

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

STUDIUM MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ KAMENIVA Z RECYKLOVANÝCH BETONŮ PRO VÝROBU KONSTRUKČNÍCH BETONŮ

STUDY THE POSSIBILITY OF USING RECYCLED AGGREGATE CONCRETE FOR THE
MANUFACTURE OF STRUCTURAL CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

EVA SKRIŇÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Eva Skriňáková

Název Studium možností využití kameniva z recyklovaných betonů pro výrobu konstrukčních betonů

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

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2013

Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

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

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

Podklady a literatura

- internetové stránky web of science, atd.
- zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých symposií
- diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2013

Zásady pro vypracování

V současné době, kdy začíná být deficit v těžbě přírodních kameniv, jejich cena vzrůstá a současně se zatěžuje ekologie, nabývá na důležitosti ve stavebnictví zajištění trvale udržitelného rozvoje. Tento může být výrazně pozitivně ovlivněn využíváním recyklací. Recyklace starých betonů jejich předrcením a vytříděním pro výrobu kameniva do betonu, nemá v ČR žádnou tradici. Je to do značné míry zapříčiněno nedostatkem výzkumných poznatků, praktickými zkušenostmi a i brzdící související legislativou. Proto významně negativně ovlivňuje i cenu staveb např. rekonstrukce dálnice D1, kde vzniknou výrazné objemy vybouraných betonů.

Cílem bakalářské práce bude zpracovat rozsáhlé rešerše z vědeckých prací hlavně z USA, Rakouska, SRN a Francie a praktických realizací recyklace betonů z dálničních krytů. Hlavní zájem je nutně upřít k možnostem využití do konstrukcí vozovek - nestmelené (MZK), či stmelené vrstvy (KSC, SC, betony či CB). Zjistit kvalitativní požadavky na recyklovaná kameniva, metodiky testování, rizika alkalicko-křemičité reakce v cementových kompozitech. Současně prověřit pevnostní třídy konstrukčních betonů, které lze dosáhnout a rizika použití v prostředí XF.

V praktické části ze vzorků recyklovaných kameniv hrubých frakcí z D1, či jiných zdrojů, navrhnete varianty KSC I a II, betony pevnostních tříd C16/20, C25/30 a C30/37 XF3. Na těchto kompozitech ověřte pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech NZ, u betonu XF3 i mrazuvzdornost a porovnejte s betony vyrobenými z přírodních hrubých kameniv lokality Olbramovice.

Rozsah práce je min. 45 stran.

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa venuje problematike využitia kamenív z recyklovanej betónovej sute. V úvode je rozvedený postup recyklácie betónu a spôsoby recyklovania čerstvého a zatvrdnutého kompozitu. Ďalej sú spomenuté fyzikálno-mechanické vlastnosti recyklovaného kameniva znovupoužitého do betónu a porovnanie s betónom z prírodného kameniva. Na konci teoretickej časti sú uvedené možnosti využitia recyklátu do podkladových vrstiev a cementobetónových krytov. Praktická časť je venovaná aplikácii recyklovaného kameniva do návrhu betónovej zmesi požadovanej triedy pevnosti a overeniu použitia do triedy prostredia XF3 a taktiež návrhu zmesi ztmelenej spojivom. Výsledkom praktickej časti je stanovenie vhodnosti použitia recyklátu pre návrh vyššie spomenutý.

Kľúčové slová

betón, kamenivo z recyklovaného betónu, prírodné zdroje, recyklačný proces, podkladové vrstvy, demolícia, stavebne demoličný odpad

Abstract

This bachelor's thesis is aimed on the issues of using aggregate from recycled concrete rubble. The introduction describes the possibilities of concrete recycling and methods for fresh and hardened composite recycling. Next mentioned are physical and mechanical properties of recycled aggregate reused in concrete and comparison with natural aggregate concrete. Last part of theoretical section presents the opportunities of using recycled concrete to sub-base layers and concrete pavements. The practical section is focused on the application of recycled concrete aggregate to design concrete mixture of required strength class and verifying the possibility of usage in the exposure class XF3 and also design hydraulically bound course. The results of the practical section is to determine the suitability of recycled concrete usage for concept mentioned above.

Key words

concrete, recycled concrete aggregate, natural resources, recycling process, sub-base layers, demolition, construction and demolition waste

Bibliografická citace VŠKP

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.

Prehlásenie:

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

V Brne dňa 30. 5. 2014

.....
podpis autora
Eva Skriňáková

Pod'akovanie

Chcela by som poďakovať prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. za prínosné rady a odborné vedenie pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Vďaka patrí aj Ing. Jaroslavovi Válkovi za ochotnú pomoc s legislatívou a zamestnancom laboratórií Ústavu THD FAST VUT v Brně, ktorí mi trpezlivo pomáhali pri praktickej časti. V neposlednej rade chcem poďakovať mojej rodine, ktorá ma neúfňhajúc podporovala počas celých štyroch rokov štúdia.

V Brne dňa 30. 5. 2014

Eva Skriňáková

Obsah

Úvod	11
I. Teoretická časť	12
1 Recyklácia v stavebníctve	12
1.1 Recyklácia betónu	12
1.1.1 Základné delenie recyklácie betónu	12
1.1.1.1 Rozdelenie recyklácie podľa odpadu	12
1.1.1.2 Rozdelenie recyklácie podľa miesta	13
1.2 Možnosti recyklácie betónu	13
1.2.1 Recyklácia čerstvého betónu	14
1.2.1.1 Betón bez odpadu	15
1.2.2 Recyklácia zatvrdnutého betónu	16
1.2.2.1 Mechanická recyklácia	16
1.2.2.2 Elektrohydroimpulzná technológia	18
1.2.2.3 Rezonančná technológia	19
1.2.2.4 ERO CDR metóda	19
1.2.2.5 Metóda ohrevu a trenia (Heating and rubbing method - HRM)	21
2 Recyklované kamenivo	22
2.1 Ekonomický pohľad na RCA v ČR	25
2.2 Vybrané fyzikálno-mechanické vlastnosti spojené s použitím RCA	26
2.2.1 Objemová hmotnosť	28
2.2.2 Pórovitosť a nasiakavosť	28
2.2.3 Mrazuvzdornosť	30
2.2.4 Reaktivita nezhydratovaného cementu v RCA	31
2.2.5 Vylúhovateľnosť škodlivín	31
2.2.6 Čistota RCA	32
2.3 Vplyv RCA na vlastnosti čerstvého betónu	35
2.4 Vplyv RCA na vlastnosti zatvrdnutého betónu	35
2.5 Využitie RCA	35
3 Pozemné komunikácie	38
3.1 Základné pojmy	38
3.1.1 Zemné teleso	38
3.1.2 Vozovka	38
3.1.2.1 Kryt	39
3.1.2.2 Podkladová vrstva	39
3.1.2.3 Ochranná vrstva	39

3.1.2.4	Pláň zemného telesa a podložie.....	40
3.2	Cementobetónové kryty (CB).....	40
3.2.1	Dlhodobé správanie CB s RCA.....	41
3.3	Podkladové vrstvy.....	43
3.3.1	Neztmelené vrstvy.....	43
3.3.2	Vrstvy zo zmesí ztmelených hydraulickými spojivami (S).....	45
3.3.2.1	Použitie RCA v zmesiach ztmelených hydraulickými spojivami.....	45
3.3.2.2	Požiadavky na kamenivo.....	47
4	Zhrnutie.....	48
II.	Experimentálna časť.....	49
1	Cieľ.....	49
2	Metodika.....	49
3	Použité suroviny.....	51
3.1	Kamenivo.....	51
3.1.1	Granulometria.....	51
3.1.2	Objemová hmotnosť a nasiakavosť kamenív.....	54
3.2	Cement.....	56
3.3	Voda.....	56
3.4	Prísady.....	56
3.5	Prímesi.....	56
4	Čerstvý betón.....	56
4.1	Receptúra.....	56
4.2	Konzistencia.....	58
4.3	Objemová hmotnosť čerstvého betónu.....	59
4.4	Zhrnutie výsledkov a diskusia.....	59
5	Zatvrdlý betón.....	60
5.1	Namerané hodnoty.....	60
5.2	Zhrnutie výsledkov a diskusia.....	62
6	Kamenivo ztmelené cementom.....	64
6.1	Granulometria.....	64
6.2	Receptúra.....	65
6.3	Optimálna vlhkosť.....	65
6.4	Namerané hodnoty.....	67
6.5	Zhrnutie výsledkov a diskusia.....	68
	Záver.....	70
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	77
	Zoznam tabuliek.....	78

Zoznam obrázkov	79
Zoznam grafov.....	80

Úvod

Stavebný priemysel je obrovským spotrebiteľom rôznych materiálov a zároveň najväčším producentom odpadu vznikajúceho z nich. Prírodné zdroje sú nedeliteľnou súčasťou stavebného priemyslu a to do značnej miery. Ich množstvo však nie je neobmedzené. Práve tento aspekt trápi ľudstvo za posledné roky a ženie ho k objavovaniu nových foriem nerastných surovín. Sú dve možnosti ako prírodné zdroje zachrániť, prestať ich ťažiť alebo vymyslieť ako efektívne naložiť už s použitými surovinami a vrátiť ich znova do výroby - zrecyklovať ich. Pri slove recyklácia sa asi každému vyjaví predstava plastovej fľaše alebo kovu, pritom recyklovať je možné takmer každý materiál, teda aj betón. Veľkými problémami ako to už pri sekundárnych surovinách býva je, že betónový recyklát nenadobúda rovnaké vlastnosti ako prírodné kamenivo, preto nachádza svoje použitie v menšej miere. Pri výrobe recyklovaného betónu je potrebné dbať na to, aby jeho výroba nebola ekonomicky viac náročná ako použitie prírodných kamenív, inak význam recyklovania zaniká.

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo napísať súhrnný rešerš so zameraním na možnosti použitia kameniva z recyklovaného betónu do konštrukčných betónov. V práci boli rozvedené metódy recyklácie a vlastnosti recyklátu. Pri spracovaní výskumov týkajúcich sa recyklovaného kameniva z betónu bola použitá hlavne zahraničná literatúra. Praktická časť mala za úlohu preveriť betónový recyklát ako náhradu za prírodné kamenivo v cementových kompozitoch.

