukcie a až 1 % pre nekonštrukčné betóny. Na základe tohto zdroja, by recyklát Velká Bíteš mohol byť ďalej použitý do konštrukcií, ktoré nevyžadujú deklarované pevnosti.

Tabuľka 4: Percentuálne zastúpenie chloridov a síranov v RCA Velká Bíteš

Parameter	Obsah
Sušina pôvodného vzorku	96,89 %
Sírany	0,29 % suš.
Chloridy	0,11 % suš.

4.2 Cement

Cement je najdrahšia zložka betónu, preto dochádza k náhradám istého percenta cementu minerálnymi prísadami. Výsledná pevnosť kompozitu je závislá od množstva, druhu a doby tuhnutia cementu. Po výbere správneho druhu cementu nasleduje voľba optimálneho vodného súčiniteľa, aby cementovej kaše bolo toľko, že obalí jednotlivé zrná a vyplní dokonale medzery medzi kamenivom. Vo všetkých receptúrach bol použitý jeden druh cementu a to **CEM I 42,5 R** od spoločnosti Českomoravský cement a.s., závod Mokrý, splňujúci požiadavky normy ČSN EN 196 - 6.

4.3 Voda

Zámesová voda čistá, nijak špeciálne neupravovaná, jednalo sa o vodu z mestskej vodovodnej siete.

4.4 Prísady

Ako superplastifikačná prísada bol použitá **Sika[®] ViscoCrete[®] SC-305 AT**.

4.5 Prímеси

Mimo referenčné receptúry boli použité prímеси do všetkých zámesí, presnejšie **mikrosilika** RW-Füller od spoločnosti RW silicium GmbH (obr. 21), **mikromletý vápenec** Zblovice od Agrostav Znojmo a.s. (obr. 22) a **vysokopecná troska** z elektrárne Dětmárovice od ČEZ Energetické produkty spol. s r.o. (obr. 23).



Obrázok 21: Mikrosilika

Obrázok 22: Mikromletý vápenec

Obrázok 23: Vysokopecná troska

Prehľad zistených vlastností:

4.5.1.1 Mikrosilika RW-Füller

Obsah SiO₂ - 96 %

Objemová hmotnosť - 200 kg·m⁻³

Merný povrch - 1800-2200 m²·kg⁻¹

4.5.1.2 Mikromletý vápenec Zblovice

Medzerovitost' v zhutnenom stave - 32 %

Objemová hmotnosť - 2710 kg·m⁻³

Merný povrch - 271 m²·kg⁻¹

4.5.1.3 Vysokopecná troska Dětmarovice

Sypná hmotnosť - 1100 kg·m⁻³

5 Čerstvý betón

Hneď na úvod tejto kapitoly je uvedená prehľadná tabuľka č. 5 s označeniami receptúr, keďže budú tieto skratky používané hlavne v grafickom znázornení. Skratky sú tvorené z anglických názvov (NA = natural aggregate - prírodné kamenivo; RCA = recycled concrete aggregate - betónový recyklát). Pre triedu C20/25 bol obsah recyklátu 60 %, zatiaľ čo pre triedu C 30/37 polovičné množstvo, teda iba 30 %. Z preštudovanej literatúry vyplýva, že použitie 100% náhrady prírodného kameniva recyklátom nemá zmysel, preto som volila 30 %, ktoré sú bežne povolené pre náš a zahraničný trh a 60 %, pretože sa jedná o nižšiu pevnostnú triedu bez vplyvu agresívneho prostredia. Tabuľka 6 uvádza rozpis receptúr na 1 m³ betónovej zmesi.

5.1 Označenie receptúr

Tabuľka 5: Vysvetlivky pre jednotlivé receptúry

Názov receptúry	Obsah prírodného kameniva [%]	Druh recyklátu	Obsah recyklátu [%]	Druh prímеси	Obsah prímеси [%]
C 25/30 NA	100	-	0	-	0
C 25/30 RRCA-S	40	Spiroll	60	-	0
C 25/30 VRCA-S	40	Spiroll	60	vápenec	20
C 25/30 MRCA-S	40	Spiroll	60	mikrosilika	10
C 25/30 SRCA-S	40	Spiroll	60	troska	30
C 25/30 RRCA-B	40	Velká Bíteš	60	-	0
C 25/30 VRCA-B	40	Velká Bíteš	60	vápenec	20
C 25/30 MRCA-B	40	Velká Bíteš	60	mikrosilika	10
C 25/30 SRCA-B	40	Velká Bíteš	60	troska	30
C 30/37 NA	100	-	0	-	0
C 30/37 RRCA-S	70	Spiroll	30	-	0
C 30/37 VRCA-S	70	Spiroll	30	vápenec	20
C 30/37 MRCA-S	70	Spiroll	30	mikrosilika	10
C 30/37 SRCA-S	70	Spiroll	30	troska	30

5.2 Receptúry

Tabuľka 6: Výpis jednotlivých receptúr

C 25/30 NA	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	935
4/8 Olbramovice	305
8/16 Olbramovice	609
Voda	205
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81

C 25/30 RRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	926
4/8 Olbramovice	121
4/8 Spiroll	154
8/16 Olbramovice	241
8/16 Spiroll	308
Voda	143
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81

C 25/30 VRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	914
4/8 Olbramovice	119
4/8 Spiroll	152
8/16 Olbramovice	238
8/16 Spiroll	304
Voda	180
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (vápenec 20 % z m _c)	62,4

C 25/30 MRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	926
4/8 Olbramovice	121
4/8 Spiroll	154
8/16 Olbramovice	241
8/16 Spiroll	308
Voda	144
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (mikrosilika 10 % z m _c)	31,2

C 25/30 SRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	919
4/8 Olbramovice	120

4/8 Spiroll	153
8/16 Olbramovice	240
8/16 Spiroll	306
Voda	160
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (troska 30 % z m _c)	93,6

C 25/30 RRCA-B	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	926
4/8 Olbramovice	121
4/8 Velká Bíteš	154
8/16 Olbramovice	241
8/16 Velká Bíteš	308
Voda	141
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
C 25/30 VRCA-B	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	914
4/8 Olbramovice	119
4/8 Velká Bíteš	152
8/16 Olbramovice	238
8/16 Velká Bíteš	304
Voda	180
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (vápeneč 20 % z m _c)	62,4
C 25/30 MRCA-B	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	926
4/8 Olbramovice	121
4/8 Velká Bíteš	154
8/16 Olbramovice	241
8/16 Velká Bíteš	308
Voda	174
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (mikrosilika 10 % z m _c)	31,2
C 25/30 SRCA-B	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	312
0/4 Źabčice	919
4/8 Olbramovice	120
4/8 Velká Bíteš	153
8/16 Olbramovice	240
8/16 Velká Bíteš	306
Voda	168

Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	2,81
Prímes (troska 30 % z m _c)	93,6

C 30/37 NA	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	380
0/4 Źabčice	825
4/8 Olbramovice	269
8/16 Olbramovice	611
Voda	136
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	3,42

C 30/37 RRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	380
0/4 Źabčice	819
4/8 Olbramovice	182
4/8 Spiroll	66
8/16 Olbramovice	425
8/16 Spiroll	155
Voda	133
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	3,42

C 30/37 VRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	380
0/4 Źabčice	817
4/8 Olbramovice	182
4/8 Spiroll	66
8/16 Olbramovice	424
8/16 Spiroll	155
Voda	146
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	3,42
Prímes (vápeneč 20 % z m _c)	76,0

C 30/37 MRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	380
0/4 Źabčice	819
4/8 Olbramovice	182
4/8 Spiroll	66
8/16 Olbramovice	425
8/16 Spiroll	155
Voda	141
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	3,42
Prímes (mikrosilika 10 % z m _c)	38,0

C 30/37 SRCA-S	kg·m⁻³
CEM I 42,5 R Mokrú	380
0/4 Źabčice	815
4/8 Olbramovice	181

4/8 Spiroll	66
8/16 Olbramovice	423
8/16 Spiroll	154
Voda	157
Plastifikačná prísada (0,9 % z m _c)	3,42
Prímes (troska 30 % z m _c)	114,0

5.3 Zhutnenie, uloženie a ošetrovanie skúšobných telies

Na základe receptúr boli umiešané zámesi, ktoré sa podrobili skúške konzistencie sadnutím kužeľa. Ak čerstvý betón nevyhovoval vopred požadovanému sadnutiu 130 - 160 mm bol miešaný odznova s prídavkom/redukciou vody. Vyhovujúci betón bol naplnený do plastových kockových foriem o vnútornej hrane 150 mm a trámčov 100 × 100 × 400 mm, ktoré boli vopred namazané odbedňovacím olejom (obr. 24). Zmes bola hutnená na vibračnom stole a následne sa určila objemová hmotnosť čerstvého betónu. Po 24 hod boli vzorky odformované a uložené do vlhkého prostredia s relatívnou vlhkosťou 95 % na dozrievanie.



Obrázok 24: Približne polovičné množstvo naplnených foriem

5.4 Konzistencia

Pomocou receptúr uvedených vyššie boli namiešané im zodpovedajúce zámesi. Skúška konzistencie sadnutím kužeľa bola stanovená na všetkých betónových zámesiach podľa ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Stupeň konzistencie a samotné sadnutie je znázornené v tabuľke 7, grafe 16 a na obrázku 25.

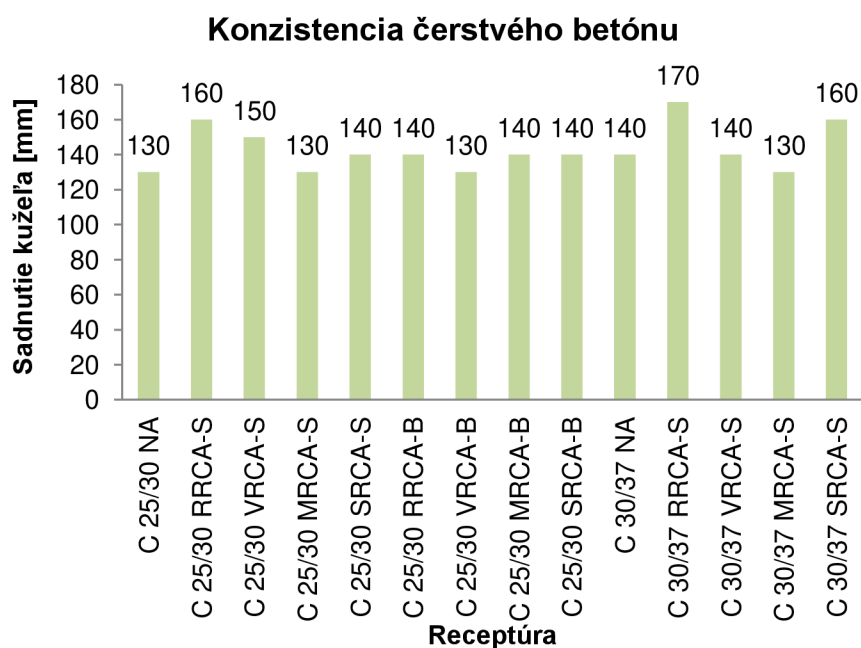
Tabuľka 7: Výsledky skúšky sadnutia kužeľa

Označenie zmesi	Sadnutie kužeľa	Stupeň konzistencie
C 25/30 NA	130 mm	S3
C 25/30 RRCA-S	160 mm	S4
C 25/30 VRCA-S	150 mm	S3
C 25/30 MRCA-S	130 mm	S3
C 25/30 SRCA-S	140 mm	S3

C 25/30 RRCA-B	140 mm	S3
C 25/30 VRCA-B	130 mm	S3
C 25/30 MRCA-B	140 mm	S3
C 25/30 SRCA-B	140 mm	S3
C 30/37 NA	140 mm	S3
C 30/37 RRCA-S	170 mm	S4
C 30/37 VRCA-S	140 mm	S3
C 30/37 MRCA-S	130 mm	S3
C 30/37 SRCA-S	160 mm	S4



Obrázok 25: Ukážka konzistencie betónu



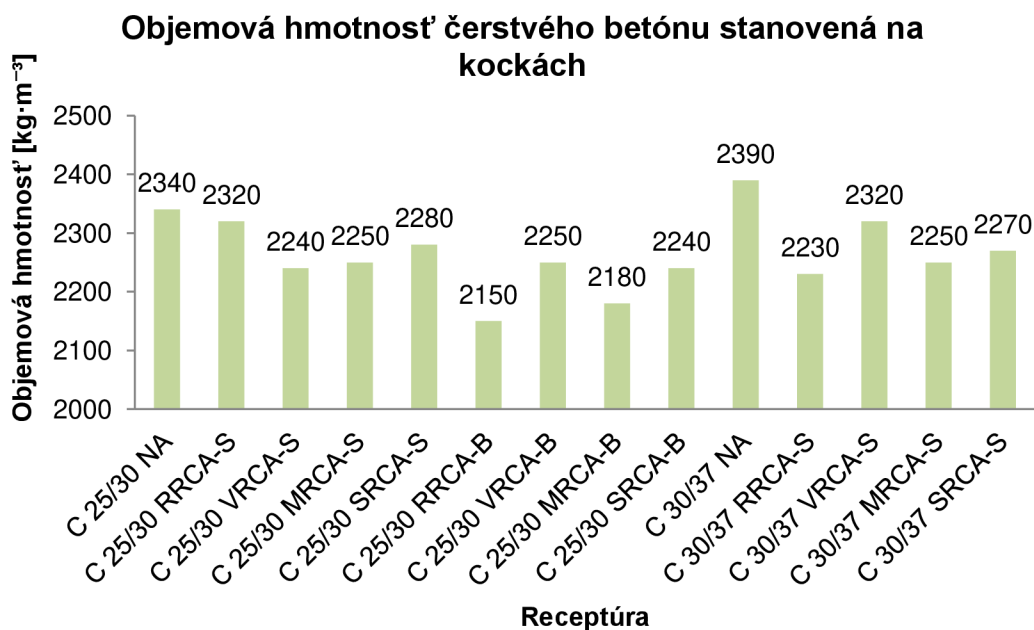
Graf 16: Konzistencia jednotlivých zmesí

5.5 Objemová hmotnosť čerstvého betónu

Stanovenie objemovej hmotnosti čerstvého betónu ($D_{\text{ČB}}$) prebehlo podľa ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. Výsledné hodnoty sú znázornené v tabuľke 8 a grafe 17.