I. Teoretická časť

1 Recyklácia v stavebníctve

Postupom času sa stavebný priemysel začína čoraz viac zaujímať o znovunavrátanie použitého materiálu do výroby a tým prispieť k šetreniu prírodných zdrojov. Hovoríme o tzv. recyklácii. „Podľa všeobecne prijatej definície predstavuje recyklácia rozsiahle opätovné navrátenie tuhých, kvapalných a plyných odpadových látok do obehu a opätovné využívanie odpadovej energie. Recykláciou v najširšom zmysle slova možno nazvať opätovné použitie akéhokoľvek materiálu. Recyklácia teda predstavuje postupy, pri ktorých sa vracajú vzniknuté odpady znovu do výroby, kde slúžia ako surovina pri výrobe nových výrobkov alebo ako zdroj energie.“ [1]

1.1 Recyklácia betónu

V poslednej dobe je trendom v stavebníctve uberať sa smerom ekologickým, čo znamená vyhľadávanie zdrojov surovín na báze recyklovaných materiálov. Betón patrí k najdôležitejším a najčastejšie používaným stavebným materiálom. Na druhú stranu jeho zvyšky sú odpadom, ktorý je náročný na ďalšie spracovanie, stáva sa teda problémom. Hľadanie spôsobu ako využiť odpad z jeho výroby a použitia sa preto stáva neodmysliteľnou súčasťou budúcnosti stavebného priemyslu. Koniec koncov dôvodov na jeho recyklovanie je mnoho, či už je to ochrana životného prostredia, prírodných zdrojov, trvalo udržateľný rozvoj alebo ekonomický faktor. Betónový recyklát však prináša aj radu komplikácií v súvislosti s jeho následným použitím.

1.1.1 Základné delenie recyklácie betónu

1.1.1.1 Rozdelenie recyklácie podľa odpadu

- a) Primárna - hovoríme o bezodpadovej technológii, ktorá využíva odpad priamo z miesta vzniku. V praxi to znamená, že pri výrobe nejakého materiálu sa odpad z tejto výroby znova použije do procesu alebo sa z neho vyrobí nový produkt.

Je to prípad recyklácie čerstvého betónu.

- b) Sekundárna - je to technológia, ktorá využíva na výrobu nového materiálu odpad, ktorý vznikol pri výrobe materiálu inej technológii. Môžeme si pod tým predstaviť

napríklad pridávanie popolčeka do betónovej zmesi. Takto použitý odpad nájde svoje uplatnenie, aj keď opätovné použitie vo výrobe, v ktorej vznikol, by nebolo možné.

- c) Terciárna - dalo by sa povedať, že táto recyklácia je najznámejšia širokej verejnosti najdlhšie, jedná sa totiž o recykláciu materiálov s ukončenou životnosťou, napr. použitý papier, železný šrot, plastové materiály a sklo. Vyznačuje sa úsporou energií a nerastných surovín, ktoré by sa museli použiť pri výrobe nových prvkov.

1.1.1.2 Rozdelenie recyklácie podľa miesta

- a) On site - pomocou mobilných recyklačných liniek sa odpad spracúva na mieste jeho vzniku. Základnými výhodami je mobilita, malá zastavaná plocha, jednoduchosť a nenáročnosť obsluhy, nižšie zriaďovacie náklady a dobrá variabilita výstupných parametrov. Flexibilita týchto liniek im umožňuje na mieste vzniku efektívne spracovať aj relatívne malé množstvá odpadov. Ich nevýhodou je nižšia kvalita recyklátu, ktorú spôsobujú obmedzenia strojnej zostavy a vysoká cena prepočítaná na jednotku výkonu linky. [2]
- b) Off site - spracovanie veľkého množstva odpadu s trvalým prísunom mimo miesta vzniku za pomoci stabilných recyklačných liniek a strojných zariadení. Jednoznačnou výhodou je kvalita výstupného recyklátu a nižšie náklady pri spracovaní dostatočného množstva oproti mobilným linkám. Nevýhodou sú však náklady na zriadenie takéhoto závodu a nutnosť stáleho prísunu materiálu na recyklovanie aby bola prevádzka efektívna.
- c) Medzidepónie - sú to skládky dočasne uloženého odpadu, kedy pri naplnení kapacity je odpad spracovaný mobilnou recyklačnou linkou a následne zavezený na depóniu. Tento spôsob nie je veľmi využívaný, z dôvodu problémového umiestnenia a veľkosti skládky.

1.2 Možnosti recyklácie betónu

Podľa skupenstva betónu môžeme vykonávať dvojakú recykláciu. Prvou je recyklácia zatuhnutého betónu a druhou recyklácia zbytkov čerstvého betónu pri jeho samotnej výrobe.

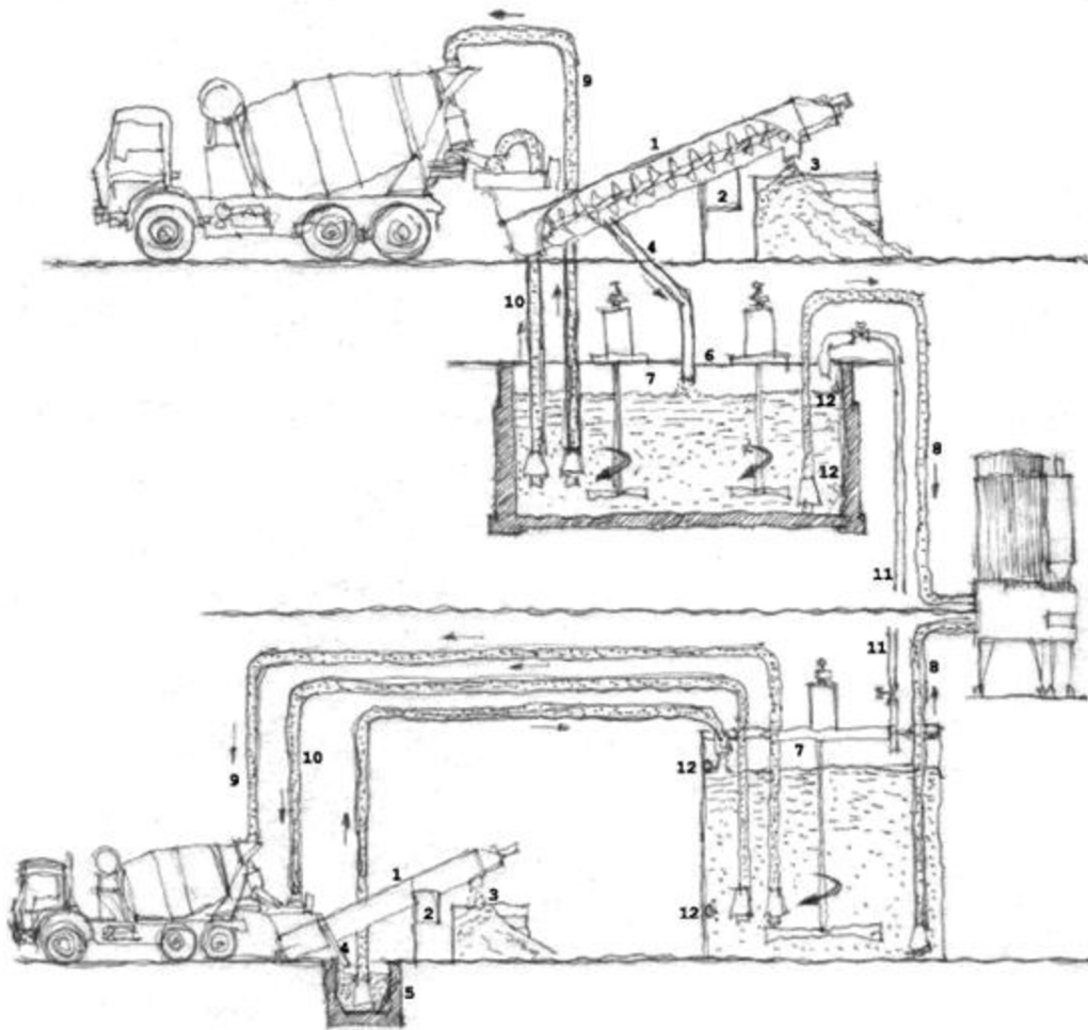
1.2.1 Recyklácia čerstvého betónu

V betonárňach pri výrobe a preprave betónu dochádza k znečisťovaniu vody a krajiny cementovým kalom a zvyškami zatvrdnutého betónu. Najviac ich vzniká pri dennom čistení prepravných autodomiešovačov, čerpadiel betónu, umývaní betonární a ako odpad pri výrobe prefabrikátov. Zvyšky betónov činia 3-4 % ročného výkonu betonární. Stuhnuté zvyšky betónu a vyschnutý cementový kal sa ukladá na skládky ako stavebná suť. Na zamedzenie nadmerného znečisťovania životného prostredia sa čerstvé zvyšky recyklujú. Priemerne sa na výplach 9 m³ autodomiešavača spotrebuje 1500 litrov vody. Do recyklačného zariadenia vytečie cca 350 kg jemných podielov, z čoho 60-70 kg je cement. [9] [1]

Pri recyklovaní čerstvého betónu dochádza k procesu podobnému procesu prania prádla. Pomocou špeciálnych čeridiel sa cementový tmel vypiera z kameniva a spolu s vodou odteká do kalových nádrží s miešadlami. Vplyvom miešania tejto vody je zabránené zhlukovaniu a sedimentácii jemných podielov. Z nádrží je voda vyvedená potrubím k zásobníku na zámesovú vodu, kde je pridaná ako čiastočná náhrada, ale hlavne je použitá ako voda na čistenie autodomiešavačov. Očistené kamenivo je odvedené do skladovacích priestorov. Jeho ďalšie využitie vo výrobe je rovnaké ako s nepoužitým kamenivom. Tak je vytvorený uzavretý systém, celý objem znečistenej vody sa spotrebuje vo výrobe a nie je potrebné žiadne napojenie na kanalizáciu. Jedná sa teda o bezodpadovú technológiu, v ktorej sa celý materiál i kalová voda spotrebujú v novej výrobe (obr. 1). [1]

Technológia recyklácie takto zaistí:

- „spracovanie výplachov z autodomiešavačov, betonární a zvyškov z výroby
- recykláciu zvyškov do novej výroby betónu
- značný ekonomický prínos úsporou vody i kameniva
- celoautomatickú prevádzku bez obsluhy
- ekologickú prevádzku – uzatvorený systém
- možnosť inštalácie vo všetkých betonárňach“ [1]



1 – “šneky” vymývajúce čerstvý betón, 2 – fixácia šnekového dopravníka, 3 – vymytý štrk a piesok, 4 – vymytý cement s vodou, 5 – kalové čerpadlo, 6 – povrchová nádrž, 7 – víridlo, 8 – potrubie na dávkovanie vody do miešačky, 9 – vodné potrubie na umývanie autodomiešavačov, 10 – voda na vymývanie zvyškov čerstvého betónu, 11 – prívod čistej vody, 12 – hladinový spínač čistej vody

Obrázok 1: Schéma recyklácie čerstvého betónu s nádržou pod terénom alebo na povrchu [3]

1.2.1.1 Betón bez odpadu

Jedná sa o možnosť využitia zvyškového betónu zo stavby alebo zo stien autodomiešavača. Princíp spočíva vo veľmi silnej retardácii betónu pomocou prípravku Delvo, ktorý dokáže zastaviť hydratáciu až na tri dni. Takže betón, ktorý sa nepotrebuje sa „uspi“ a môže sa použiť neskôr. Na naštartovanie hydratácie sa použije Delvo deaktivátor alebo čerstvý betón. Je nutné podotknúť, že týmto spôsobom je možné ušetriť aj vodu použitú pri výplachu autodomiešavača alebo miešačky, dokonca sa zbaviť usadenín starého betónu v bubne (obr. 2). Tento spôsob je však podmienený tým, že teplota prostredia nesmie klesnúť pod +8 °C a betón, na ktorý to bude aplikované nesmie byť starší ako 4 hodiny od

výroby. Myslím si, že tieto podmienky sú pre prax častokrát nespĺniteľné, no napriek tomu sa tento spôsob využíva. [9]



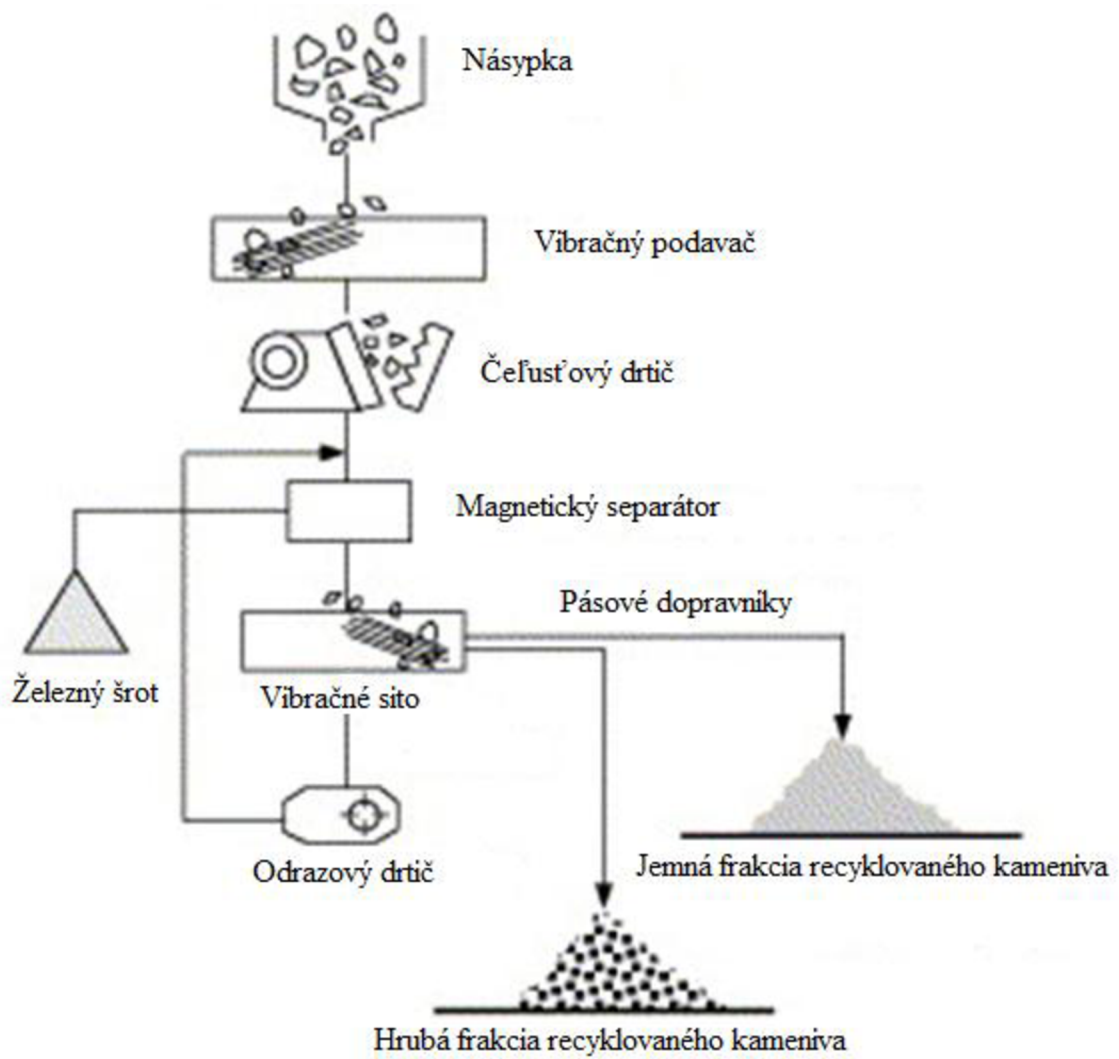
Obrázok 2: Bubón pred a po 8 týždňoch používania prípravku Delvo[9]

1.2.2 Recyklácia zatvrdnutého betónu

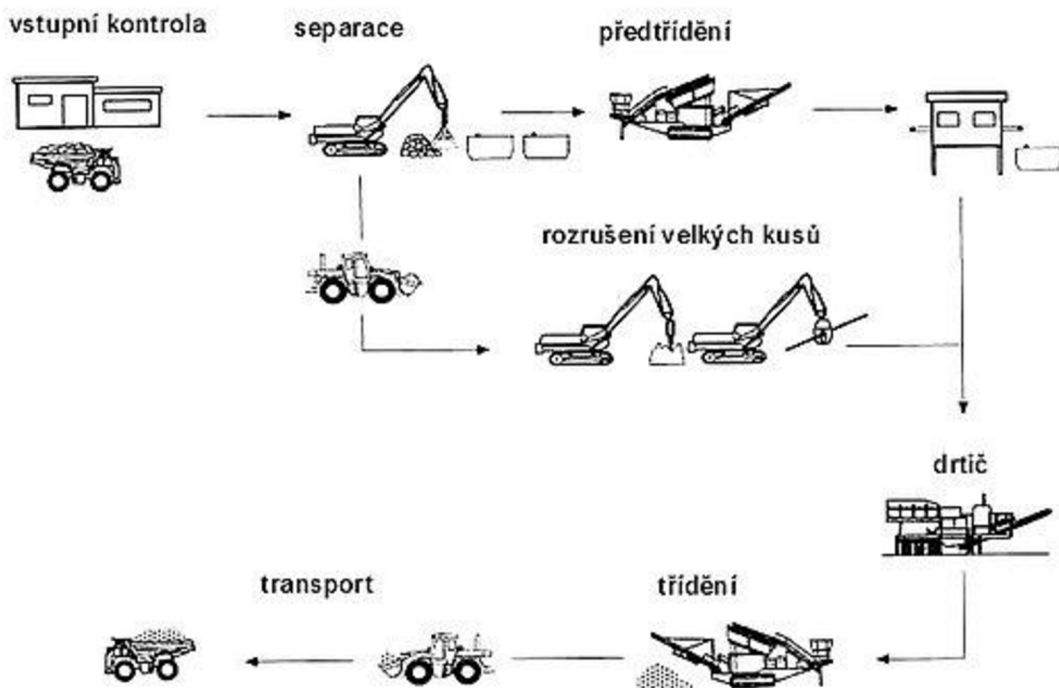
Pri vzniku novej betónovej konštrukcie musíme počítať s jej zánikom a následnou demolíciou. Keďže životnosť betónu nie je večná, prípadne sa konštrukcia musí z iných dôvodov zdemolovať, je potrebné sa zamyslieť nad riešením ďalšieho spracovania betónu po tom, čo prestane plniť svoju funkciu.

1.2.2.1 Mechanická recyklácia

Najznámejšou a najvyužívanejšou technológiou je mechanická recyklácia. To znamená použitie ťažkých mechanizmov k dosiahnutiu výsledného recyklátu. Ako prvý krok recyklácie, je vstupná kontrola odpadu. Nasleduje separácia a rozbitie väčších kusov na menšie, je teda potrebný bager s hydraulickým kladivom. Surovina sa rozdrť a vytriedi na jednotlivé frakcie na osobitných zariadeniach alebo sa použije lopatový nakladač, ktorý nasype kusy betónu do recyklačného zariadenia. Toto zariadenie nie je nijak sofistikované, pozostáva z násypky, vibračného podávača, drtiča (väčšinou čeľusťový), magnetického separátoru, vibračného sita a pásového dopravníku (obr. 3). Recyklačné linky môžu byť mobilné (vlastný podvozok), semimobilné (na miesto recyklácie sú dovezené) alebo stabilné (odpad je dovážaný k zariadeniu). Po zrecyklovaní a pretriedení na frakcie sa znova použije nakladač a recyklát sa preloží na korbu automobilu, odkiaľ pocestuje na skládku, prípadne do výroby (obr. 4).