Tabuľka 8: Objemové hmotnosti čerstvého betónu

Označenie zmesi	$D_{\text{ČB}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
C 25/30 NA	2340
C 25/30 RRCA-S	2320
C 25/30 VRCA-S	2240
C 25/30 MRCA-S	2250
C 25/30 SRCA-S	2280
C 25/30 RRCA-B	2150
C 25/30 VRCA-B	2250
C 25/30 MRCA-B	2180
C 25/30 SRCA-B	2240
C 30/37 NA	2390
C 30/37 RRCA-S	2230
C 30/37 VRCA-S	2320
C 30/37 MRCA-S	2250
C 30/37 SRCA-S	2270



Graf 17: Porovnanie objemových hmotností čerstvého betónu

5.6 Vyhodnotenie výsledkov

Pre všetkých 14 receptúr bola požadovaná konzistencia sadnutím kužeľa 130 -160 mm. Až na receptúru C 30/37 RRCA-S (170 mm) sa podarilo tento limit dodržať. Na spracovateľnosť betónu nemalo až tak zásadný vplyv recyklované kamenivo, ako druh prímеси. Najzásadnejšou zmenou bola zámes s mikrosilikou, kedy sa pri plnení foriem betón stával mierne tuhším, možno aj z dôvodu suchšej zmesi. Objemové hmotnosti čerstvého betónu dosahovali v priemere od 2200 do 2300 kg·m⁻³ a približne korelovali s dosiahnutou konzistenciou.

6 Zatvrdlý betón

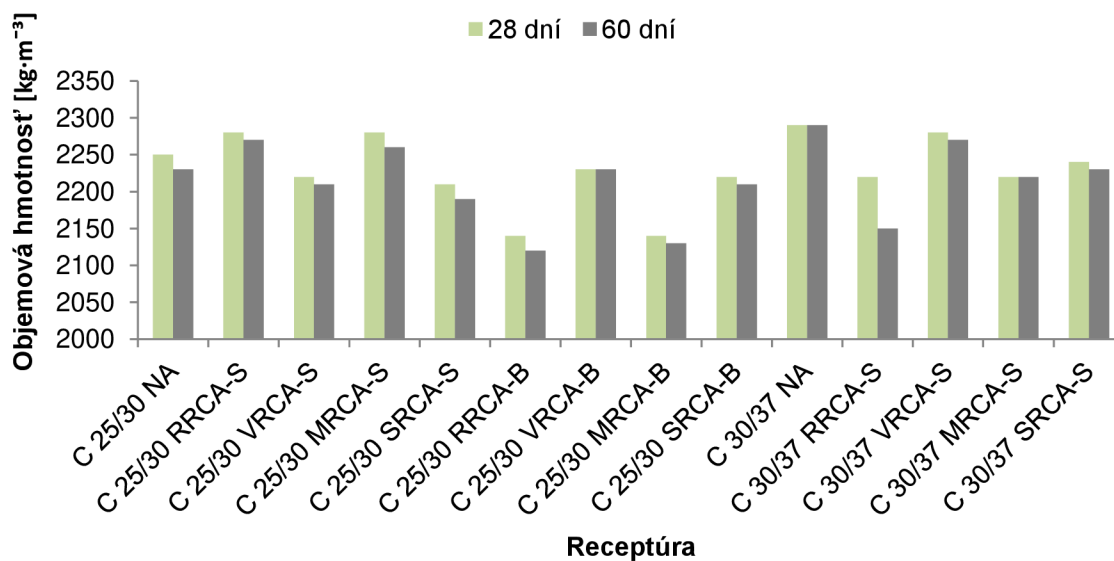
Telesá vytvorené z jednotlivých zámesí boli po 24 hodinách odformované a vložené do normového prostredia podľa ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Po 25 dňoch boli trámce určené na zmrazovanie vložené na 3 dni do vodnej lázne. Prvou etapou skúšania boli kockové telesá vyzreté po 28 dňoch, skúšané na objemovú hmotnosť zatvrdnutého betónu (D_{ZB}) a pevnosť v tlaku (R_c). Na trámcoch bola takisto stanovená objemová hmotnosť, pevnosť v ťahu za ohybu (R_b) referenčných telies a následne boli telesá určené k zmrazovaniu vložené do zmrazovacieho agregátu na 100 cyklov. Druhá etapa sa skladala z otestovania telies dozrievaných 60 dní v normovom prostredí. Bolo zároveň ukončené zmrazovanie a rozmrazovanie trámcov, takže sa určili ich rozmery a váha kvôli stanoveniu objemovej hmotnosti a úbytku prípadne nárastu hmotnosti Δ m oproti referenčným vzorkám. Ďalším krokom bolo stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu, pevnosti v tlaku na zlomkoch trámcov a určenie vhodnosti tejto zmesi na mrazuvzdornosť. Všetky skúšky zatvrdlého betónu prebiehali v súlade s normami uvedenými v tabuľke 12. Vyššie spomenuté hodnoty sú uvedené prehľadne v tabuľkách 9 a 10. Pre všetky receptúry pevnostnej triedy C 30/37 boli vyrezané vzorky pre posúdenie mikroštruktúry.

6.1 Objemová hmotnosť zatvrdlého betónu a pevnosti v tlaku

Tabuľka 9: Vyhodnotenie výsledkov zatvrdlého betónu

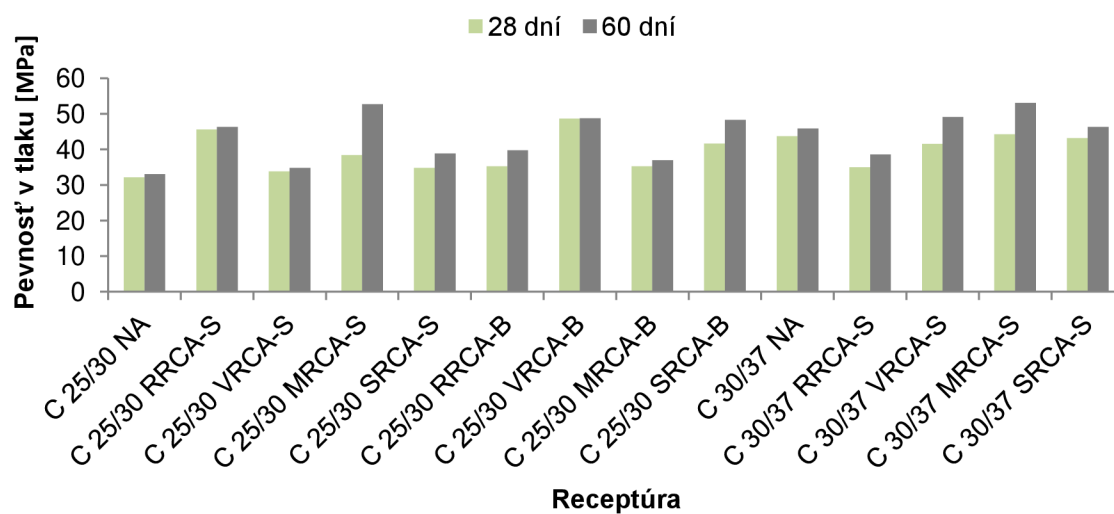
Označenie zmesi	D_{ZB} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		R_c [MPa]		Požiadavok na triedu pevnosti
	28 dní	60 dní	28 dní	60 dní	
C 25/30 NA	2250	2230	32,1	33,0	VYHOVUJE
C 25/30 RRCA-S	2280	2270	45,6	46,3	
C 25/30 VRCA-S	2220	2210	33,8	34,8	
C 25/30 MRCA-S	2280	2260	38,4	52,7	
C 25/30 SRCA-S	2210	2190	34,8	38,9	
C 25/30 RRCA-B	2140	2120	35,3	39,8	
C 25/30 VRCA-B	2230	2230	48,7	48,8	
C 25/30 MRCA-B	2140	2130	35,3	37,0	
C 25/30 SRCA-B	2220	2210	41,7	48,3	
C 30/37 NA	2290	2290	43,7	45,9	
C 30/37 RRCA-S	2220	2150	35,0	38,6	
C 30/37 VRCA-S	2280	2270	41,6	49,1	
C 30/37 MRCA-S	2220	2220	44,3	53,1	
C 30/37 SRCA-S	2240	2230	43,2	46,3	

Objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu stanovená na kockách



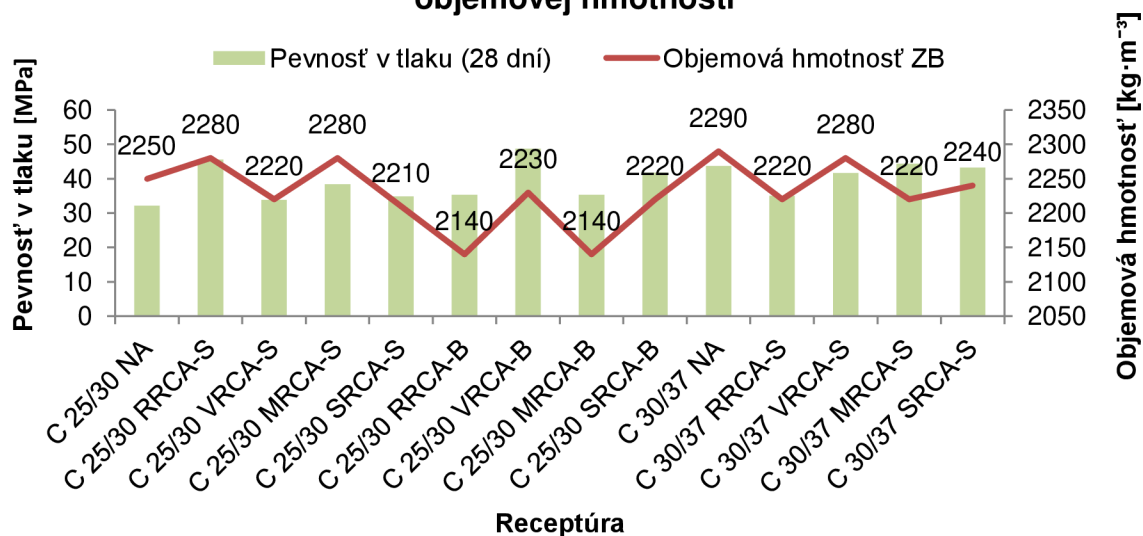
Graf 18: Porovnanie objemových hmotností po 28 a 60 dňoch zrenia

Pevnosť v tlaku zatvrdnutého betónu stanovená na kockách



Graf 19: Dosiahnuté pevnosti v tlaku po 28 a 60 dňoch

Vzťah pevnosti v tlaku zatvrdnutého betónu k jeho objemovej hmotnosti



Graf 20: Závislosť pevnosti v tlaku a objemovej hmotnosti od druhu prímеси a kameniva

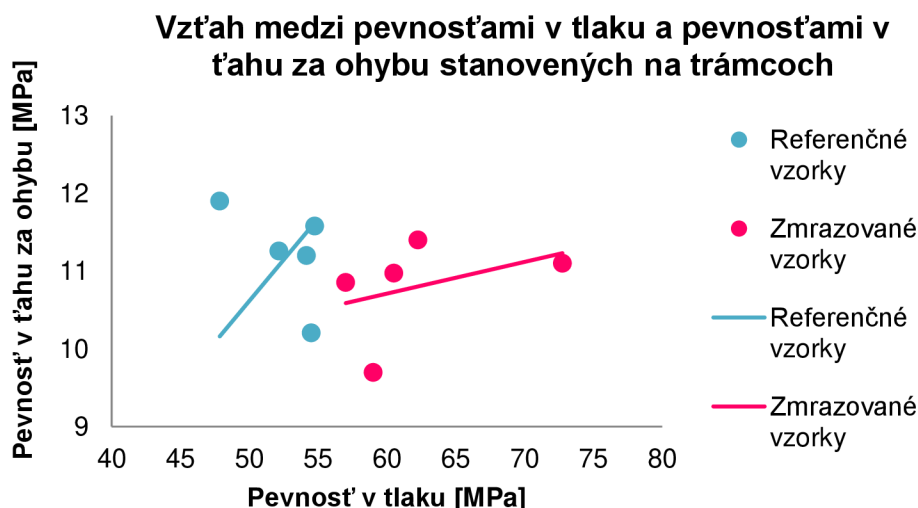
6.2 Mrazuvzdornosť

Všetky betónové trávce 100 × 100 × 400 mm boli zvážené a zmerané. Referenčné trávce sa podrobili skúške ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku na zlomkoch. Tieto hodnoty budú na konci porovnávané so zmrazovanými telesami. Vzorky určené pre zmrazovacie cykly boli vložené do mraziaceho zariadenia na 50 cyklov. Zmrazovací cyklus sa skladá z štyroch hodín zmrazovania (-15 až -20 °C) a z dvoch hodín rozmrazovania vo vode pri teplote +20 °C. Po absolvovaní tohto procesu sa trávce zväžia, zmerajú a podstúpia namáhanie na ťah za ohybu a následné namáhanie na tlak. Výsledkom je určenie úbytku hmotnosti v % a koeficientu mrazuvzdornosti (pomer hodnôt aritmetického priemeru pevnosti v ťahu za ohybu zmrazovaných a referenčných trávcev musí byť väčší ako 75 %). Hodnoty získané skúškou mrazuvzdornosti sú uvedené v tabuľke č. 10 a pevnostné charakteristiky sú zaznamenané do grafu č. 21.

Tabuľka 10: Stanovenie mrazuvzdornosti

Označenie zmesi	Δm [%]	Koeficient mrazuvzdornosti [%]	Požiadavok na mrazuvzdornosť pre 50 cyklov
C 30/37 NA	-0,37	95	VYHOVUJE
C 30/37 RRCA-S	-0,38	92	
C 30/37 VRCA-S	-0,05	98	
C 30/37 MRCA-S	-0,38	99	
C 30/37 SRCA-S	+0,27	98	

Δm . . . úbytok (-) alebo nárast (+) hmotnosti trávca pred a po 50 cykloch zmrazovania



Graf 21: Korelácia pevností v ťahu za ohybu a tlaku určených na referenčných a zmrazovaných trámcoch

Pevnosti v ťahu za ohybu stanovené na trámcoch majú stúpajúci trend vo vzťahu k pevnostiam v tlaku (graf 21). Tento jav bol očakávaný, jedinou zaujímavosťou je, že trámce, ktoré boli zmrazované, mali síce o niečo málo menšie pevnosti v ťahu za ohybu ako referenčné, no pevnosti v tlaku prevyšovali referenčné vzorky. Tento jav môže byť vysvetlený pridaním prímiesí, keďže pre zámes C 30/37 NA (bez prímiesí) bol nárast pevnosti v tlaku len o 5 %, zatiaľ čo pre všetky ostatné okolo 20 %. Ako bolo spomenuté v teoretickej časti tejto diplomovej práce, prímеси majú pomalý počiatkový vývoj pevností, ale majú zásadnejší vplyv na ich dlhodobý charakter. Prípustný je aj ľudský faktor, kedy mohlo dôjsť k nesprávnemu zhutneniu betónovej zmesi a tým rôznorodosti výsledkov. Na obrázku 26 sú zmrazované trámce po namáhaní na tlak a ťah za ohybu.