Obrázok 3: Schéma recyklačnej linky



Obrázok 4: Postup recyklácie zatvrdnutého betónu [32]

Nedostatkami tejto technológie sú:

- hlučnosť, prašnosť
- pracnosť
- nízky stupeň variability technologického využitia zariadení, z čoho vyplývajú spravidla vysoké prevádzkové náklady na jednotku výkonu
- znehodnotenie kameniva
- vysoké náklady na predrvenie materiálu do drvičov (závisí od veľkosti štrbiny drviča)
- vysoké náklady na údržbu (ložiská, čeľuste a iné pohyblivé časti) [4]

1.2.2.2 Elektrohydroimpulzná technológia

Na základe týchto problémov, bola navrhnutá tzv. elektrohydroimpulzná (EHI) technológia. Používa sa pri recyklácii betónových a železobetónových prefabrikátov, ale nachádza uplatnenie aj v iných odvetviach (čistenie potrubí, zalisovanie rúr do výmenníkov tepla, lisovanie plechov bez razníka, drvenie a mletie nekovových materiálov pre elektroniku apod.). [4]

Výskumný tím z Concrete Technology Group v Holz Kirchene sa zaujímal o elektrodynamický jav a jeho účinky na pevnú látku. Elektrický výboj sa pri dotyku

s telesom snaží nájsť cestu najmenšieho odporu. Pri prestupe štruktúrovaným materiálom ako je betón je táto trajektória dosť kľukatá. Aby sa betón takto roztrieďil je potrebné aby bol namočený vo vode. „Dielektrická konštanta materiálov nie je skutočnou konštantou. Pri zásahu blesku v trvaní stoviek nanosekúnd sa jej hodnota mení. Voda sa tak napr. na krátky okamih stáva dokonalejším izolantom, ako betón.“[5] To je dôvod prečo telesom z betónu ponoreným do vody prejde výboj, ktorý sa šíri na rozhraní povrchu zrn a cementového tmelu a naruší tak jeho štruktúru. Vytvorí sa istá plazma, ktorá spôsobí výbuch a z pôvodného betónu zostane iba piesok, kamenivo a cementový prach. Získaný štrk sa dá použiť do nových betónových zmesí a aj cementový substrát sa dá lepšie recyklovať. V roku 2012 táto technológia dokázala spracovať 1 tonu betónu za hodinu, čo bolo pre prax nevýhodné, preto vedci z Concrete Technology Group vyvíjajú zariadenie s vyššou kapacitou. [5]

1.2.2.3 Rezonančná technológia

Za zmienku určite stojí aj recyklácia pomocou rezonančných zariadení. Tento postup je využívaný najmä pri recyklácii cementobetónových krytov, kedy pomocou nárazov (rezonovania) sa povrch rozruší. Vznikne betónová drť, ktorá nemusí byť ďalej predrvená a môže sa vložiť priamo do recyklačnej linky. Ďalší postup je rovnaký ako pri bežnej recyklácii betónovej drte (obr. 5).



Obrázok 5: Rezonančná recyklácia betónu [24]

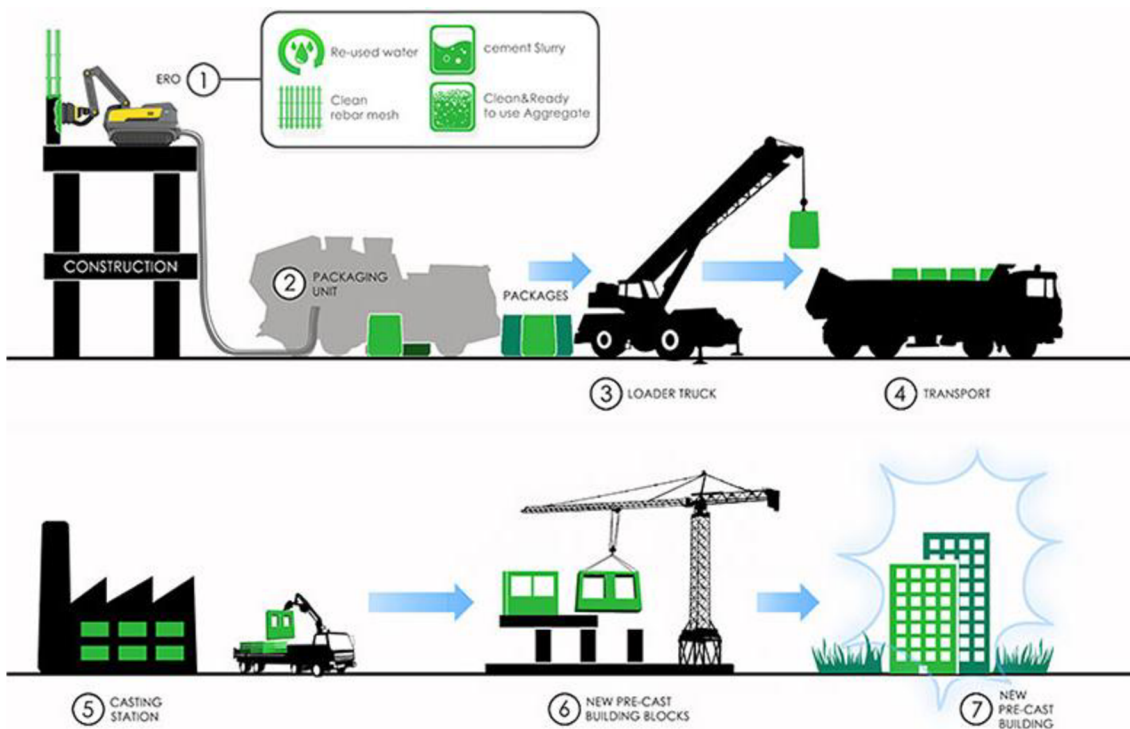
1.2.2.4 ERO CDR metóda

Najnovším prínosom v oblasti recyklácie betónu je švédsky systém ERO CDR (Concrete Destruction Robot). V podstate sa jedná o „vysávač“, ktorý pomocou vody rozbíja kusy betónu. Na búranie betónových konštrukcií sa používa ťažká technika, náročná na energiu a prevádzkovú manipuláciu. Dôvodom vzniku CDR bolo práve eliminovať množstvo energie na demolíciu, transport a dekompozíciu betónu, pričom tieto procesy tvoria len

akúsi predprípravu na samotné recyklovanie. Vzniklo tak zariadenie, ktoré potrebuje minimálny ľudský zásah, neplýtvá pohonnými hmotami ani materiálom. Jednoducho sa postaví robot pred konštrukciu, naprogramuje sa, pripojí sa na vodu a recyklácia začne. Robot si nájde oslabené miesto, napr. v mieste trhlín a pomocou koncentrovaného prúdu vody za vysokého tlaku obrusuje betón z výstuže, ktorý spoločne s vodou nasáva späť. Po nasatí sa centrifugálnou filtračnou jednotkou separujú tekutiny od pevných častíc. Následne sa kamenivo roztriedi, naplní do vriec a voda sa vracia späť do obehu (obr. 4,5). [6]



Obrázok 6: ERO CDR [7]



Obrázok 7: Schéma recyklácie betónu pomocou ERO CDR [7]

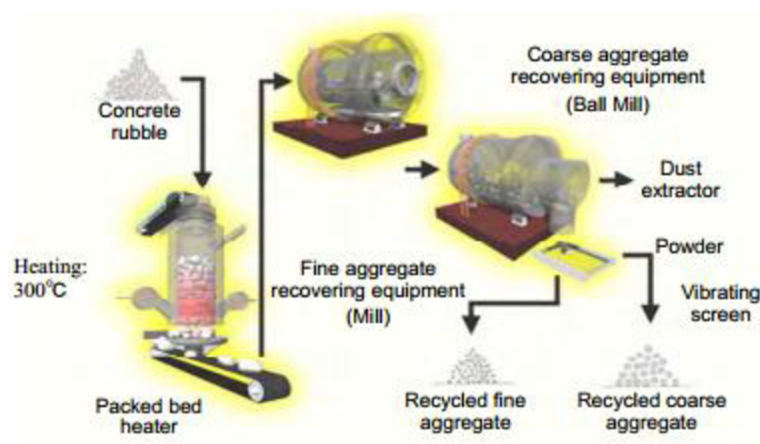
1.2.2.5 Metóda ohrevu a trenia (Heating and rubbing method - HRM)

Táto metóda bola vynájdená v Japonsku. Výhodou oproti iným spôsobom je, že z betónovej sute vzniká vysoko kvalitný recyklát.

Proces je nasledovaný (obr. 8):

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 (NA z angl. natural aggregate) 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. [14]



Obrázok 8: Metóda ohrevu a trenia (HRM) [15]

2 Recyklované kamenivo

Norma ČSN EN 12620+A1 definuje kamenivo ako „zrnitý materiál používaný ve stavebnictví; kamenivo může být přírodní, umělé nebo recyklované.“ [23]

- Přírodní - „kamenivo anorganického původu, které bylo vystaveno jen mechanickému procesu“ [23]
- Umělé - „kamenivo anorganického původu, které je výsledkem průmyslového procesu, zahrnujícího tepelnou nebo jinou úpravu“ [23]
- Recyklované - „kamenivo anorganického původu, které bylo dříve použito v konstrukci“ [23]

„Kameňopriemysel reprezentuje v Európe okolo 13 500 spoločností s 28 000 výrobnami, ktoré vyrábajú každoročne okolo 3 miliárd ton kameniva. Európa zabezpečuje viac ako 23 % celosvetovej výroby piesku, štrku a drveného kameniva.“ [22] Zo všetkých nerastných surovín je kamenivo najdostupnejším, najpoužívanejším (objemovo aj hmotnostne) a najlacnejším materiálom. Veľkú položku v kalkulácii ceny kameniva tvorí doprava (môže sa až zdvojnásobiť už pri cca 40 km, preto je snaha o využívanie zdrojov blízkych stavbe) a samozrejme špeciálne druhy kamenív, ktoré samé o sebe majú vysokú cenu. Jedná sa napríklad o „kamenivo s požadovanou hodnotou vyhladiteľnosti“ [22], ktoré sa používa na povrch vozoviek odolných voči šmyku. Potreba kameniva sa v priemere pohybuje nasledovne:

- 400 ton pre výstavbu rodinného domu
- 3 000 ton na výstavbu školy
- 30 000 ton na výstavbu 1 km diaľnice
- 90 000 ton na výstavbu 1 km železničnej trate

Tieto čísla môžu byť pokryté prírodným kamenivom, ale aj recyklovaným, ktoré má priaznivý vplyv na životné prostredie, pretože šetrí prírodné zdroje, znižuje množstvo odpadu na skládkach a reguluje spaľovanie palív na dopravu. [22]