Obrázok 26: Zlomky trámcov

6.3 Mikroštruktúra

Pre posúdenie distribúcie pórov betónu bolo vybrané vždy jedno skúšobné teleso o hrane 150 mm z receptúr pevnostnej triedy C 30/37. Z ich stredu sa vyfrézovali hranoly o rozmeroch cca 100 × 150 × 20 mm, ktorých jedna strana sa vyleštila za mokra do hladka (obr. 27). Lesklý povrch sa zbavil nečistôt a aplikovalo sa na neho farbivo. Keď farbivo uschlo, do pórov sa vtrela biela zinková pasta, ktorá sa na záver pokryla sadrovým

práškom. Pozorovanie bolo sústredené na vzťah mikroprímesí k vlastnostiam betónového recyklátu a porovnanie užších rozmerových tried.



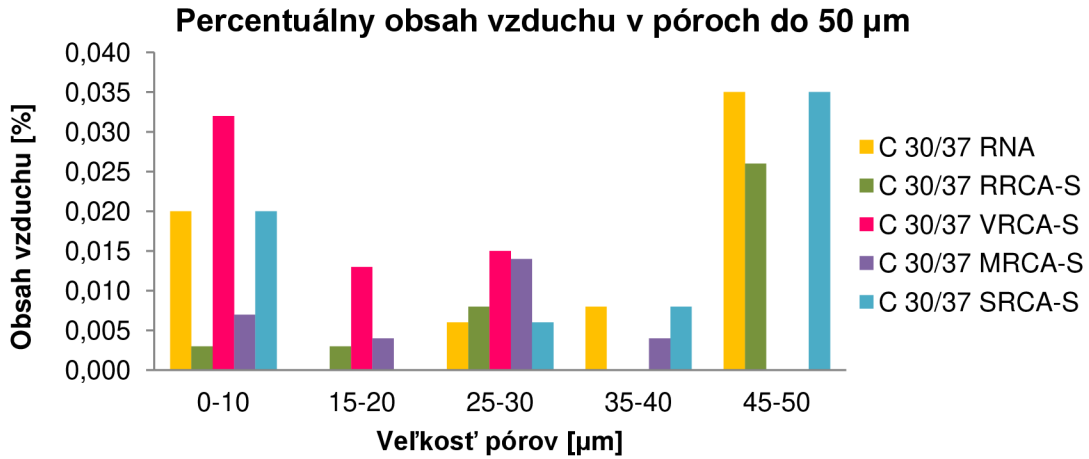
Obrázok 27: Vyleštené vzorky - zľava C 30/37 NA-S, RRCA-S, MRCA-S, VRCA-S, SRCA-S

Druhy pórov v cementovej matrici závisia od vnútorných (mineralogické zloženie - C_3S , C_2S , C_4AF ; jemnosť mletia; obsah vody a plastifikačných prísad) a vonkajších faktorov (teplota a tlak prostredia). [46]

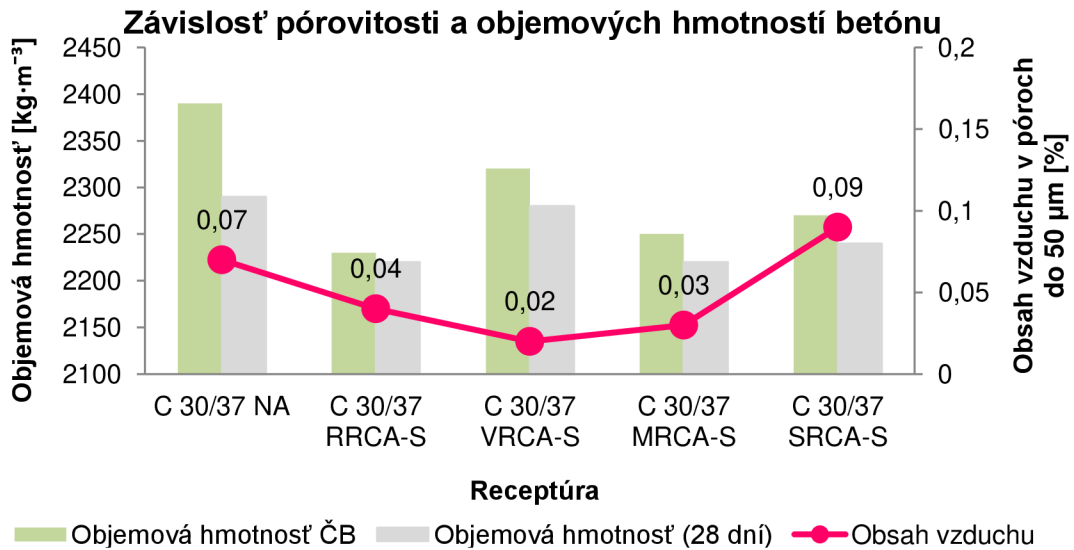
Rozlišujeme tri základné druhy pórov:

- gelové póry (2 - 4 nm) - sú v hydratačných produktoch nepriepustné pre prietoknú vodu
- kapilárne póry 0,01 - 10 μm - vznikajú odparením prebytočnej zámesovej vody v závislosti na vodnom súčiniteli
- technologické 0,05 - 2 mm - vznikajú uzavrením vzduchu pri spracovaní [47]

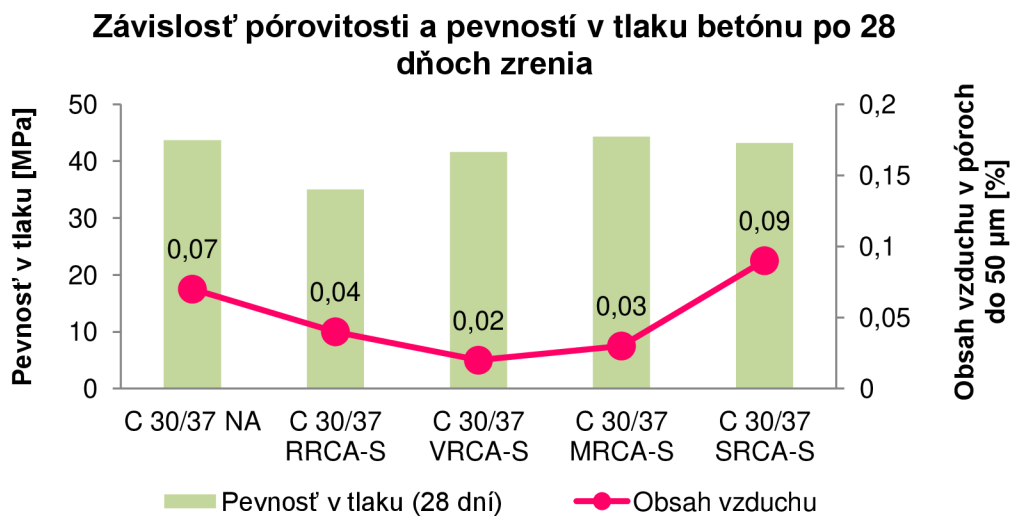
Pri posudzovaní mikroštruktúry betónu sa zohľadňovali veľkosti pórov do 50 μm , aby sa zistil vplyv prímiesí na pórovitosť a tranzitné zóny. V grafe 22 je znázornený stúpajúci trend obsahu vzduchu so zväčšujúcou sa veľkosťou pórov. Betónové zmesi boli pripravované za veľmi nízkych súčiniteľov a za použitia superplastifikátoru, čo môže mať tiež vplyv na distribúciu pórov. Keďže bol hľadaný vzájomný vzťah medzi pórovitou štruktúrou betónu a druhom prímiesi, v grafe 23 a 24 je táto korelácia znázornená.



Graf 22: Obsah vzduchu v jednotlivých receptúrach

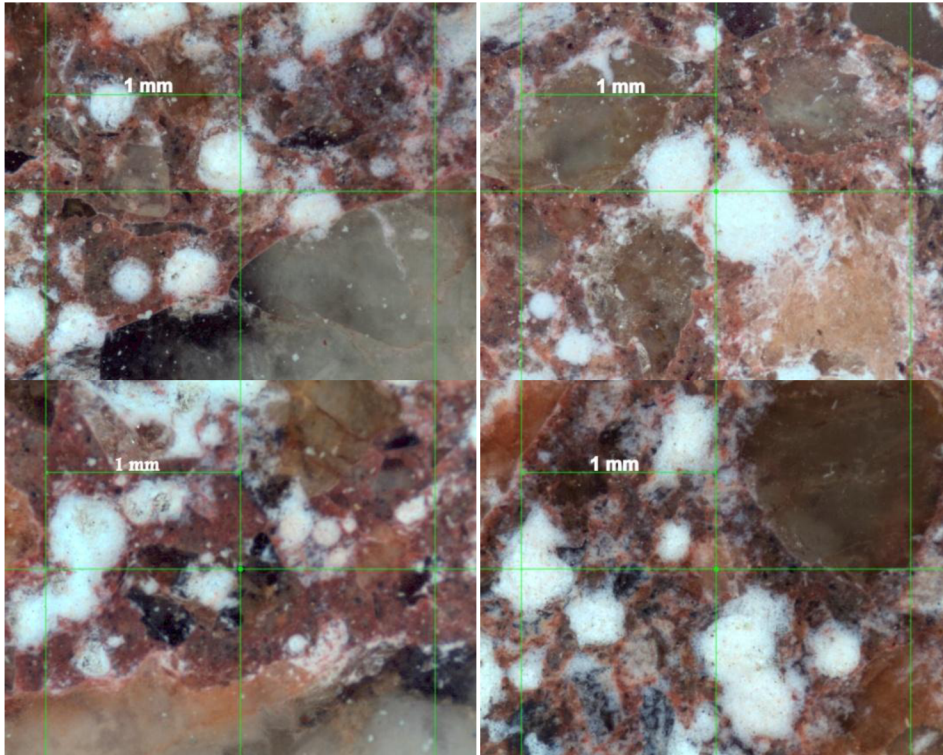


Graf 23: Celkový obsah vzduchu v póroch do 50 µm v porovnaní s objemovými hmotnosťami

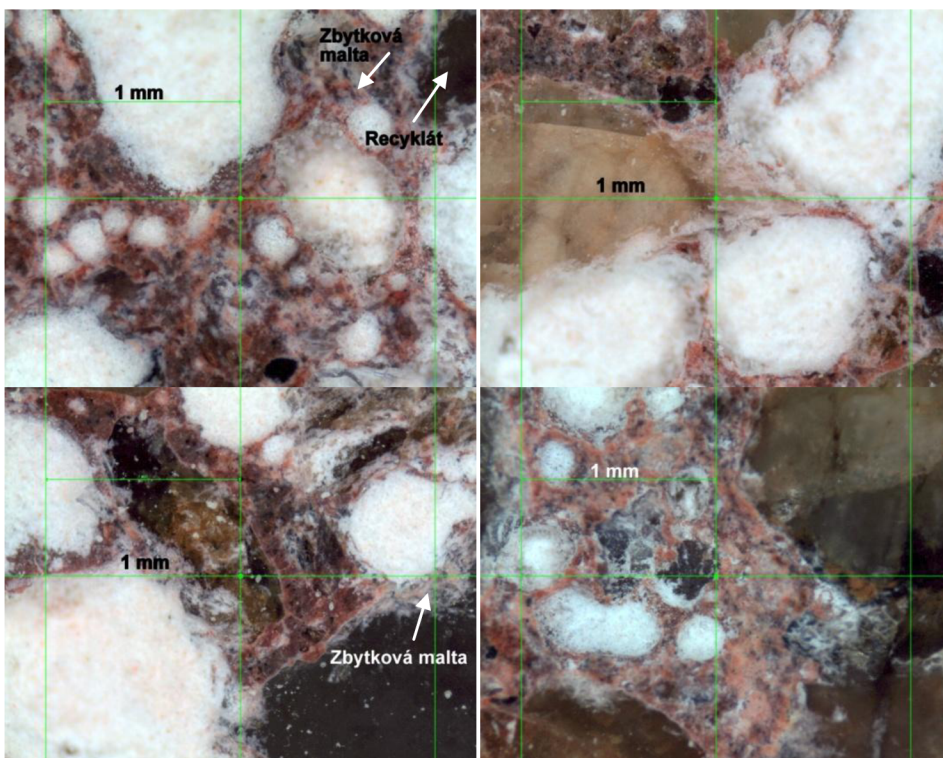


Graf 24: Vzťah obsahu vzduchu v póroch do 50 µm a pevnosti v tlaku

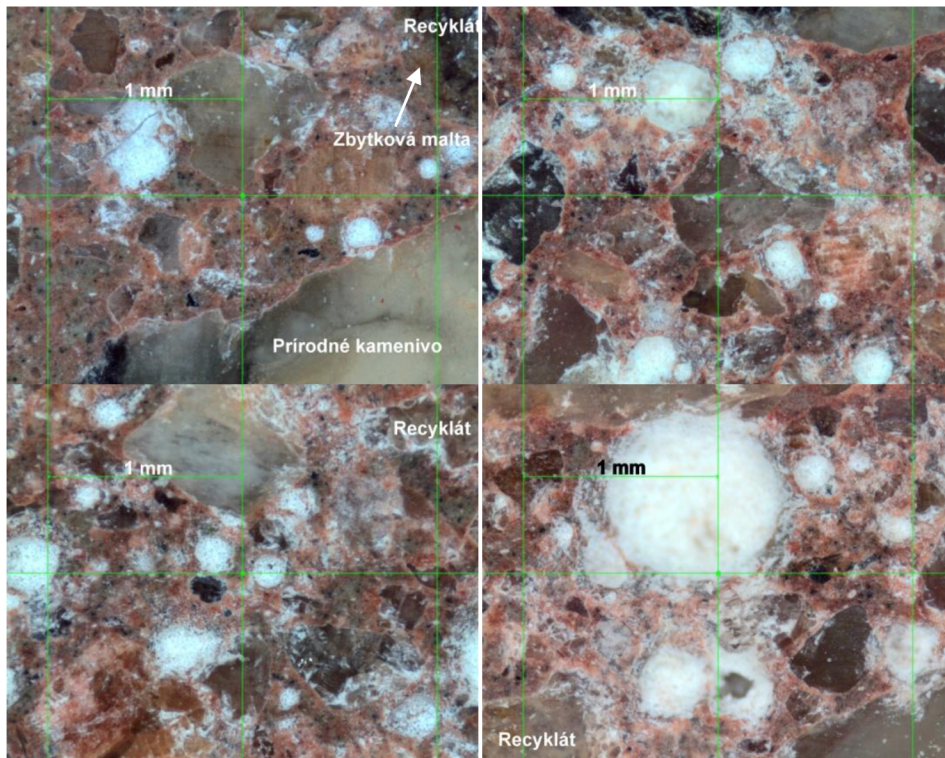
Nasledujúce obrázky č. 28 - 32 sú ukazateľmi pórovitosti jednotlivých receptúr a v niektorých prípadoch je možné rozoznať zrná recyklovaných betónov so zbytkovou CM. Najmä v prípade receptúry C 30/37 RRCA-S vidieť značné zhluky pórov, čo môže byť výsledkom vysokej nasiakavosti recyklátu alebo predĺženou dobou spracovania zmesi.



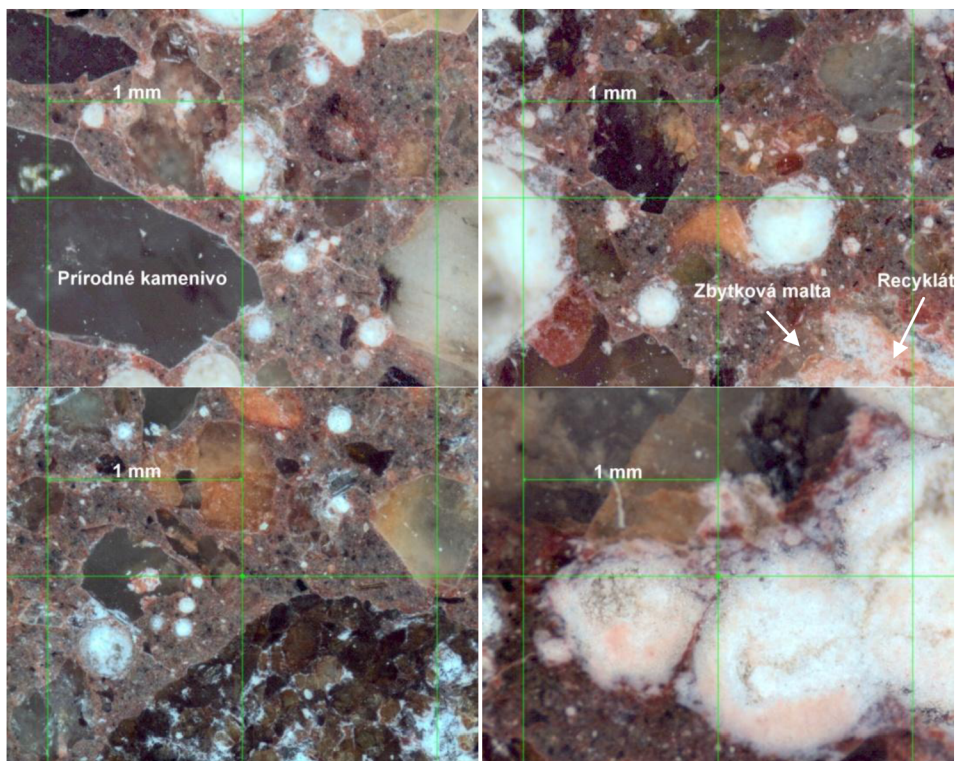
Obrázok 28: C30/37 NA



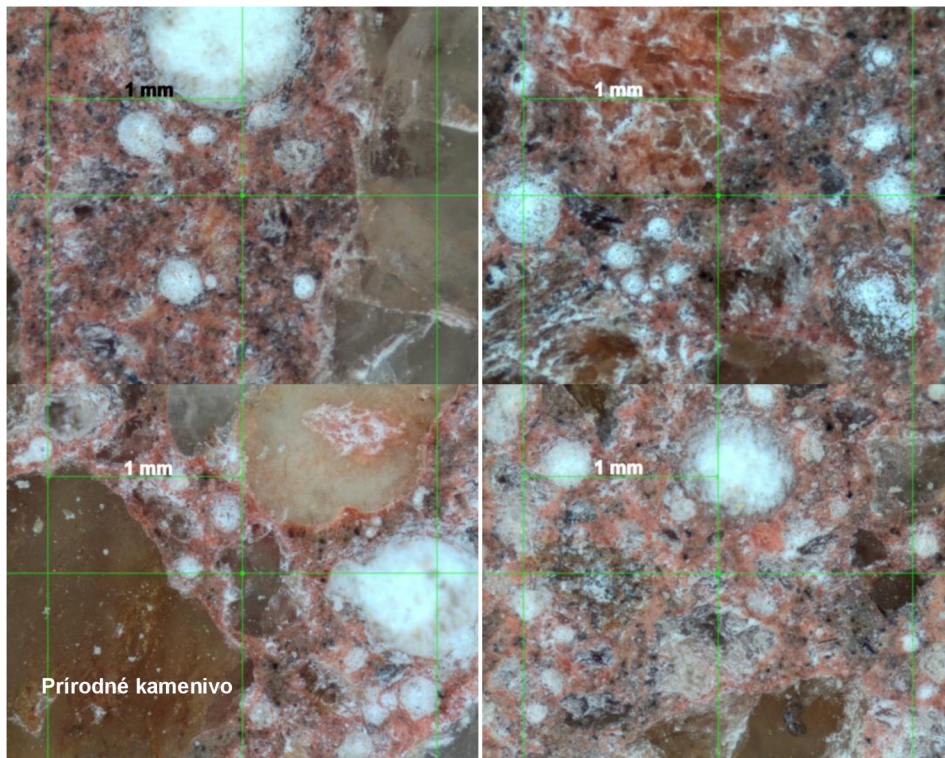
Obrázok 29: C 30/37 RRCA-S



Obrázok 30: C 30/37 VRCA-S



Obrázok 31: C 30/37 MRCA-S



Obrázok 32: C30/37 SRCA-S

6.4 Metóda párového porovnania - Fullerov trojuholník

6.4.1 Postup výpočtu

Prednosťou viackriteriálneho hodnotenia variant je predovšetkým uľahčenie práce riešiteľa pri hľadaní optimálneho výsledku v rozsiahlom súbore dát, zachovanie racionálneho postupu a explicitné vyjadrenie dôležitosti jednotlivých kritérií. Výsledok viackriteriálnych metód nemá úplne objektívny výsledok, pretože závisí od riešiteľa, aký veľký význam prikladá jednotlivým kritériám. Princíp Fullerovej metódy vychádza z preferenčných vzťahov dvojíc kritérií. Najprv sa vypíšu varianty (receptúry), z ktorých hľadáme optimálnu a označia sa A, B, C a pod. (tab. 11, 18). V ďalšom kroku sa vyberú kritéria, ktoré sú kľúčové pre správne určenie optima a označia sa 1, 2, 3 a pod. (tab. 12, 19). Rozhodovacia matica slúži na zobrazenie porovnávaných hodnôt kritérií a určenie maxima alebo minima kritéria (tab. 13, 20). Pre vyjadrenie preferencií slúži Fullerov trojuholník, ktorý sa skladá z dvojíc porovnávaných kritérií (tab. 14, 21). V trojuholníkovej matici sa riešiteľ rozhoduje, či je pre neho dôležitejšie kritérium uvedené v riadku alebo stĺpci. V prípade preferencie sa farebne označí kritérium a po doriešení celej matice sa spočítajú počty označení pre jednotlivé kritéria. Následne sa pristupuje k výpočtu váhy kritérií (tab. 15, 22) podľa vzťahu:

$$V_i = n + 1 - P_i$$

$$F_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

n počet preferencií

P_i poradie preferencií

V_i váha kritéria

F_i normovaná váha kritéria

Posledným krokom je tvorba výpočtovej matice (tab. 16, 23), výsledkom ktorej je poradie jednotlivých variant (tab. 17, 24). Ako optimálna varianta je tá, ktorá dosiahla najvyššiu hodnotu c_{ij} :

$$c_{ij} = F_i \cdot b_{ij}$$

$$b_{ij} = \begin{matrix} MAX \rightarrow \\ MIN \rightarrow \end{matrix} \frac{a_{ij} - \min(a_i)}{\max(a_i) - \min(a_i)}$$

$\min(a_i)$	minimálna hodnota kritéria
$\max(a_i)$	maximálna hodnota kritéria
a_{ij}	hodnota kritéria v danom stĺpci a riadku
b_{ij}	optimalizovaná hodnota kritéria
c_{ij}	výsledná zhoda s ideálnou variantou
MAX	požadované maximum daného kritéria
MIN	požadované minimum daného kritéria

Cieľom aplikácie tejto metódy je teda získanie optimálnej receptúry z hľadiska zloženia a dosiahnutých výsledných parametrov betónu. Optimálnou receptúrou rozumieme takú, ktorá sa najviac približuje ideálnej variante.

IDEÁLNA VARIANTA pri zadaných kritériách je taká, ktorá má:

- **maximálny obsah recyklovaného kameniva** (dôležitý parameter z hľadiska udržateľného rozvoja)
- **najvyššiu objemovú hmotnosť použitých kamenív** (slúži k zaisteniu kvality recyklátu, čím je ťažší, tým menej obsahuje cementovej malty)
- **minimálny objem zámesovej vody** (pre nižšiu pórovitosť systému)
- **minimálnu nasiakavosť použitého kameniva** (ďalší zo znakov kvality recyklátu)
- **maximálnu pevnosť v tlaku** po 60 dňoch normového zrenia (NZ)
- **minimálnu objemovú hmotnosť betónu** po 60 dňoch NZ.

6.4.2 Receptúra C 25/30

6.4.2.1 Vstupné údaje

Tabuľka 11: Výber variant

Označenie	Receptúra
A	C 25/30 NA
B	C 25/30 RRCA-S
C	C 25/30 VRCA-S
D	C 25/30 MRCA-S
E	C 25/30 SRCA-S
F	C 25/30 RRCA-B
G	C 25/30 VRCA-B
H	C 25/30 MRCA-B
I	C 25/30 SRCA-B

Tabuľka 12: Výber kritérií

č.	Vlastnosť	Jednotka
1	Obsah recyklovaného kameniva	%
2	Priemerná objemová hmotnosť použitého kameniva	kg/ 1 m ³ BZ
3	Objem vody	kg/ 1 m ³ BZ
4	Priemerná nasiakavosť použitého kameniva	%
5	Pevnosť v tlaku po 60 dňoch NZ	MPa
6	Objemová hmotnosť ztvrdlého betónu po 60 dňoch NZ	kg·m ⁻³

Tabuľka 13: Rozhodovacia matica

Číslo	Optimum	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	max	0	60	60	60	60	60	60	60	60
2	max	2510	2330	2330	2330	2330	2260	2260	2260	2260
3	min	205	143	180	144	160	141	180	174	168
4	min	1,0	3,6	3,6	3,6	3,6	5,0	5,0	5,0	5,0
5	max	33,0	46,3	34,8	52,7	38,9	39,8	48,8	37,0	48,3
6	min	2230	2270	2210	2260	2190	2130	2230	2130	2210

6.4.2.2 Výpočet

Tabuľka 14: Fulleroz trojuholník

1	1	1	1	1
2	3	4	5	6
2	2	2	2	
3	4	5	6	
3	3	3		
4	5	6		
4	4			
5	6			
5				
6				

Tabuľka 15: Výpočet váhy kritérií

č.	n	P _i	V _i	F _i
1	3	3	4	0,1818
2	2	4	3	0,1364
3	1	5	2	0,0909
4	4	2	5	0,2273
5	5	1	6	0,2727
6	1	5	2	0,0909
Σ			22	1,0000

Tabuľka 16: Výpočtová matica

č.	F _i	Opt.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0,1818	max	0,0000	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818
2	0,1364	max	13,6364	3,8182	3,8182	3,8182	3,8182	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0909	min	0,0000	8,8068	3,5511	8,6648	6,3920	9,0909	3,5511	4,4034	5,2557
4	0,2273	min	22,7273	7,9545	7,9545	7,9545	7,9545	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,2727	max	0,0000	18,4126	2,4919	27,2727	8,1680	9,4139	21,8736	5,5376	21,1814
6	0,0909	min	2,5974	0,0000	3,8961	0,6494	5,1948	9,0909	2,5974	9,0909	3,8961
Σ			38,9610	57,1739	39,8937	66,5414	49,7094	45,7776	46,2039	37,2137	48,5150

6.4.2.3 Vyhodnotenie Fullerovej metódy

Tabuľka 17: Poradie receptúr na základe optimalizačnej metódy

Označenie	Receptúra	Poradie
D	C 25/30 MRCA-S	1.
B	C 25/30 RRCA-S	2.
E	C 25/30 SRCA-S	3.
I	C 25/30 SRCA-B	4.
G	C 25/30 VRCA-B	5.
F	C 25/30 RRCA-B	6.
C	C 25/30 VRCA-S	7.
A	C 25/30 NA	8.
H	C 25/30 MRCA-B	9.