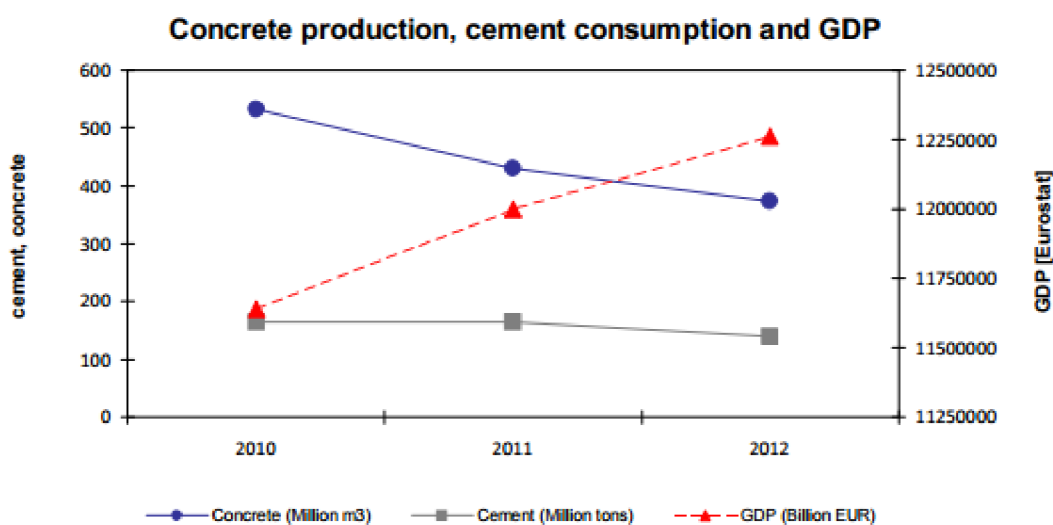
Recyklované kamenivo z betónu (ďalej RCA, z angl. recycled concrete aggregate) pozostáva z pôvodného kameniva a zbytkovej cementovej malty. Prvé použitie RCA bolo pravdepodobne v Európe po 2. svetovej vojne. Kvôli vysokému množstvu demoličného odpadu a malému množstvu prírodných zdrojov sa toto kamenivo začalo používať v novej výstavbe. Celosvetovo sa však uchytilo až neskôr, keď sa ľudstvo začalo viac zaujímať o

ochranu prírodných zdrojov a životného prostredia a o trvalo udržateľný rozvoj v stavebníctve. [11]

Enviromentálne výhody:

- Zníženie ťažby prírodného kameniva
- Uvoľnenie miesta na skládkach
- Ušetrenie pohonných hmôt
- Neničenie ciest v mestách ťažkými nákladnými autami
- Zníženie emisií [60]

Produkcia cementu v Európe sa odhaduje na 10 % svetovej výroby (50 % tvorí Čína). Pričom na celom svete sa vyrobí približne 25 miliónov ton betónu ročne, čo tvorí 3,8 ton betónu na osobu. Na Európu pripadá asi 2,5 miliónu ton betónu, 5 ton na osobu. V grafe 1 je znázornená produkcia betónu, spotreba cementu a hrubý domáci produkt (GDP), konkrétne čísla pre vybrané štáty viz tab. č. 1.



Graf 1: Časová závislosť výroby betónu, produkcie cementu a HDP v Európe [13]

	Produkcia betónu [milión m ³]			Spotreba cementu [milión ton]			HDP [milión €]		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
ČR	11,6	11,0	10,6	3,7	3,8	3,1	149 932	155 486	152 310
Rakúsko	15,0	15,0	15,0	4,5	4,7	4,5	286 396	300 712	309 900
Francúzsko	54,0	59,0	55,0	19,8	21,4	20,0	1 936 719	2 001 398	2 032 296
Nemecko	71,3	71,3	67,9	24,6	28,0	26,7	2 496 200	2 592 600	2 644 200
U.S.A.	378,0	270,0	310,0	70,0	72,0	79,0	10 936 788	10 830 244	12 207 971

Tabuľka 1: Porovnanie štátov v spotrebe cementu a produkcii betónu [13]

Tieto enormné hodnoty sú zapríčinené tým, že betón je dvakrát viac používaný stavebný materiál ako všetky ostatné na svete, preto aj vďaka tomu má stavebno-demoličný odpad (SDO) tak značný objem (tabuľka č. 2). [10]

	U. S. A.	Európa	Japonsko
SDO [milión ton]	317	510	77

Tabuľka 2: Ročné množstvo stavebného a demoličného odpadu [10]

Jedným zo spôsobov ako betónovú suť spracovať, je využiť ju na získanie nového kameniva a tým uvoľniť pôdu na skládkach a ušetriť prírodné zdroje. Americký prezident Barack Obama vyhlásil, že do roku 2015 sa 15 % skládkovaného SDO spracuje recykláciou. Táto myšlienka sa rozšírila veľmi rýchlo a mnohé krajiny to považovali za výzvu, bohužiaľ kvôli nehomogenite materiálu a bez legislatívnej podpory sa to stáva oveľa ťažším cieľom ako sa očakávalo. [11]

Faktory, ktoré by mohli ovplyvniť komerčnejšie využívanie RCA sú:

- Zvýšenie použitia (je dokázané, že až 20 % RCA môže byť primiešaných do konštrukčných betónov bez zníženia kvality výsledného produktu, v niektorých prípadoch má dokonca RCA lepšie vlastnosti ako NA)

- Viac výskumov na dlhodobé chovanie RCA (zníženie neistoty s používaním zavedením legislatívy) [12]

2.1 Ekonomický pohľad na RCA v ČR

V súčasnej dobe sa rozmach recyklácie betónu výrazne zvýšil, preto aj v stavebnom priemysle sa škála služieb rozšírila. V nasledujúcej tabuľke (tab. 3) uvádzam pár stavebných firiem, ktoré sa zaoberajú recykláciou betónu v Českej republike a ich jednotlivé ceny za zrecyklovanie betónu a betónový recyklát. Obecné platí, že čím sú frakcie recyklátu menšie, znečistenejšie alebo širšej frakcie, tým nižšia je ich cena. Prírodné kamenivo sa v ČR predáva približne za 200 Kč/t, v závislosti od frakcie a spôsobu ťažby. [9] Ako vyplýva z tabuľky č. 3, recyklát má nižšiu predajnú cenu ako NA, avšak dopyt po ňom je ešte stále menší.

Recyklačný závod	Recyklácia	Predaj
	betónu	recyklátu
<i>Cena bez DPH (Kč/t)*</i>		
Recyklace Procházka	250	100
DEAS spol. s. r. o.	400	200
DUFONEU R.C., a. s.	200	150
ATM CZ, a. s.	190	180
AZS 98 spol. s. r. o.	210	150
B&P spol. s. r. o.	175	130
Očenášek Prostějov	180	110
Ridera Bohemia a. s.	165	120
PRIEMERNÁ CENA	220	140

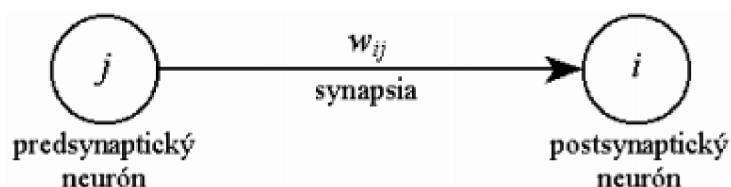
* jedná sa o priemernú hodnotu rôzne znečisteného armovaného aj nearmovaného betónu zistenú z internetových stránok jednotlivých spoločností

Tabuľka 3: Cena recyklácie v ČR

2.2 Vybrané fyzikálno-mechanické vlastnosti spojené s použitím RCA

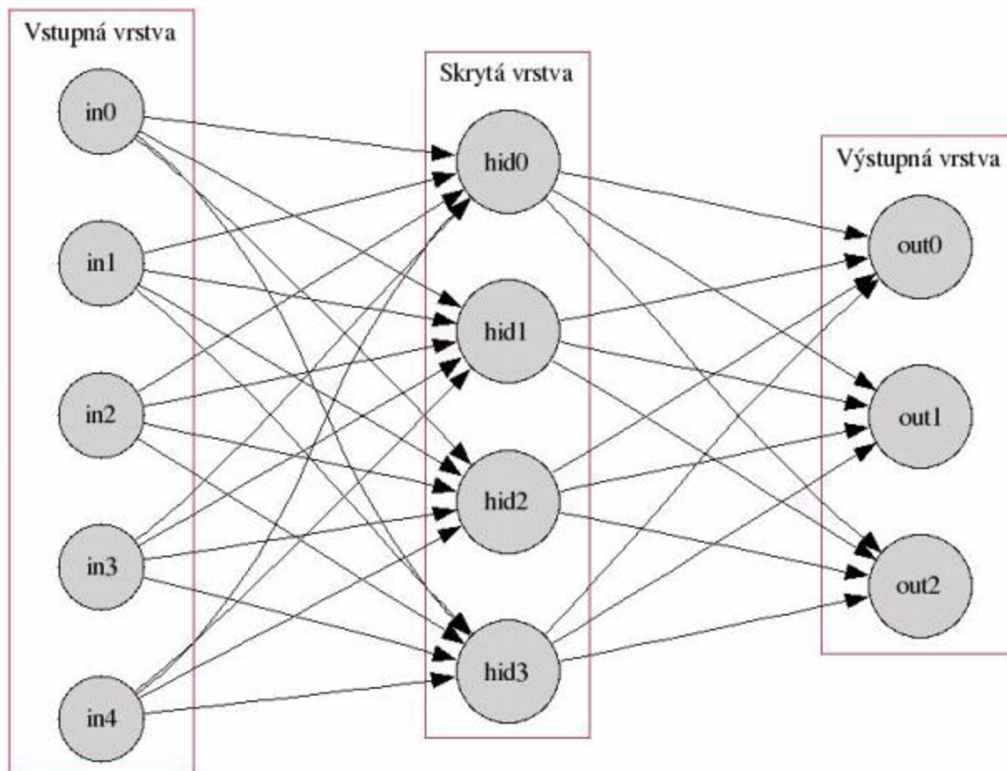
Je dôležité povedať, že recyklované kamenivo z betónu, nenachádza stabilné uplatnenie v stavebnom priemysle práve vďaka skoro nemožnej predikcii jeho vlastností.

Na určenie chovania recyklátov zabudovaných do nových konštrukcií ešte nebol doposiaľ vyvinutý „vzorec“. Jednou z možností ako túto skutočnosť napraviť, je použitie tzv. neurónovej siete (NN z angl. neural networks). Nejedná sa o sieť neurónov v mozgu človeka, ale pracuje na jej princípe. „Neurónová sieť je masívne paralelný procesor, ktorý má sklon k uschovávaniu experimentálnych znalostí a ich ďalšieho využívania.“^[46] Ak vezmeme do úvahy recyklované kamenivo, je to systém, ktorého chovanie sa (popis) je relatívne zložité. Máme však nespočetné množstvo faktorov (dát), ktoré ovplyvňujú toto chovanie a k nim výsledné parametre (výstupy). Za týchto okolností je možné vytvoriť neurónovú sieť, ktorá sa bude chovať ako recyklát a na základe ktorej bude možné predpovedať výsledné vlastnosti. Základom NN je neurón, v ktorom sa nachádza výpočtová funkcia. Neuróny sa medzi sebou spájajú za pomoci synapsie. V závislosti na smere synapsie rozoznávame predsynaptické (zdrojové) a postsynaptické (cieľové) neuróny (obr. 9). [46]

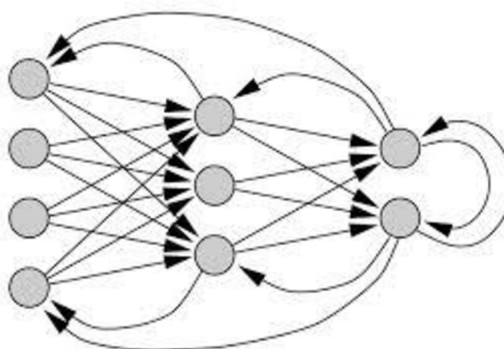


Obrázok 9: Spojenie neurónov synapticky [46]

Samotné neuróny sú potom sortované do vrstiev - vstupná (inputs layer), skrytá hidden layer), výstupná (output layer). Podľa toho ako sú jednotlivé vrstvy neurónov poprepájané, sa NN delia na dopredné a rekurentné (obr. 10, 11). [46]

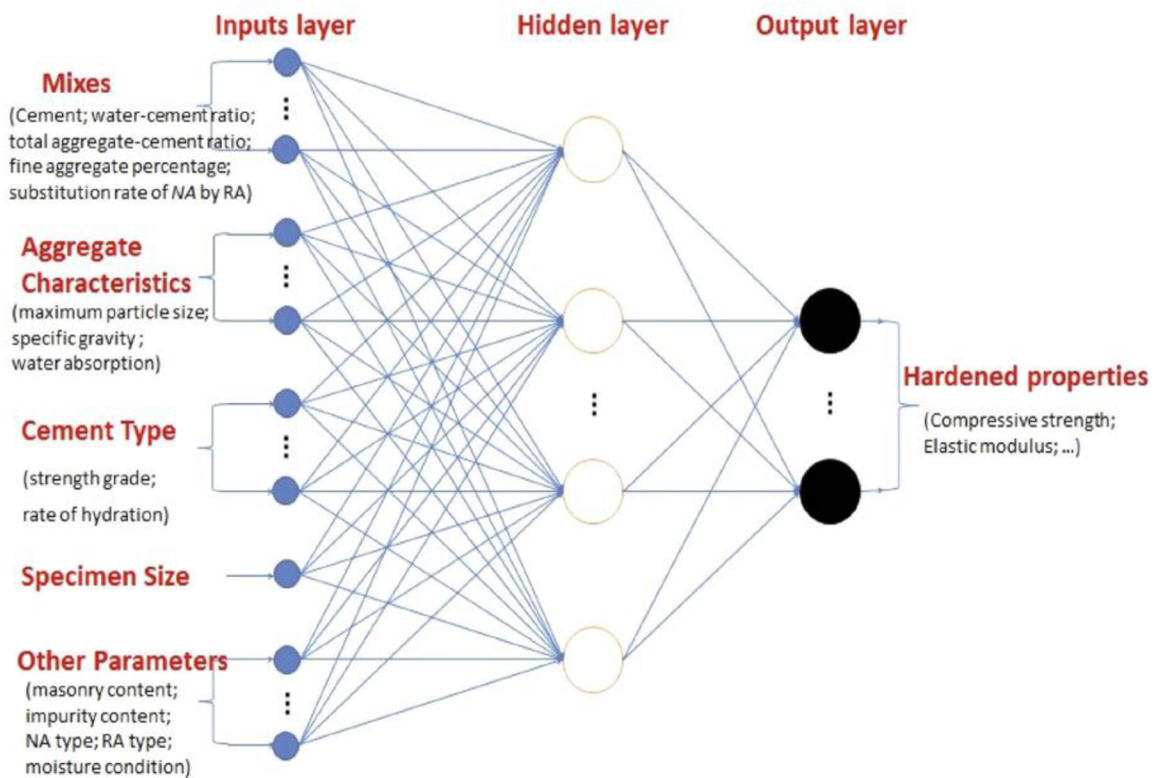


Obrázok 10: Dopredná neurónová sústava [46]



Obrázok 11: Rekurentná neurónová sústava [46]

Na obr. 12 je uvedená NN pre recyklované kamenivo z viacerých zdrojov pôvodu. V Čínskej štúdií [47] zaoberajúcej sa vplyvom množstva malty na RCA došli k záveru, že použitie NN má budúcnosť pre určovanie vlastností a vhodnosti použitia RCA, je však požadovaný podrobnejší výskum.



Obrázok 12: Neurónová sieť recyklovaného kameniva [47]

2.2.1 Objemová hmotnosť

Objemová hmotnosť RCA závisí od zbytkovej malty. Tá má nižšiu hustotu ako kamenivo samotné, preto je aj objemová hmotnosť RCA nižšia ako u NA. Jej hodnota sa pohybuje okolo $2100 - 2500 \text{ kg/m}^3$, pričom NA má okolo $2400 - 2900 \text{ kg/m}^3$. Samozrejme že závisí aj od pôvodu kameniva, ak vytvárame RCA z ľahkého betónu jeho objemová hmotnosť bude nižšia. Ďalej závisí od veľkosti zrna kameniva a pevnostnej triedy primárneho betónu. Čím menšie je zrno, tým menšia je objemová hmotnosť a to isté platí aj pre pevnosť, so znižovaním pevnosti betónu klesá objemová hmotnosť. Objemová hmotnosť má vplyv aj na nasiakavosť, čím pórovitejšia je štruktúra RCA, tým je objemová hmotnosť nižšia a vzrastá nasiakavosť. [11][35]

2.2.2 Pórovitosť a nasiakavosť

Makroskopicky je možné tvrdiť, že betón je kompozitný materiál skladajúci sa z dvoch fázových materiálov - častíc kameniva a cementovej kaše. Pod mikroskopom je však fáza tretia, 10 až $50 \mu\text{m}$ tenká vrstva na rozhraní cementovej kaše a kameniva, nazývaná styčná tranzitná zóna (interfacial transition zone – ITZ), ktorá vzniká tzv. „stenovým efektom“. Ten hovorí o tom, že čiastočky cementu sú oddialené od povrchu zrna kameniva,

výsledkom čoho je, že zrno zostane obalené iba vrstvičkou vody s veľmi nízkym množstvom cementových častíc. Snaha cementu vzdialiť sa od kameniva je paradoxne podporovaná homogenizačným procesom v miešačke. Vďaka tejto zóne je betón rôznorodej štruktúry. Ako uviedol Khaleel, podľa viacerých zdrojov je povrch RCA akoby zaprášený a popraskaný. Je to zapríčinené nárazmi a drténym pri recyklácii betónovej sute. Z tohto dôvodu je tmel v oblasti tranzitnej zóny pórovitejší a nasiakavejší, čo vedie k vzniku väčších kryštálov hydroxidu vápenatého a tým k zvýšeniu priepustnosti betónu. Zrná kameniva síce nemôžu byť obalené cementom, ale častice menšie ako cement sa dokážu prilepiť na povrch zrn efektívnejšie. Jedná sa hlavne o mikrosiliku, ktorá po rozmiešaní v roztoku a pridaní do betónu zvýšila 28 dňovú pevnosť v tlaku o 17 %. Ako vhodná sa ukázala aj povrchová úprava vo forme vysokopecnej trosky, naopak nie veľmi efektívny bol popolček (zrejme kvôli veľkosti častíc). [40][41][42]

Podľa Müellera a Winklera sa množstvom zbytkovej malty zvyšuje so znížením veľkosti častíc. Táto myšlienka bola potvrdená štúdiou Nagatakiho, ktorá hovorí o tom, že počas drtenia RCA sa drolivé častice uvoľňujú ako prvé. Jemná frakcia je preto zastúpená veľkou časťou práve tejto zbytkovej malty a kamienkami, ktoré vznikli ešte pred samotným drténím. S týmto faktom súvisí zvýšená pórovitosť RCA, skúmaná v štúdiu Goméz-Soberona, ktorá dokazuje, že betón s RCA má asi o 3,8 % vyššiu pórovitosť ako betón s NA práve vďaka zbytkovej malte, ktorá pokrýva zrníčka kameniva. [11]

Ďalšou z možností ako eliminovať podiel malty v RCA je pomocou kyseliny chlorovodíkovej. Percento úbytku malty lineárne závisí od molarity HCl, doba ponorenia však túto hodnotu neovplyvňuje. Bolo preukázané, že ošetrovanie RCA kyselinou chlorovodíkovou vedie k zvýšeniu mechanickej odolnosti, zníženiu nasiakavosti a úprave objemovej hmotnosti. Dokonca pri nízkych koncentráciách HCl zostáva obsah chloridov v norme. [45]

S pórovitosťou materiálu úzko súvisí jeho nasiakavosť. Pri RCA je nasiakavosť vyššia ako pri NA, dosahuje 5-10 krát vyššiu hodnotu. Je to spôsobené pórovitou maltou, ktorá nasaje viac vody ako povrch kameňa (Ramamurthy, Juan, Guitierrez). Závisí aj od zloženia recyklátu a veľkosti zrna. Konkrétne pri hrubej frakcii RCA je to okolo 2 - 10 % a jemnej frakcii 3 - 8 %, pričom nasiakavosť NA sa pohybuje okolo 1 - 2 %. Skúška nasiakavosti prebieha rovnako ako pri NA (ČSN EN 1097-6), je ale dôležité poznamenať, že doba, pri ktorej je RCA ponorené do vody musí byť dlhšia ako pri NA. Dôkazom je výskum

z Británie, ktorý ukázal, že ak sa recyklát ponorí do polovice zámesovej vody na 10 minút pred samotným miešaním, jeho nasiakavosť sa zníži, resp. za tento čas nasiakne 70 % z vody, ktorú by nasiakol za 24 hodín, pre úplné nasiaknutie sa odporúča 48 hodín. [11][16][33][34][40]