Výsledné poradie je znázornené v tabuľke 17 a 24. Najvhodnejšou variantou pre požadované kritériá je receptúra C 25/30 MRCA-S. V receptúre bola použitých 60% náhrada prírodného kameniva betónovým recyklátom Spiroll a 10 % mikrosiliky. Recyklované kamenivo zo Spirollu má vyššiu objemovú hmotnosť ako RCA Veľká Bíteš a preukazuje nižšie hodnoty nasiakavosti. Zároveň táto receptúra obsahuje jeden z najnižších objemov vody. Práve vďaka nízkemu obsahu vody nebola štruktúra zatvrdnutého betónu pórovitá, čím sa dosiahlo vyššej objemovej hmotnosti, ale zároveň najvyššej pevnosti v tlaku. Ďalším pozitívom je pôsobenie mikrosiliky ako pucolánovo aktívnej prímеси, čo

mohlo taktiež viesť k zlepšeniu vlastností betónu. Z vyššie uvedených dôvodov hodnotím výsledok optimalizácie za zdarný. Ako druhou najvhodnejšou variantou sa javí receptúra C 25/30 RRCA-S, ktorá je opäť z RCA Spiroll a neobsahuje žiadne prímеси. Tretie miesto obsadila znova receptúra s RCA Spiroll s prídavkom trosky - C 25/30 SRCA-S. Štvrté, piate a šieste miesto vyšli veľmi tesne a vo všetkých prípadoch bol obsiahnutý recyklát Velká Bíteš. Tieto betóny mali nižšiu objemovú hmotnosť, ale značne vysokú pevnosť v tlaku. Až doposiaľ je možné sledovať vplyv kvality recyklátu na optimalizáciu zloženia. Skutočne kvalitnejší recyklát dosahuje prvých priečok, zatiaľ čo menej kvalitný, priečok nižších. Výjimku tvorí receptúry C 25/30 VRCA-S a C 25/30 NA. V prípade kombinácie recyklátu Spiroll a vápenca bola zvýšená zámesová voda a pevnosť v tlaku aj napriek celkom obstojnej objemovej hmotnosti bola nízka v porovnaní s ostatnými receptúrami. Na predposlednom mieste sa umiestnila receptúra so 100% obsahom prírodného kameniva. Myslím si, že sa nejedná o chybu, naopak, zostavením daných kritérií by nemala táto receptúra predčiť tie s recyklátom a prímесami. C 25/30 NA mala najhoršie výsledky v objeme vody, pevnosti v tlaku a v neposlednom rade neobsahuje žiadne recykláty. Poslednou variantou je recyklát Velká Bíteš skombinovaný s mikrosilikou C 25/30 MRCA-B. Táto receptúra disponuje nízkou objemovou hmotnosťou, zrejme v dôsledku zvýšeného objemu zámesovej vody a tým pádom aj nízkou pevnosťou v tlaku a horšou kvalitou recyklátu, teda výsledok je očakávaný.

6.4.3 Receptúra C 30/37

Pre receptúry vyššej pevnostnej triedy bola rovnako vykonaná Fullerova metóda. Bol zachovaný výber kritérií kvôli možnosti porovnania s nižšou pevnostnou triedou.

6.4.3.1 Vstupné údaje

Tabuľka 18: Výber variant

Označenie	Receptúra
A	C 30/37 NA
B	C 30/37 RRCA-S
C	C 30/37 VRCA-S
D	C 30/37 MRCA-S
E	C 30/37 SRCA-S

Tabuľka 19: Výber kritérií

č.	Vlastnosť	Jednotka
1	Obsah recyklovaného kameniva	%
2	Priemerná objemová hmotnosť použitého kameniva	kg/ 1 m ³ BZ
3	Objem vody	kg/ 1 m ³ BZ
4	Priemerná nasiakavosť použitého kameniva	%
5	Pevnosť v tlaku po 60 dňoch NZ	MPa
6	Objemová hmotnosť ztvrdlého betónu po 60 dňoch NZ	kg·m ⁻³

Tabuľka 20: Rozhodovacia matica

Číslo	Optimum	A	B	C	D	E
1	max	0	30	30	30	30
2	max	221	2330	2330	2330	2330
3	min	136	133	146	141	157
4	min	1,0	3,6	3,6	3,6	3,6
5	max	45,9	38,6	49,1	53,1	46,3
6	min	2290	2150	2270	2220	2230

6.4.3.2 Výpočet

Tabuľka 21: Fulleroz trojuholník

1	1	1	1	1
2	3	4	5	6
2	2	2	2	
3	4	5	6	
3	3	3		
4	5	6		
4	4			
5	6			
5				
6				

Tabuľka 22: Výpočet váhy kritérií

č.	n	P _i	V _i	F _i
1	3	3	4	0,1818
2	2	4	3	0,1364
3	1	5	2	0,0909
4	4	2	5	0,2273
5	5	1	6	0,2727
6	1	5	2	0,0909
Σ			22	1,0000

Tabuľka 23: Výpočtová matica

č.	F_i	Opt.	A	B	C	D	E
1	0,1818	max	0,0000	18,1818	18,1818	18,1818	18,1818
2	0,1364	max	13,6364	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0909	min	7,9545	9,0909	4,1667	6,0606	0,0000
4	0,2273	min	22,7273	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,2727	max	13,7304	0,0000	19,7492	27,2727	14,4828
6	0,0909	min	0,0000	9,0909	1,2987	4,5455	3,8961
Σ			58,0486	36,3636	43,3964	56,0606	36,5607

6.4.3.3 Vyhodnotenie Fullerovej metódy

Tabuľka 24: Poradie receptúr na základe optimalizačnej metódy

Označenie	Receptúra	Poradie
A	C 30/37 NA	1.
C	C 30/37 MRCA-S	2.
D	C 30/37 VRCA-S	3.
B	C 30/37 SRCA-S	4.
E	C 30/37 RRCA-S	5.

V porovnaní s prvým optimalizačným procesom v kapitole 6.4.2, najlepšie výsledky dosiahla receptúra so 100% prírodným kamenivom. Táto receptúra síce nemala žiadne zastúpenie recyklátu a jej fyzikálno-mechanické vlastnosti ju predurčili na prvé miesto. Dosahovala nízkeho vodného súčiniteľa, čo sa odrazilo v pomerne vysokej objemovej hmotnosti. Pevnosť v tlaku bola takisto obstojná a k víťazstvu určite prispela aj nízka nasiakavosť kameniva. Tesne za ňou sa však nachádza zmes s mikrosilikou a potom vápencová zmes. Na posledných dvoch miestach sú receptúry SRCA-S a RRCA-S. Ich vlastnosti boli dosť podobné, preto aj ich vhodnosť výberu má podobnú hodnotu.

6.5 Rozbor zloženia receptúr z ekonomického hľadiska

Pri výrobe recyklovaného betónu je potrebné dbať na to, aby jeho výroba nebola ekonomicky viac náročná ako použitie prírodných kamenív, inak význam recyklovania zaniká. V tabuľke 25 a 26 uvádzam príklad jednoduchej kalkulácie betónovej zmesi jednotlivých receptúr. Obecne platí, že čím sú frakcie recyklátu menšie, znečistenejšie alebo širšej frakcie, tým nižšia je ich cena.

Tabuľka 25: Ceny jednotlivých komponent betónu

Položka	Priemerná cena s DPH* [Kč/t]
CEM I 42,5 R	3 200
0/4 TK prírodné	400
4/8 DK prírodné	550
4/8 DK recyklované	200
8/16 DK prírodné	520
8/16 DK recyklované	200
Voda	80
Plastifikačná prísada	110 000
Mikromletý vápenec	450
Mikrosilika	12 000
Vysokopecná troska	1 050

*ceny sú vypočítané ako priemer z viacerých zdrojov

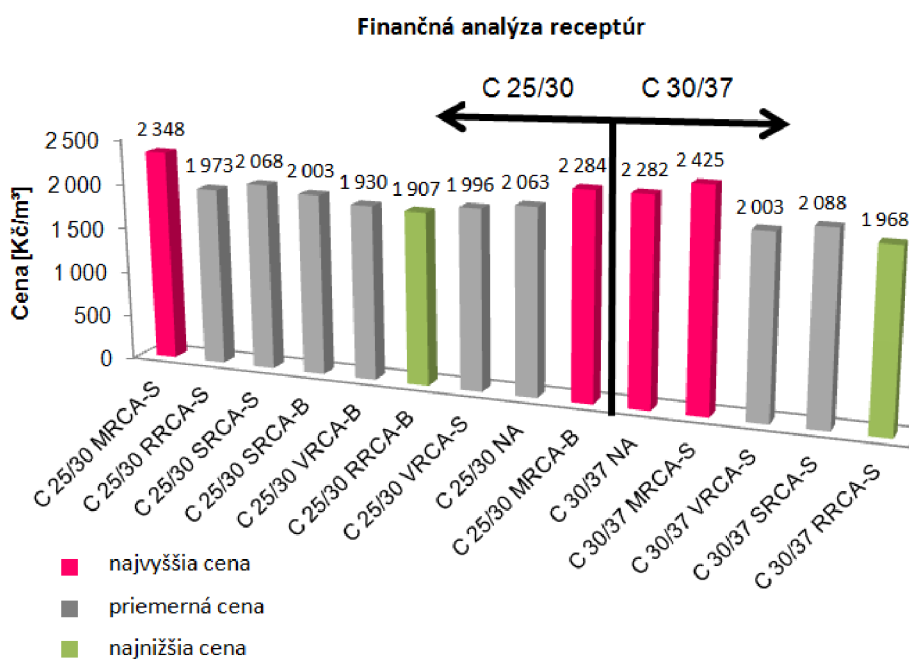
Tabuľka 26: Cena za 1 m³ betónovej zmesi pre jednotlivé receptúry (označená je najdrahšia)

Označenie zmesi	Predpokladaná cena** [Kč/1 m ³ betónovej zmesi]	
	bez DPH	s DPH
C 25/30 NA	1705	2 063
C 25/30 RRCA-S	1631	1 973
C 25/30 VRCA-S	1650	1 996
C 25/30 MRCA-S	1940	2 348
C 25/30 SRCA-S	1709	2 068
C 25/30 RRCA-B	1576	1 907
C 25/30 VRCA-B	1595	1 930
C 25/30 MRCA-B	1888	2 284
C 25/30 SRCA-B	1655	2 003
C 30/37 NA	1886	2 282
C 30/37 RRCA-S	1626	1 968
C 30/37 VRCA-S	1655	2 003
C 30/37 MRCA-S	2004	2 425
C 30/37 SRCA-S	1726	2 088

**cena zahrňuje iba náklady na materiál

6.6 Vyhodnotenie výsledkov

Boli stanovené objemové hmotnosti na zatvrdnutom betóne po 28 a 60 dňoch zrenia. Tieto hodnoty boli približne na rovnakej úrovni, receptúry C 25/30 RRCA-B, C 25/30 MRCA-B a C 30/37 RRCA-S dosiahovali najnižších cifier. V závislosti na objemovej hmotnosti boli sa vyvíjali aj pevnosti v tlaku. Jednoznačným šampiónom v oboch pevnostných triedach sú receptúry s prídavkom mikrosiliky. Keďže v praxi je nutné dosiahnuť čo najlepších výsledkov, pri čo najmenších finančných nákladoch, pre vyhodnotenie ekonomickej stránky receptúr bol vytvorený graf 25, kde sú receptúry zoradené podľa najlepšie dosiahnutých výsledkov z kapitoly 6.4.2 a 6.4.3 a spočítaný predpoklad finančných nákladov. Medzi kritériami v rozhodovacej matici nebola zámerné uvedená cena, pretože je to len subjektívny odhad, podložený priemernými hodnotami, ktoré by mohli skresliť výber. Zo získaného grafického výsledku je možné vidieť, že síce receptúry, ktoré dosiahli prvých priečok sú z hľadiska dosiahnutých parametrov najoptimálnejšími, ale ich cenová relácia patrí medzi navyššie. Ideálnou sa v prípade pevnostnej triedy C 25/30 zdá byť druhá najoptimálnejšia receptúra C 25/30 RRCA-S, ktorá neprevyšuje vlastnosti tej prvej, ale dostáva sa na prvé priečky vďaka priaznivejšej cene. Čo sa týka pevnostnej triedy C 30/37, prvé miesto si udržala receptúra s prírodným kamenivom. Je vidieť z tabuľky č. 23, že rozdiel medzi prvým a druhým miestom sú približne 2 %, keď sa však na misky váh prihodí ešte cena, receptúra C 30/37 si svoje miesto definitívne utvrdí. Možnou alternatívou je aj C 30/37 VRCA, ktorá síce má o cca 15 % horšie vlastnosti, za to po finančnej stránke dosahuje minimálnych hodnôt.



Graf 25: Predpoklad finančných nákladov pre receptúry oboch pevnostných tried

Záver

Zadaním tejto diplomovej práce bolo optimalizovať zloženie betónu tak, aby bolo využitá náhrada prírodného kameniva recyklovaným betónom. Mnohé výskumy potvrdili túto substitúciu, avšak pre dosiahnutie požadovaných parametrov betónu s recyklátom je potrebné zohľadniť nehomogenitu daného kameniva a s tým spojené nejednotné výsledné vlastnosti. Téma diplomovej práce bolo rozdelené do dvoch častí, teoretickej a experimentálnej. Hneď na úvod je ujasnenie situácie na stavebnom trhu z pohľadu trvale udržateľného rozvoja.

Cieľom teoretickej časti bol heslovitý opis známych minerálnych prímiesí, ktorú boli použité v praktickej časti a teda mikrosiliky, mletého vápenca a vysokopecnej trosky. Zo zahraničnej literatúry boli pozbierané poznatky z použitia betónových recyklátov v spojení s mikroprímiesami. V tejto časti je nutné podotknúť, že mnohé z nich opisovali ako najvhodnejšiu prímies popolček, mikrosiliky a čiastočne vysokopecnú trosku. Keďže popolček samotný sa stáva skôr nedostatkovou surovinou ako prebytočným odpadom, v praktickej časti bol miesto neho vybraný mletý vápenec. Vo všeobecnosti je toto netradičné spojenie betónového recyklátu a mletého vápenca celkom obtiažne nájsť v databáze výskumov. Centrom záujmu v teoretickej časti však bol samotný betónový recyklát, problematika jeho využitia v dopravných stavbách, zameranie na jeho mikroštruktúru, s tým spojené poznanie jeho tranzitných zón a metódy ich skvalitnenia.

S bohatou teoretickou základňou bola tvorená časť experimentálna, kde sa získané vedomosti aplikovali. Bol vytvorený chronologický postup jednotlivých úkonov. Ako prvé sa podrobili skúšaniam kameniva a recykláty. Stanovila sa krivka zrnitosti síťovým rozborom, objemová hmotnosť a nasiakavosť. Obsah síranov a chloridov bol zisťovaný iba u recyklátu Velká Bíteš. Následne sa vybral druh cementu, plastifikačnej prísady a nakoniec samotné prímiesi. Bolo vytvorených 14 receptúr, ktoré boli následne skúšané na konzistenciu, objemovú hmotnosť ČB a ZB, pevnosti v tlaku. Skúška pevnosti v ťahu za ohybu, pórovitosti a mrazuvzdornosti boli vykonané iba pre pevnostnú triedu C 30/37. Na záver praktickej časti bola vypočítaná najoptimálnejšia zmes jednotlivých pevnostných tried pomocou Fullerovej metódy a tá bola porovnaná s predpokladanou cenou. Ako bolo spomenuté v kapitole 6.6, cena nemohla byť zahrnutá do kritérií výberu najoptimálnejšej varianty, pretože to bola len priemerná hodnota, ktorá by mohla skresliť výsledky. Takto boli najvhodnejšie zmesi vybrané len na základe reálne dosiahnutých charakteristík.

Na základe tejto diplomovej práce môžu byť vyvedené nasledujúce závery:

- I. Nasiakavosť recyklátov je závislá od ich objemovej hmotnosti a kvality drtiaceho procesu, teda množstve zbytkovej malty, ktorou je obalené zrno. Objemová hmotnosť recyklovaného kameniva klesá s veľkosťou frakcie. Kvalita recyklátu Spiroll je o niečo lepšia ako Velkej Bíteše.
- II. Čerstvý betón je ovplyvnený kvalitou recyklátu a druhom prímеси. Odhadnúť množstvo vody pre správnu konzistenciu, je obtiažnejšie ako u prírodných kamenív bez prímеси. Príkladom sú zmesi C 20/25 RRCA-S, C 30/37 RRCA-S a C 30/37 SRCA-S. Tieto zmesi boli vytvorené s nízkym vodným súčiniteľom, ale stupeň sadnutia kužeľa mali najvyšší. V prípade prvých dvoch zmesí by tento jav mohol byť vysvetlený neprítomnosťou prímеси, ktoré by vyplnili dokonalejšie krivku zrnitosti a tým by sa zaistila nižšia konzistencia. Zmes C 30/37 SRCA-S musela byť zrejme nesprávne zhutnená tyčou pri skúške sadnutím kužeľa alebo pridanie trosky zlepšilo konzistenciu čerstvého betónu.
- III. Receptúry s mikrosilikou dosahovali rýchlejšie zatuhnutie zmesi ako bez nej. Keďže mikrosilika zvyšuje nepriepustnosť a pevnosť betónu, aj na obrázku z mikroskopu č. 31 je vidieť ucelenejšia štruktúra s minimálnym výskytom pórov a mikrotrhlín. Výskumy ukazujú, že povlak z mikrosiliky má významný vplyv na recyklované kamenivo z betónu.
- IV. Všetky betónové zmesi vyhoveli požiadavku na triedu kockovej pevnosti v tlaku a zodpovedajú vzájomnému vzťahu medzi objemovou hmotnosťou zatvrdlého betónu a pevnosťou v tlaku a to síce, že s nárastom objemovej hmotnosti ZB sa zvyšuje pevnosť v tlaku.
- V. Všetky receptúry triedy C 30/37 vyhoveli odolnosti voči mrazu - 50 cyklov.
- VI. Najväčší obsah vzduchu v oblasti 0-50 μm má zmes C 30/37 SRCA-S, čím by sa aj vysvetlilo, že naozaj nedostatočné zhutnenie zmesi stálo za zhoršenou konzistenciou. Napriek mierne zvýšenej pórovitosti v oblasti do 50 μm tejto zámesi môžeme v grafe č. 24 vidieť pomerne vysoké pevnosti v tlaku.
- VII. Na úrovni 50 μm je možné zlepšiť tranzitné zóny v betóne a ako vyplýva z grafu 23 najlepší vplyv na pórovitosť betónov s recyklátom je po pridaní mletého vápenca alebo mikrosiliky. Ak použijeme menšiu veľkosť zrna prímеси, než veľkosť cementu, vytvorí sa obal na zrnkách cementu, ktorý môže zlepšiť spracovateľnosť a zvýšiť pevnosti betónu.

- VIII. Vplyv prímiesí na zlepšenie tranzitných zón bol preukázaný. Receptúra bez prímiesí C 30/37 RRCA na obrázku 29 má značne rozsiahle póry v betóne, hlavne okolo zbytkovej malty recyklátu, zatiaľ čo množstvo pórov v ostatných receptúrach s prímiesami a recyklátom vykazuje menšie hodnoty. Čo sa týka dvojitej úlohy mletého vápenca, v tomto prípade plnil funkciu jemného filleru.
- IX. Najvhodnejším výberom zmesi pre nižšiu pevnostnú triedu je 60 % recyklátu Spiroll spolu s 10 % mikrosiliky - C 25/30 MRCA-S, ktorá po zohľadnení ekonomického faktora sa stáva najdrahšou, preto je vhodnejšie zvoliť receptúru takisto s recyklátom Spiroll, no bez akejkoľvek prímiesí - C 25/30 RRCA-S, ktorá má priaznivú cenu a vlastnosti výrazne podobné.
- X. Pevnostná trieda C 30/37 bohužiaľ nepresadila ako najvhodnejšiu variantu receptúru s recyklátom. Na základe zadaných požadaviek, sa najviac hodí receptúra bez recyklovaných kamenív a prímiesí - C 30/37 NA. Veľmi tesne za ňou je zmes 30 % recyklovaného kameniva Spiroll, s prídavkom 10 % mikrosiliky, značenú ako C 30/37 MRCA-S. Ak by sa rozhodovalo podľa ceny, tak betón s prírodným kamenivom vyhrá, ak by sa ale malo rozhodnúť na základe dobrého pomeru cena výkon a zároveň využitie recyklátu, vyhrala by zmes C 30/37 VRCA-S, teda 30 % recyklátu Spiroll s 20 % mletého vápenca.
- XI. Prírodné kamenivo a mikrosilika tvoria najdrahšie zmesi. Keďže za prírodné kamenivo by sme mohli použiť betónový recyklát, je predmetom ďalšieho skúmania, nájsť alternatívnu prímies o rovnakých vlastnostiach ako má mikrosilika.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] VODIČKA, Jan (ed.) a Jaroslav VÝBORNÝ (ed.). *Waste utilization, recycled materials in the building industry: Využití odpadních hmot a recyklátů ve stavebnictví*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 132 s. ISBN 978-80-01-04734-7.
- [2] C.S Poon, Z.H Shui, L Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 18, Issue 6, July 2004, Pages 461-468, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.
- [3] Wengui Li, Jianzhuang Xiao, Zhihui Sun, Shiho Kawashima, Surendra P. Shah, Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches, *Construction and Building Materials*, Volume 35, October 2012, Pages 1045-1055, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022>.
- [4] Hongru Zhang, Yuxi Zhao, Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 101, Part 1, 30 December 2015, Pages 861-877, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.084>.
- [5] Valerie Spaeth, Assia Djerbi Tegguer, Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Volume 2, Issue 2, December 2013, Pages 143-152, ISSN 2212-6090, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.03.003>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609014000144>)
- [6] Marta Sánchez de Juan, Pilar Alaejos Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 872-877, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808001086>)
- [7] A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, M.H. Zhang, C.T. Tam, T.W.J. Foo, Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 8, August 2011, Pages 3469-3479, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811000845>)
- [8] [online]. [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://www.al-mo.cz/vetrne-tridice-a-mikromlyny#lightbox>
- [9] [online]. [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/4892263/#>
- [10] Eva Skriňáková *Studium možností využití kameniva z recyklovaných betonů pro výrobu konstrukčních betonů*. Brno, 2014. 80 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

- [11] Vivian W.Y. Tam, C.M. Tam, K.N. Le, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 50, Issue 1, March 2007, Pages 82-101, ISSN 0921-3449, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344906001431>)
- [12] KATZ, Amnon. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2004,16(6): 597-603 [cit. 2015-10-22]. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597). ISSN 0899-1561. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282004%2916%3A6%28597%29>
- [13] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 6, June 2005, Pages 1195-1203, ISSN 0008-8846, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604004788>)
- [14] Chaofeng Liang, Tiejun Liu, Jianzhuang Xiao, Dujian Zou, Qiuwei Yang, The damping property of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 102, Part 1, 15 January 2016, Pages 834-842, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.026>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306541>)
- [15] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 6, June 2005, Pages 1180-1186, ISSN 0008-8846, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.042>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888460400362X>)
- [16] Özgür Çakır, Ömer Özkan Sofyanlı, Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete, *HBRC Journal*, Volume 11, Issue 2, August 2015, Pages 157-166, ISSN 1687-4048, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.06.002>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404814000431>)
- [17] GHAFARI, Ehsan, Aasiyah Baig, Kevin Nicoletta², Dimitri Feys, Raissa Douglas Ferron a Kamal H. Khayat. *Admixture Compatibility of Alternative Supplementary Cementitious Materials for Pavement and Structural Concrete* [online]. Missouri: A National University Transportation Center at Missouri University of Science and Technology, 2014, Pages 60 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/R366%20Final%20Report.pdf>
- [18] TALERO, R., C. PEDRAJAS a V. RAHHAL. Performance of Fresh Portland Cement Pastes – Determination of Some Specific Rheological Parameters. *Rheology - New Concepts, Applications and Methods* [online]. InTech, 2013 [cit. 2015-12-27]. DOI: 10.5772/53761. ISBN 978-953-51-0953-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/rheology-new-concepts-applications-and-methods/performance-of-fresh-portland-cement-pastes-determination-of-some-specific-rheological-parameters>

- [19] L.P. Singh, S.R. Karade, S.K. Bhattacharyya, M.M. Yousuf, S. Ahalawat, Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review, *Construction and Building Materials*, Volume 47, October 2013, Pages 1069-1077, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813004509>)
- [20] Deyu Kong, Ting Lei, Jianjun Zheng, Chengchang Ma, Jun Jiang, Jing Jiang, Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 5, May 2010, Pages 701-708, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003754>)
- [21] Monalisa Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 68, 15 October 2014, Pages 501-516, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814007181>)
- [22] [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.kds.sk/-recyklacia-stavebneho-odpadu>
- [23] ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu. Brno, 2013. 133 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavení, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..
- [24] F. Pacheco-Torgal, S. Miraldo, Y. Ding, J.A. Labrincha, Targeting HPC with the help of nanoparticles: An overview, *Construction and Building Materials*, Volume 38, January 2013, Pages 365-370, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.013>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200596X>)
- [25] [online]. [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.fasvoboda.cz/recyklaty/>
- [26] POSPÍŠIL, Karel a Radka RÁKOSNÍKOVÁ. *Podmínky použití recyklovaných materiálů* [online]. Centrum dopravního výzkumu, sekce dopravní infrastruktury, Brno, ČR, , 10 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.cdv.cz/file/clanek-podminky-pouziti-recyklovanych-materialu/>
- [27] JAHREN, Per a Tongbo SUI. *Concrete and sustainability*. Boca Raton: Taylor and Francis, CRC Press, 2014, xxi, 440 pages. ISBN 9781466592490.
- [28] KRŽÍŽOVÁ, Klára. Studium závislostí složení betonů na hodnoty modulů pružnosti : disertační práce. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2013. 154 s. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[29] ŠILER, P. Studium vlivu chemických modifikujících přísad a příměsí na vlastnosti vysokohodnotných betonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 130 s. Školitel doc. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.

[30] Martin Berčík Možnosti využití různých druhů příměsí v technologii stříkaných betonů. Brno, 2014. 65 s., 73 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D

[31] Recycled Concrete Aggregate Federal Highway Administration National Review: Summary of Texas Recycled Concrete Aggregate Review. *Federal Highway Administration* [online]. [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rcatx.cfm>

[32] MELICHAR, Tomáš a David PROCHÁZKA. Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC: Impact study of fine-grained additives from alternative raw materials sources for HSC physico-mechanical parameters. *Beton - Technologie, Konstrukce, Sanace*. 2011, 11(6), 66-73. ISSN 1213-3116.

[33] Shi-cong Kou, Chi-sun Poon, Francisco Agrela, Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 8, September 2011, Pages 788-795, ISSN 0958-9465, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946511000989>)

[34] Valeria Corinaldesi, Giacomo Moriconi, Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 8, August 2009, Pages 2869-2876, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809000713>)

[35] Ö. Çakır, Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives, *Construction and Building Materials*, Volume 68, 15 October 2014, Pages 17-25, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.032>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814006515>)

[36] H. Kasami, M. Hosino, T. Arasima a H. Tateyasiki. *Use of Recycled Concrete Powder in Self-Compacting Concrete* [online]. In: 2001 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10590>

[37] Caijun Shi, Yake Li, Jiake Zhang, Wengui Li, Linlin Chong, Zhaobin Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, Part 1, 20 January 2016, Pages 466-472, ISSN 0959-6526, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.