Ďalšou možnosťou ako ovplyvniť nasiakavosť primárnej malty je použitie ošetrovania polymérmi. Jedná sa konkrétne o francúzsky výskum zameraný na zlepšenie vlastností RCA. Ako prvé určili referenčnú nasiakavosť RCA bez ošetrenia. Následne pripravili roztoky polymérov o rôznych koncentráciách. Ako ošetrovacie látky boli použité polydiorganosiloxany (siloxany), alkylalkoxysilany (silany) a roztok kremičitanu sodného. Silany a siloxany sú alkalivzdorné látky s odolnosťou voči UV žiareniu a s vysoko hydrofobizačným účinkom, preto sa často používajú napr. na ochranu konštrukčných betónov pred chemickými rozmrazovacími látkami, proti výkvetom alebo prenikaniu chloridov. Priemerné zrno silanov je 1-2 nm, zatiaľ čo siloxanov 5-10 nm. Roztok kremičitanu sodného nevytvára vodeodolný povlak. Determinovala to aj nasiakavosť RCA ošetreného 5% roztokom kremičitanu sodného, ktorý vykazoval najhoršie výsledky v tomto výskume. Autori usudzujú, že to môže byť spôsobené tým, že roztok vyplnil póry, takže prestup vody do nich bol obtiažnejší, ale povrch kameniva nezhydrofobizoval. Najvýhodnejším sa zdá byť kombinácia 30% kremičitanu sodného a 30% siloxanovej/silanovej emulzie. Každopádne sa potvrdila vhodnosť použitia polymérov ako prvok podporujúci zlepšenie vlastností RCA (zníženie nasiakavosti, zvýšenie odolnosti proti drteniu - súčiniteľ Los Angeles). Je preto potreba ďalej preverovať možnosti hydrofobizácie malty a tým otvoriť nové možnosti pre nakladanie s odpadmi z betónu. [51]

2.2.3 Mrazuvzdornosť

Práve zvýšená nasiakavosť má výrazný vplyv na mrazuvzdornosť tohto materiálu. Ak sa do pórov dostane voda, ktorá po zamrznutí zväčšuje svoj objem, tlaková sila tejto vody môže narásť do takých hodnôt, že prekročí ťahovú silu betónu a tým zapríčini expanziu pórov a teda následné trhliny na povrchu betónu. Poškodenie mrazom sa vyznačuje prasklinami, drolením, výkvetmi a rôznymi odtieňmi povrchu betónu. Mrazuvzdornosť môžeme zvýšiť optimálnym rozmiestnením pórov a ich veľkosťou, použitím prevzdušňovacích prísad. Podľa doterajších výskumov je odolnosť voči mrazu u betónov s kamenivom z betónovej suty (RCAC, z angl. recycled concrete aggregate concrete) skoro rovnaká až znížená ako u betónu s prírodným kamenivom (NAC, z angl. natural aggregate

concrete). Ak máme RCA z dostatočne prevzdušneného betónu a RCAC z neho vyrobený je takisto dobre prevzdušnený, môže vykazovať zvýšenú mrazuvzdornosť. Odolnosť voči mrazu je zvýšená aj pri nižšom vodnom súčiniteli. Kamenivo, ktoré bolo pred zamiešaním namočené vo vode ukazuje horšiu mrazuvzdornosť ako kamenivo nenamočené. [16][11][48]

2.2.4 Reaktivita nezhydratovaného cementu v RCA

Bolo dokázané, že nahradenie 100 % kameniva do betónu recyklátom, po 5 rokoch zvýši pevnosť v tlaku o 62 % oproti betónu s prírodným kamenivom ktorý dosahoval len zvýšenie o 34 %. Pevnosť v priečnom ťahu bola takisto zvýšená. Pri betóne s betónovým recyklátom to bolo o 65 % viac, zatiaľ čo pri NAC znova o skoro polovicu menšia, len 37 % (tab. 4). Je možné, že tento vzrast pevností je spôsobený nezhydratovaným cementom v RCA, ktorý po dlhšej dobe zreagoval. Toto tvrdenie však nie je úplne dokázané, existuje totiž teória, že ani nadrtený a namletý RCA nedokáže pri kontakte s vodou zhydratovať, dokonca ani keby bol vystavený vysokým teplotám po dlhšiu dobu. [11]

		28 dní [MPa]	5 rokov [MPa]	Nárast [%]
Pevnosť v tlaku	NAC	43,8	58,9	34
	RCAC	34,3	55,4	62
Pevnosť v priečnom ťahu	NAC	2,43	3,32	37
	RCAC	2,26	3,64	65

Tabuľka 4: Porovnanie dlhodobých pevností RCAC a NAC [11]

2.2.5 Vylúhovateľnosť škodlivín

RCA je väčšinou skladovaný vo vonkajších priestranstvách na hromadách, kde je vystavený účinkom poveternostných vplyvov. Dažďová voda, ktorá zmáča zrná môže spôsobiť vylúhovanie ťažkých kovov zo zbytkového betónu a odtečť do životného prostredia. Podľa Müellera a Winklera množstvo ťažkých kovov vylúhovaných z RCA spĺňa požadované normy, pretože dosahuje minimálnych hodnôt. RCA je materiál rôznorodý, práve vďaka rôznemu zloženiu betónu, či už sa jedná o typ cementu, prímies, prísad a pôvodu NA. Z tohto dôvodu by mal byť každý zdroj RCA otestovaný predtým, než sa začne používať do nových konštrukcií. [11]

2.2.6 Čistota RCA

Vlastnosti zatvrdnutého RCAC sú ovplyvnené množstvom nečistôt, ktoré obsahuje RCA. Nečistoty pochádzajú z demoličného a recyklačného procesu, jedná sa hlavne o hlinu, kovy, sklo, keramické výrobky, drevo, sadru, asfalt, omietky, plasty, maľby, textílie, papier a v neposlednom rade aj napríklad chloridy. Výskumom Kikuchiho bolo dokázané, že význam nečistôt je naozaj nezanedbateľný. Skúšaný bol betón znečistený sadrou, asfaltom a drevom. Tento betón mal jednoznačne horšie výsledky pevností v tlaku aj modulu pružnosti. Podľa správy z American Concrete Institute „Removal and Reuse of Hardened Concrete“ by sa všetky nečistoty z RCA mali odstrániť aj za cenu toho, že by následoval opakovaný proces spracovania. Takýto proces by bol však značne predražený a recyklácia by strácala na význame. Ďalším možným znečistením sú chloridy. Chloridy sa do betónu dostanú z rozmrazovacích posypov ciest, z prímorských oblastí, dokonca ich v menšom množstve obsahujú samotné NA a prísady. Pri obsahu chloridov 3 až 4,6 % z hmotnosti cementu v RCA je 90% pravdepodobnosť, že betón vyrobený z tohto kameniva bude korodovať výstuž (Debieb). USA vydalo normu ASTM C876: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, ktorá popisuje meranie elektrického potenciálu tvoriaceho koróziu v betóne na výstuži bez protikorózneho povlaku. Hlavným meritom je, že ak je na výstuži nameraný potenciál menej ako -0,35 V, potom výstuž na 90 % zkoroduje. Debieb pri tomto pokuse na RCAC, ktorého RCA obsahovalo chloridy, dosiahol až -0,57 V. Bergholt a Hansen zas dokázali, že v závislosti na podmienkach okolia, môže betón obsahovať až 7,5 % chloridov z hmotnosti cementu (bol použitý púštny piesok). American Concrete Institute vydal „Guide to durable concrete“, kde uvádza že množstvo chloridov vo vode rozpustných závisí od toho, o aký betón sa jedná (predpäť, vystužený) a v akom prostredí sa vyskytuje (vlhké, suché, chránené). Konkrétny obsah chloridov v RCA stanovili na 0,6 - 7,1 kg/m³. Pre názornosť NA má obsah chloridov 0,0 - 1,2 kg/m³. Vodou rozpustné chloridy sa odstraňujú väčšinou praním v horúcej vode, ale odstránenie viazaných chloridov nie je možné ani po namletí RCA a následnom vypraní vo vode. [11][20][35]

Prvok	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	I	Zn
Limit [mg/l]	50	100	5	100	200	100	2	400

Tabuľka 5: Maximálne množstvo škodlivých prvkov v RCA [48]

2.2.7 Alkalicko-kremičitá reakcia

V Kalifornii roku 1940 istý Thomas E. Stanton skúmal príčinu vzniku trhlín v betóne. Zistil, že niektoré kamenivá spolu so značne alkalickým cementom a v prostredí s dostatočnou vlhkosťou sa obalia akýmsi gélom, ktorý vysaje vodu z okolia, narastie na objeme a expanduje, čo vedie k vzniku trhlín v betóne. Tento jav nazval alkalicko-kremičitá reakcia (ASR, z angl. alkali-silica reaction). Výsledky tohto pozorovania zhrnul do záveru:

- ak cement obsahuje menej ako 0,6 % alkálií, tak sú zanedbateľné. „Obsah alkálií je vyjadrený ako ekvivalentné Na_2O , tj. $\% \text{Na}_2\text{O}_e = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \% \text{K}_2\text{O}$ “ [21]
- nahradením časti vysokoalkalického cementu (napr. popolčekom, vysokopecnou troskou, metakaolínom, mikrosilika) dôjde k zmierneniu rozpínania

V prvej polovici 20. storočia sa táto teória potvrdila a doplnila o ďalšie parametre ovplyvňujúce ASR ako typ kameniva, pomer miešania betonovej zmesi a rozpínanie v dôsledku reakcie kameniva s alkáliami v betóne (AAR, z angl. alkali-aggregate reaction), expozičné podmienky.