- [38] Antonios Kanellopoulos, Demetrios Nicolaidis, Michael F. Petrou, Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 53, 28 February 2014, Pages 253-259, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.102>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813011355>)
- [39] Mohammad Saeed Pourtahmasb and Mohamed Rehan Karim, "Utilization of Recycled Concrete Aggregates in Stone Mastic Asphalt Mixtures," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, Article ID 902307, 9 pages, 2014. doi:10.1155/2014/902307
- [40] Vivian W. Y. Tam a C. M. Tam. *Difference between Crushed Aggregate Properties from Combined and Individual Waste Sources* [online]. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: http://www98.griffith.edu.au/dspace/bitstream/handle/10072/15146/Applications_of_RA3.pdf?sequence=1
- [41] H. Dilbas, M. Şimşek, Ö. Çakır, An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume, *Construction and Building Materials*, Volume 61, 30 June 2014, Pages 50-59, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002207>)
- [42] JUNG, Youn su, Dan ZOLLINGER, Moon VON a Andrew WIMSATT. Texas transportation institute. *Subbase and subgrade performance investigation for concrete pavement* [online]. Texas, 2009, 98 s. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://d2dtl5nnlpr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/0-6037-1.pdf>
- [43] Babatunde James Olawuyi a William Peter Boshoff. Influence of Particle Size Distribution on Compressive Strength and Elastic Modulus of High Performance Concrete. *International Conferece on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa* [online]. 2013, 832 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: https://www.academia.edu/2645983/Influence_of_Particle_Size_Distribution_on_Compressive_Strength_and_Elastic_Modulus_of_High_Performance_Concrete
- [44] RAMACHANDRAN, V. *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2nd ed. Park Ridge, N. J., U.S.A.: Noyes Publications, 1995, 657, 1153 p. ISBN 0815513739.
- [45] Tilo Proske, Stefan Hainer, Moien Rezvani, Carl-Alexander Graubner, Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents — Mix design principles and laboratory tests, *Cement and Concrete Research*, Volume 51, September 2013, Pages 38-46, ISSN 0008-8846, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.011>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461300094X>)
- [46] Rovnaníková, P. a kol. *Stavební chemie. Modul 1. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2005*
- [47] Jeff Thomas a Hamlin Jennings. *The Pore System and Classification of Pores: Classification of pores and features in concrete* [online]. [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph7_2.html

Zoznam použitých skratiek a symbolov

NA	prírodné kamenivo (z angl. natural aggregate)
RCA	recyklované kamenivo z betónu (z angl. recycled concrete aggregate)
HRM	termicko-mechanická metóda (z angl. Heating & Rubbing method)
SDO	stavebne-demoličný odpad
ITZ	styčná tranzitná zóna (z angl. interfacial transition zone)
RCAC	betón s kamenivom z recyklovaného betónu (z angl. recycled concrete aggregate concrete)
NAC	betón s prírodným kamenivom (z angl. natural aggregate concrete)
CB	cementobetónový (kryt)
TK	ťažné kamenivo
DK	drtené kamenivo
DRK	drtené recyklované kamenivo
CM	cementová malta
D _{ČB}	objemová hmotnosť čerstvého betónu
D _{ZB}	objemová hmotnosť zatvrdlého betónu
R _b	pevnosť v ťahu za ohybu
R _c	pevnosť v tlaku
Δm	rozdiel v hmotnosti telies pred a po zmrazovaní
ρ_p	objemová hmotnosť kameniva stanovená vo valci
NZ	normové zrenie
P _i	poradie od najpočetnejších hodnôt
V _i	váha kritéria
F _i	normovaná váha kritéria
n	počet preferencií
BZ	betónová zmes
SEM	rastrovací elektrónový mikroskop
ASTM	American Society of Testing Materials

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Výpis noriem.....	32
Tabuľka 2: Objemová hmotnosť kamenív a recyklátov	37
Tabuľka 3: Nasiakavosti recyklovaných kamenív	38
Tabuľka 4: Percentuálne zastúpenie chloridov a síranov v RCA Velká Bíteš	39
Tabuľka 5: Vysvetlivky pre jednotlivé receptúry.....	42
Tabuľka 6: Výpis jednotlivých receptúr	43
Tabuľka 7: Výsledky skúšky sadnutia kužeľa.....	46
Tabuľka 8: Objemové hmotnosti čerstvého betónu.....	48
Tabuľka 9: Vyhodnotenie výsledkov zatvrdlého betónu.....	50
Tabuľka 10: Stanovenie mrazuvzdornosti	52
Tabuľka 11: Výber variant	61
Tabuľka 12: Výber kritérií.....	61
Tabuľka 13: Rozhodovacia matica	61
Tabuľka 14: Fullerov trojuholník	61
Tabuľka 15: Výpočet váhy kritérií	62
Tabuľka 16: Výpočtová matica	62
Tabuľka 17: Poradie receptúr na základe optimalizačnej metódy.....	62
Tabuľka 18: Výber variant	63
Tabuľka 19: Výber kritérií.....	64
Tabuľka 20: Rozhodovacia matica	64
Tabuľka 21: Fullerov trojuholník	64
Tabuľka 22: Výpočet váhy kritérií	64
Tabuľka 23: Výpočtová matica	65
Tabuľka 24: Poradie receptúr na základe optimalizačnej metódy.....	65
Tabuľka 25: Ceny jednotlivých komponent betónu	66
Tabuľka 26: Cena za 1 m ³ betónovej zmesi pre jednotlivé receptúry	66

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Rozdiel medzi prírodným a recyklovaným kamenivom v betóne [21]	18
Obrázok 2: Schéma využívania stavebných materiálov v pozemných komunikáciách	19
Obrázok 3: Tranzitné zóny v betóne [4]	23
Obrázok 4: Zobrazenie tranzitných zón na reálnom príklade [14]	23
Obrázok 5: Trhliny a dutiny v zbytkovej malte a v tranzitnej zóne [14]	24
Obrázok 6: Čeľusťový drtič (vľavo) a guľový mlyn (vpravo)[8][9]	26
Obrázok 7: Princíp termicko-mechanickej metódy [10]	27
Obrázok 8: Zariadenie pre mikrovlnnú metódu (vľavo generátor mikrovlnného žiarenia, vpravo komora s RCA)[7]	28
Obrázok 9: Vľavo kamennivo pred mikrovlnnou metódou vpravo kamennivo po mikrovlnnej metóde [7]	28
Obrázok 10: Vysvetlivky symbolov použitých v nasledujúcich postupoch[13]	28
Obrázok 11: Normálny postup miešania betónu[13]	29
Obrázok 12: Dvojfázový postup miešania betónu[13]	29
Obrázok 13: Nezaplnené trhliny v mikroštruktúre betónu s RCA pri normálnom postupe miešania [13]	29
Obrázok 14: Zaplnené trhliny v mikroštruktúre betónu s RCA pri dvojfázovom miešaní	29
Obrázok 15: Tranzitná zóna RCA pri normálnom postupe miešania betónu [13]	30
Obrázok 16: Tranzitná zóna RCA pri dvojfázovom miešaní betónu [13]	30
Obrázok 17: Betónový recyklát frakcia 0/4 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll	33
Obrázok 18: Betónový recyklát frakcia 4/8 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll	33
Obrázok 19: Betónový recyklát frakcia 8/16 mm - vľavo Velká Bíteš, vpravo Spiroll	34
Obrázok 20: Betónový recyklát frakcia 16/22 mm Velká Bíteš	34
Obrázok 21: Mikrosilika	
Obrázok 22: Mikromletý vápenec	
Obrázok 23: Vysokopecná troska	40
Obrázok 24: Približne polovičné množstvo naplnených foriem	46
Obrázok 25: Ukážka konzistencie betónu	47
Obrázok 26: Zlomky trámocov	53
Obrázok 27: Vyleštené vzorky - zľava C 30/37 NA-S, RRCA-S, MRCA-S, VRCA-S, SRCA-S	54
Obrázok 28: C30/37 NA	56

Obrázok 29: C 30/37 RRCA-S	56
Obrázok 30: C 30/37 VRCA-S	57
Obrázok 31: C 30/37 MRCA-S	57
Obrázok 32: C30/37 SRCA-S	58

Zoznam grafov

Graf 1: Vývoj technológie betónu 2000-2020[19]	12
Graf 2: Eco-friendly betón [45]	13
Graf 3: Limity optimálnej krivky zrnitosti recyklovaného kameniva-ASTM D 2940-03 ..	21
Graf 4: Zrnitosť a merný povrch betónových komponent[24]	21
Graf 5: Optimálna krivka zrnitosti frakcie mletého malty s 15% nahradením cementu vápencom 8/V	22
Graf 6: Závislosť indexu poškodenia a tlmiaceho koeficientu[14]	24
Graf 7: Krivka zrnitosti frakcie 0/4 mm Žabčice	34
Graf 8: Krivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Olbramovice	35
Graf 9: Krivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Olbramovice	35
Graf 10: Krivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Spiroll	35
Graf 11: Krivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Spiroll	36
Graf 12: Krivka zrnitosti frakcie 4/8 mm Velká Bíteš	36
Graf 13: Krivka zrnitosti frakcie 8/16 mm Velká Bíteš	36
Graf 14: Porovnanie objemových hmotností kamenív	38
Graf 15: Porovnanie vlastností recyklátov	38
Graf 16: Konzistencia jednotlivých zámesí	47
Graf 17: Porovnanie objemových hmotností čerstvého betónu	48
Graf 18: Porovnanie objemových hmotností po 28 a 60 dňoch zrenia	51
Graf 19: Dosiagnuté pevnosti v tlaku po 28 a 60 dňoch	51
Graf 20: Závislosť pevností v tlaku a objemovej hmotnosti od druhu prímеси a kameniva	52
Graf 21: Korelácia pevností v ťahu za ohybu a tlaku určených na referenčných a zmrazovaných trámcoch	53
Graf 22: Obsah vzduchu v jednotlivých receptúrach	55
Graf 23: Celkový obsah vzduchu v póroch do 50 µm v porovnaní s objemovými hmotnosťami	55
Graf 24: Vzťah obsahu vzduchu v póroch do 50 µm a pevností v tlaku	55
Graf 25: Predpoklad finančných nákladov pre receptúry oboch pevnostných tried	67

Príloha č. 1 - Protokol o chemickom rozboře recyklátu Velká Bíteš



LABTECH s.r.o., Zkušební laboratoře č. 1147 akreditovaná ČIA

zkušební laboratoř Brno
Polní 23/340, 639 00 Brno



L 1147

PROTOKOL O ZKOUŠCE Č. B 10887/2015

Strana: 1
Stran celkem: 1

Zákazník: VUT v Brně fakulta stavební
Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Veveří 95
602 00 Brno

Analyzovaný materiál: silikát

Datum příjmu: 21.7.2015

Odběr provedl: Zákazník

Datum analýz: 21.7.2015 - 27.7.2015

Č. vzorku **Označení vzorku**
B6533 **B.recykláž**

Parametr	jednotka	č.vzorku: B6533	NM	Identifikace zkušební metody		Akr
Sušina původního vzorku (105°C)	%	96,89	10%	GRA 03A:ČSN 720102,ČSN EN 14346,ČSN EN 480-8	(1)	A
Sírany vyjádřené jako SO ₃	% suš.	0,29	10%	SIL 16:ČSN 720117,ČSN EN 196-2,ČSN EN 1744-1	(1)	A
Chloridy	% suš.	0,11	20%	VOL 10B: ČSN EN 1015-17, ČSN EN 196-2	(1)	A
Nerozložitelný podíl HCl	% suš.	56,90	20%	SIL 05:ČSN 720107,ČSN EN 196-2	(1)	A
Vápník	mg/kg suš.	122000	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1)	A
CaO	% suš.	17,1	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1)	A
Mangan	mg/kg suš.	291	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1)	A
MnO	% suš.	0,038	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1)	A

Poznámka:

Pro stanovení kovů byl vzorek rozložen v kyselině chlorovodíkové.

Čísllice u označení zkušební metody označují pracoviště, na kterém byl parametr stanoven: 1-Labtech Brno, Polní 23/340, 639 00 Brno;
2-Labtech Paskov, Rudé armády 637,739 21 Paskov; 4-Labtech Klatovy, Pod Nemocnicí 683,339 01 Klatovy

Nejistota měření (NM) je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95% s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod spodní a nad horní mezi stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

Informace "Akr" rozlišuje akreditované (A) a neakreditované (N) standardní operační postupy (SOP). Zkoušky s uplatněným flexibilním rozsahem akreditace jsou označeny FRA. Akreditované zkoušky provedené v jiné laboratoři jako subdodávky jsou označeny SA.

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů uvedených výše.

Protokol nenahrazuje jiné dokumenty, např. správního charakteru a státního odborného dozoru.

Tento protokol může být reprodukován pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem laboratoře.

Protokol vystaven:
28.7.2015

Ing. Pavel Hradil
vedoucí Zkušební laboratoře Brno

Príloha č. 2 - Stanovenie distribúcie vzduchových pórov receptúry C 30/37 MRCA-S

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část póru, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená sloupcem 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 až 10	23	0.01917	0,0001178	162.70515	132.39110	$5,24 \times 10^{-7}$	0.007	0.01
	2	15 až 20	10	0.00833	0,0002749	30.31405	9.09492	$4,19 \times 10^{-6}$	0.004	0.01
	3	25 až 30	11	0.00917	0,0004320	21.21914	9.90052	$1,41 \times 10^{-5}$	0.014	0.02
	4	35 až 40	8	0.00667	0,0005890	11.31862	1.26635	$3,35 \times 10^{-5}$	0.004	0.03
	5	45 až 50	9	0.00750	0,0007461	10.05227	-3.78741	$6,54 \times 10^{-5}$	-0.025	0.00
	6	55 až 60	15	0.01250	0,0009032	13.83968	1.40187	$1,13 \times 10^{-4}$	0.016	0.02
	7	65 až 80	34	0.02833	0,0022780	12.43781	1.82758	$2,68 \times 10^{-4}$	0.049	0.07
	8	85 až 100	37	0.03083	0,0029060	10.61023	3.06449	$5,24 \times 10^{-4}$	0.161	0.23
	9	105 až 120	32	0.02667	0,0035340	7.54575	0.93993	$9,05 \times 10^{-4}$	0.085	0.31
	10	125 až 140	33	0.02750	0,0041630	6.60581	2.08344	$1,44 \times 10^{-3}$	0.300	0.61
	11	145 až 160	26	0.02167	0,0047910	4.52237	1.13921	$2,14 \times 10^{-3}$	0.244	0.86
	12	165 až 180	22	0.01833	0,0054190	3.38316	0.76504	$3,05 \times 10^{-3}$	0.233	1.09
	13	185 až 200	19	0.01583	0,0060476	2.61812	-0.00321	$4,19 \times 10^{-3}$	-0.001	1.09
	14	205 až 220	21	0.01750	0,0066760	2.62133	-0.11690	$5,58 \times 10^{-3}$	-0.065	1.03

(pokračování)

Príloha č. 2

(dokončení)

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část pórů, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená hodnotou ve sloupci 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	15	225 až 240	24	0.02000	0,0073040	2.73823	1.47767	$7,24 \times 10^{-3}$	1.070	2.10
	16	245 až 260	12	0.01000	0,0079330	1.26056	-0.10221	$9,20 \times 10^{-3}$	-0.094	2.00
	17	265 až 280	14	0.01167	0,0085610	1.36277	1.09070	$1,15 \times 10^{-2}$	1.254	3.26
	18	285 až 300	3	0.00250	0,0091890	0.27206	-0.24634	$1,41 \times 10^{-2}$	-0.347	2.91
	19	305 až 350	16	0.01333	0,0257200	0.51840	0.12492	$2,24 \times 10^{-2}$	0.280	3.19
	20	355 až 400	14	0.01167	0,0296500	0.39348	0.26940	$3,35 \times 10^{-2}$	0.902	4.09
	21	405 až 450	5	0.00417	0,0335800	0.12408	-0.07592	$4,77 \times 10^{-2}$	-0.362	3.73
	22	455 až 500	9	0.00750	0,0375000	0.20000	0.16757	$6,54 \times 10^{-2}$	1.096	4.82
	23	505 až 1000	23	0.01917	0,5910000	0.03243	0.02904	$5,24 \times 10^{-1}$	1.522	6.35
	24	1005 až 1500	4	0.00333	0,9837000	0.00339	0.00278	1,77	0.493	6.84
	25	1505 až 2000	1	0.00083	1,3760000	0.00061	0.00013	4,19	0.056	6.89
	26	2005 až 2500	1	0.00083	1,7690000	0.00047	0.00009	8,18	0.070	6.96
	27	2505 až 3000	1	0.00083	2,1620000	0.00039	0.00039	$1,41 \times 10^{+1}$	0.543	7.51
	28	3005 až 4000	0	0.00000	5,5020000	0.00000	0.00000	$3,35 \times 10^{+1}$	0.000	7.51

¹⁾ Hodnoty ve sloupci 1, 2, 5 a 8 jsou konstantní.

Príloha č. 3 - Stanovenie distribúcie vzduchových pórov receptúry C 30/37 SRCA-S

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část póru, které by mohly být zaznamenaný	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená sloupcem 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 až 10	60	0.05000	0,0001178	424.44822	369.88292	$5,24 \times 10^{-7}$	0.019	0.02
	2	15 až 20	18	0.01500	0,0002749	54.56530	33.34616	$4,19 \times 10^{-6}$	0.014	0.03
	3	25 až 30	11	0.00917	0,0004320	21.21914	-0.00328	$1,41 \times 10^{-5}$	-0.000	0.03
	4	35 až 40	15	0.01250	0,0005890	21.22241	0.00095	$3,35 \times 10^{-5}$	0.000	0.03
	5	45 až 50	19	0.01583	0,0007461	21.22146	8.30443	$6,54 \times 10^{-5}$	0.054	0.09
	6	55 až 60	14	0.01167	0,0009032	12.91704	-4.64223	$1,13 \times 10^{-4}$	-0.052	0.04
	7	65 až 80	48	0.04000	0,0022780	17.55926	7.23579	$2,68 \times 10^{-4}$	0.194	0.23
	8	85 až 100	36	0.03000	0,0029060	10.32347	2.07031	$5,24 \times 10^{-4}$	0.108	0.34
	9	105 až 120	35	0.02917	0,0035340	8.25316	0.44629	$9,05 \times 10^{-4}$	0.040	0.38
	10	125 až 140	39	0.03250	0,0041630	7.80687	1.71907	$1,44 \times 10^{-3}$	0.248	0.63
	11	145 až 160	35	0.02917	0,0047910	6.08780	3.31977	$2,14 \times 10^{-3}$	0.710	1.34
	12	165 až 180	18	0.01500	0,0054190	2.76804	-0.95245	$3,05 \times 10^{-3}$	-0.290	1.05
	13	185 až 200	27	0.02250	0,0060476	3.72048	1.22398	$4,19 \times 10^{-3}$	0.513	1.56
	14	205 až 220	20	0.01667	0,0066760	2.49650	-0.01354	$5,58 \times 10^{-3}$	-0.008	1.55

(pokračování)

Príloha č. 3

(dokončení)

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část pórů, které by mohly být zaznamenaný	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená hodnotou ve sloupci 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	15	225 až 240	22	0.01833	0,0073040	2.51004	1.35453	$7,24 \times 10^{-3}$	0.981	2.53
	16	245 až 260	11	0.00917	0,0079330	1.15551	0.27944	$9,20 \times 10^{-3}$	0.257	2.79
	17	265 až 280	9	0.00750	0,0085610	0.87607	0.15056	$1,15 \times 10^{-2}$	0.173	2.96
	18	285 až 300	8	0.00667	0,0091890	0.72551	0.23950	$1,41 \times 10^{-2}$	0.338	3.30
	19	305 až 350	15	0.01250	0,0257200	0.48600	0.14873	$2,24 \times 10^{-2}$	0.333	3.63
	20	355 až 400	12	0.01000	0,0296500	0.33727	0.16355	$3,35 \times 10^{-2}$	0.548	4.18
	21	405 až 450	7	0.00583	0,0335800	0.17371	0.10705	$4,77 \times 10^{-2}$	0.511	4.69
	22	455 až 500	3	0.00250	0,0375000	0.06667	0.04552	$6,54 \times 10^{-2}$	0.298	4.99
	23	505 až 1000	15	0.01250	0,5910000	0.02115	0.02030	$5,24 \times 10^{-1}$	1.064	6.05
	24	1005 až 1500	1	0.00083	0,9837000	0.00085	0.00085	1,77	0.150	6.20
	25	1505 až 2000	0	0.00000	1,3760000	0.00000	-0.00047	4,19	-0.197	6.01
	26	2005 až 2500	1	0.00083	1,7690000	0.00047	0.00047	8,18	0.385	6.39
	27	2505 až 3000	0	0.00000	2,1620000	0.00000	0.00000	$1,41 \times 10^{+1}$	0.000	6.39
	28	3005 až 4000	0	0.00000	5,5020000	0.00000	0.00000	$3,35 \times 10^{+1}$	0.000	6.39

¹⁾ Hodnoty ve sloupci 1, 2, 5 a 8 jsou konstantní.

Príloha č. 4 - Stanovenie distribúcie vzduchových pórov receptúry C 30/37 VRCA-S

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozeptí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část póků, které by mohly být zaznamenaný	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená sloupcem 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 až 10	95	0.07917	0,0001178	672.04301	617.47771	$5,24 \times 10^{-7}$	0.032	0.03
	2	15 až 20	18	0.01500	0,0002749	54.56530	31.41715	$4,19 \times 10^{-6}$	0.013	0.05
	3	25 až 30	12	0.01000	0,0004320	23.14815	10.41470	$1,41 \times 10^{-5}$	0.015	0.06
	4	35 až 40	9	0.00750	0,0005890	12.73345	-2.90342	$3,35 \times 10^{-5}$	-0.010	0.05
	5	45 až 50	14	0.01167	0,0007461	15.63687	-0.04810	$6,54 \times 10^{-5}$	-0.000	0.05
	6	55 až 60	17	0.01417	0,0009032	15.68497	0.32062	$1,13 \times 10^{-4}$	0.004	0.05
	7	65 až 80	42	0.03500	0,0022780	15.36435	7.90852	$2,68 \times 10^{-4}$	0.212	0.27
	8	85 až 100	26	0.02167	0,0029060	7.45584	1.79653	$5,24 \times 10^{-4}$	0.094	0.36
	9	105 až 120	24	0.02000	0,0035340	5.65931	-0.74633	$9,05 \times 10^{-4}$	-0.068	0.29
	10	125 až 140	32	0.02667	0,0041630	6.40564	1.18752	$1,44 \times 10^{-3}$	0.171	0.46
	11	145 až 160	30	0.02500	0,0047910	5.21812	3.21898	$2,14 \times 10^{-3}$	0.689	1.15
	12	165 až 180	13	0.01083	0,0054190	1.99914	0.07000	$3,05 \times 10^{-3}$	0.021	1.17
	13	185 až 200	14	0.01167	0,0060476	1.92914	0.93054	$4,19 \times 10^{-3}$	0.390	1.56
	14	205 až 220	8	0.00667	0,0066760	0.99860	-0.71279	$5,58 \times 10^{-3}$	-0.398	1.17

(pokračování)

Príloha č. 4

(dokončení)

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část pórů, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená hodnotou ve sloupci 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	15	225 až 240	15	0.01250	0,0073040	1.71139	0.13569	$7,24 \times 10^{-3}$	0.098	1.26
	16	245 až 260	15	0.01250	0,0079330	1.57570	0.60229	$9,20 \times 10^{-3}$	0.554	1.82
	17	265 až 280	10	0.00833	0,0085610	0.97341	-0.02416	$1,15 \times 10^{-2}$	-0.028	1.79
	18	285 až 300	11	0.00917	0,0091890	0.99757	0.70597	$1,41 \times 10^{-2}$	0.995	2.79
	19	305 až 350	9	0.00750	0,0257200	0.29160	0.06676	$2,24 \times 10^{-2}$	0.150	2.94
	20	355 až 400	8	0.00667	0,0296500	0.22485	0.05113	$3,35 \times 10^{-2}$	0.171	3.11
	21	405 až 450	7	0.00583	0,0335800	0.17371	0.08483	$4,77 \times 10^{-2}$	0.405	3.51
	22	455 až 500	4	0.00333	0,0375000	0.08889	0.06351	$6,54 \times 10^{-2}$	0.415	3.93
	23	505 až 1000	18	0.01500	0,5910000	0.02538	0.02199	$5,24 \times 10^{-1}$	1.152	5.08
	24	1005 až 1500	4	0.00333	0,9837000	0.00339	0.00278	1,77	0.493	5.57
	25	1505 až 2000	1	0.00083	1,3760000	0.00061	-0.00081	4,19	-0.338	5.23
	26	2005 až 2500	3	0.00250	1,7690000	0.00141	0.00064	8,18	0.525	5.76
	27	2505 až 3000	2	0.00167	2,1620000	0.00077	0.00062	$1,41 \times 10^{+1}$	0.873	6.63
	28	3005 až 4000	1	0.00083	5,5020000	0.00015	0.00015	$3,35 \times 10^{+1}$	0.507	7.14

¹⁾ Hodnoty ve sloupci 1, 2, 5 a 8 jsou konstantní.

Príloha č. 5 - Stanovenie distribúcie vzduchových pórov receptúry C 30/37 NA

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část póru, které by mohly být zaznamenány	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená sloupcem 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 až 10	57	0.04750	0,0001178	403.22581	388.06878	$5,24 \times 10^{-7}$	0.020	0.02
	2	15 až 20	5	0.00417	0,0002749	15.15703	-6.06211	$4,19 \times 10^{-6}$	-0.003	0.02
	3	25 až 30	11	0.00917	0,0004320	21.21914	4.24121	$1,41 \times 10^{-5}$	0.006	0.02
	4	35 až 40	12	0.01000	0,0005890	16.97793	2.45798	$3,35 \times 10^{-5}$	0.008	0.03
	5	45 až 50	13	0.01083	0,0007461	14.51995	5.29349	$6,54 \times 10^{-5}$	0.035	0.07
	6	55 až 60	10	0.00833	0,0009032	9.22645	-1.38227	$1,13 \times 10^{-4}$	-0.016	0.05
	7	65 až 80	29	0.02417	0,0022780	10.60872	2.29259	$2,68 \times 10^{-4}$	0.061	0.11
	8	85 až 100	29	0.02417	0,0029060	8.31613	1.24199	$5,24 \times 10^{-4}$	0.065	0.18
	9	105 až 120	30	0.02500	0,0035340	7.07414	1.46920	$9,05 \times 10^{-4}$	0.133	0.31
	10	125 až 140	28	0.02333	0,0041630	5.60493	1.95225	$1,44 \times 10^{-3}$	0.281	0.59
	11	145 až 160	21	0.01750	0,0047910	3.65268	-0.34560	$2,14 \times 10^{-3}$	-0.074	0.52
	12	165 až 180	26	0.02167	0,0054190	3.99828	1.65575	$3,05 \times 10^{-3}$	0.505	1.02
	13	185 až 200	17	0.01417	0,0060476	2.34253	-0.15398	$4,19 \times 10^{-3}$	-0.065	0.96
	14	205 až 220	20	0.01667	0,0066760	2.49650	-0.12763	$5,58 \times 10^{-3}$	-0.071	0.89

(pokračování)

Príloha č. 5

(dokončení)

Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Název sloupce	Třída	Rozpětí třídy	Zaznamenaný počet tětív ve třídě	Četnost tětív	Část póru, které by mohly být zaznamenaný	Možné maximum	Póry ve třídě	Objem póru	Obsah vzduchu	Souhrnný obsah vzduchu
Zdroj		Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	naměřeno C_i	Hodnota ve sloupci 3 dělená hodnotou T_{tot}	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 4 dělená hodnotou ve sloupci 5	Hodnota ve sloupci 6 minus následující hodnota ve sloupci 6	Hodnoty uvedené ve sloupcích 1, 2, 5 a 8 se nemění ¹⁾	Hodnota ve sloupci 7 vynásobená hodnotou ve sloupci 8 x 100	Souhrnný součet hodnot ve sloupci 9
Jednotky		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	15	225 až 240	23	0.01917	0,0073040	2.62413	0.62825	$7,24 \times 10^{-3}$	0.455	1.34
	16	245 až 260	19	0.01583	0,0079330	1.99588	0.43843	$9,20 \times 10^{-3}$	0.403	1.75
	17	265 až 280	16	0.01333	0,0085610	1.55745	0.46919	$1,15 \times 10^{-2}$	0.540	2.28
	18	285 až 300	12	0.01000	0,0091890	1.08826	0.53745	$1,41 \times 10^{-2}$	0.758	3.04
	19	305 až 350	17	0.01417	0,0257200	0.55080	-0.17994	$2,24 \times 10^{-2}$	-0.403	2.64
	20	355 až 400	26	0.02167	0,0296500	0.73075	0.35850	$3,35 \times 10^{-2}$	1.201	3.84
	21	405 až 450	15	0.01250	0,0335800	0.37225	0.15002	$4,77 \times 10^{-2}$	0.716	4.56
	22	455 až 500	10	0.00833	0,0375000	0.22222	0.16300	$6,54 \times 10^{-2}$	1.066	5.62
	23	505 až 1000	42	0.03500	0,5910000	0.05922	0.05244	$5,24 \times 10^{-1}$	2.748	8.37
	24	1005 až 1500	8	0.00667	0,9837000	0.00678	0.00435	1,77	0.771	9.14
	25	1505 až 2000	4	0.00333	1,3760000	0.00242	0.00007	4,19	0.028	9.17
	26	2005 až 2500	5	0.00417	1,7690000	0.00236	0.00158	8,18	1.296	10.47
	27	2505 až 3000	2	0.00167	2,1620000	0.00077	0.00077	$1,41 \times 10^{+1}$	1.087	11.55
	28	3005 až 4000	0	0.00000	5,5020000	0.00000	0.00000	$3,35 \times 10^{+1}$	0.000	11.55

¹⁾ Hodnoty ve sloupci 1, 2, 5 a 8 jsou konstantní.