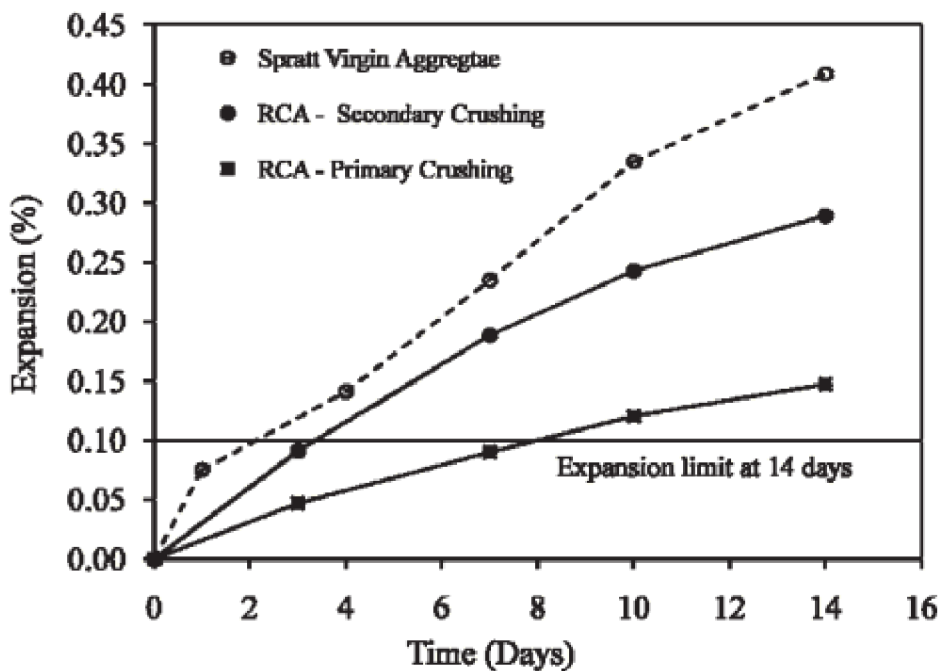
Výsledné tri podmienky sú zaručením vzniku ASR:

- zvýšené množstvo alkálií (nad 0,6 %)
- reaktívne SiO_2
- vlhkosť

Ochranou pred ASR môže byť obmedzenie vlhkosti, regulácia reaktívnych zložiek v kamenive alebo betóne (najreaktívnejší je opál), zníženie pH pórovej kvapaliny a tým zníženie priepustnosti pre oxid kremičitý. Výber kameniva nezávisí iba od citlivosti na ASR, ale aj od dostupnosti a ekonomických faktorov. Pokiaľ sme nútení využiť kamenivo potenciálne reaktívne je vhodné postupovať nasledovne:

- znížiť obsah reaktívneho kameniva primiešaním kameniva nereaktívneho
- ťažiť selektívne
- separovať kamenivo (nevýhoda - zvýšenie ceny)
- prať kamenivo
- chemická úprava [21]

RCA má zvýšenú citlivosť na ASR. Bolo dokázané, že pridaním 25 % popolčeka do betónu z RCA sa jeho odolnosť voči ASR zvýši. Z grafu 2 je vidieť, že jedným z faktorov ovplyvňujúcich ASR v RCA je drtenie. Pri sekundárnom drtení betónového recyklátu je vzniká vyššia expanzia zapríčinená ASR. Autori tohto pokusu to pripisujú tomu, že pri sekundárnom drtení je v zmesi kameniva väčšie množstvo samotného kameniva bez malty. [21]



Graf 2: Vplyv sekundárneho drtenia na ASR

ASR je veľmi dôležitým problémom pri cementobetónových krytoch (CB). Keďže prejavom ASR je vznik trhlín a odprsknutie povrchu s možným vznikom gélu, zohráva veľkú rolu v životnosti CB. Je zákerná pre CB z dôvodu, že jej diagnóza nie je vždy jasná, vznik trhlín môže byť totiž spôsobený viacerými faktormi, napr. smršťovanie, zmeny teplôt, korózia výstuže, pôsobenie mrazu, síranov a ďalšie. CB je takisto vystavený jednému z činiteľov ASR a to zmenám teplôt a striedavému vysušovaniu a nasýťovaniu vodou. Chlorid sodný používaný pri zimných posypoch môže takisto ovplyvniť ASR a to urýchlením reakcie. [21]

2.3 Vplyv RCA na vlastnosti čerstvého betónu

	Porovnanie voči betónu s prírodným kamenivom	
	Hrubá frakcia RCA	Drobná frakcia RCA
Spracovateľnosť	podobná až nepatrne nižšia	nepatrne až značne nižšia
Bleeding	nepatrne menší	malý
Potreba vody	väčšia	značne väčšia
Obsah vzduchu	nepatrne zvýšený	nepatrne zvýšený
Mrazuvzdornosť	závisí od miery prevzdušnenia	závisí od miery prevzdušnenia
Karbonatácia	zvýšená o 65 %	zvýšená o 65 %
Síranuvzdornosť	závisí od zámesi	závisí od zámesi
ASR	menej náchylné	menej náchylné

Tabuľka 6: Porovnanie vlastností čerstvého betónu s NA a RCA [35]

2.4 Vplyv RCA na vlastnosti zatvrdnutého betónu

	Porovnanie voči betónu s prírodným kamenivom	
	Hrubá frakcia RCA	Drobná frakcia RCA
Pevnosť v tlaku	menšia o 0 - 24 %	menšia o 15 - 40 %
Pevnosť v ťahu za ohybu	menšia o 0 - 10 %	menšia o 10 - 20 %
Modul pružnosti	menší o 10 - 33 %	menší o 25 - 40 %
Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti	väčší o 0 - 30 %	väčší o 0 - 30 %
Zmršťovanie	väčšie o 20 - 50 %	väčšie o 70 - 100 %
Dotvarovanie	väčšie o 30 - 60 %	väčšie o 30 - 60 %
Merná hmotnosť	menšia o 0 - 10 %	menšia o 5 - 15 %

Tabuľka 7: Porovnanie vlastností zatvrdnutého betónu s NA a RCA [35]

2.5 Využitie RCA

Kamenivo z recyklovaného betónu nachádza v dnešnej dobe stále širšie uplatnenie. Z globálneho hľadiska sa RCA vyznačuje nestálymi vlastnosťami, čo zapríčiňuje ich obmedzené použitie. Napriek tomu jeho aplikácia je rôznorodá - obsypy kanalizácií, zásypy, podypsy parkovísk a podláh, ako náhrada štrkodrtí, násypy zemných telies

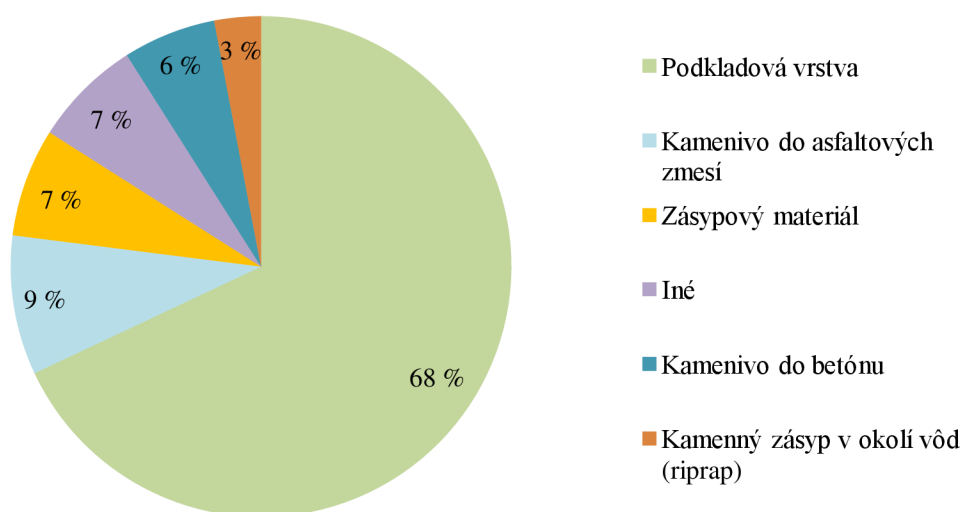
komunikácií, protipovodňové hrádze, podkladné vrstvy, drenáž, kamenivo do betónu (najmä hrubá frakcia). Vhodnosť do expozičnej triedy prostredia uvádza tabuľka 8. Drobné recyklované kamenivo z vysoko kvalitného betónového odpadu s vhodnými geometrickými, fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami je možné použiť ako náhradu drobnej frakcie do betónov tried C 16/20 až C 45/55, prostredie X0 a XC. Zrno do 4 (8) mm nachádza využitie aj v poteroch. V súčasnosti sa skúma použitie RCA na odstránenie fosforečnanov z odpadných vôd. Ako bolo zmienené, drobná frakcia je vysoko nasáková, preto práve frakcia 0,125 - 0,250 mm sa osvedčila ako výborný adsorbent. Je dokázané, že RCA má adsorpčnú kapacitu PO_4^{3-} až 0,006 - 0,134 g/g. Adsorpčná kapacita sorbentu vyjadruje množstvo látky, ktoré sa nadsorbuje v rovnovážnom stave na 1 g adsorbentu. Ako nevýhoda tohto využitia sa javí zvýšenie pH vody nad 11, v ktorej je ponorený adsorbent. Ak by sme teda chceli toto čistenie vody realizovať, bola by potrebná jej neutralizácia pred vypustením do recipientu. Podľa vedcov z Británie je možné použiť RCA aj do betónovej dlažby. Pri vytváraní dielcov je potrebný zvýšený podiel drobného kameniva k hrubému (4:1, pričom betónový panel na výstavbu má 1:1) kvôli finálnej povrchovej vrstve. Ukázalo sa, že vysoké percento náhrady NA malo nízky škodlivý vplyv, doporučujú však kvôli pevnosti v ťahu maximálne 60 % náhrady hrubej aj drobnej frakcie. Hlavným nepriaznivým faktorom je zvýšené množstvo vody, pripísané najmä použitiu RCA. Má výrazný vplyv na mrazuvzdornosť a teda životnosť výrobku, preto práve množstvo použitej vody určili ako rozhodujúci aspekt pre využitie RCA do betónových dlažieb. Využitie betónového recyklátu spolu s troskovým kamenivom nachádza uplatnenie aj do asfaltových zmesí. Prináša isté klady aj zápory. Ako je uvedené v [44] stabilita podľa Marshallovej skúšky vzrástla a tečenie zmesi sa znižovalo, keď RCA nahradilo drobnú frakciu a troska drobné alebo hrubé kamenivo. Ako najvýhodnejšia sa osvedčila zmes prírodného filleru (konkrétne Dacit), drobného RCA a hrubého troskového kameniva. [36][37][43][44]

Stupeň vplyvu prostredia	Použitelnosť RCA
X0	ÁNO
XC1, XC2, XC3/4	ÁNO
XD1	MOŽNO*
XS1	MOŽNO*
XF1	ÁNO
XF2, XF3, XF4	MOŽNO*

* Použiteľné ak sa preukáže vhodnosť skúškami

Tabuľka 8: Použitie RCA pre jednotlivé stupne vplyvu prostredia [57]

V grafe 3 je znázornené použitie RCA v stavebnom priemysle. Ako je patrné, najväčšie zastúpenie nachádza v podkladových vrstvách.



Graf 3: Percentuálne využitie kameniva z recyklovaného betónu [11]

3 Pozemné komunikácie

3.1 Základné pojmy

Pri návrhu telesa pozemnej komunikácie sa riadime normami ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic a ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Teleso pozemnej komunikácie sa skladá zo spodnej a vrchnej stavby a je tvorené z nasledujúcich častí:

- zemné teleso
- vozovka
- cestné objekty (mosty, lávky, priepusty, tunely a galérie, múry a rovnaniny)
- odvodňovacie zariadenia (priekopy, rigoly, podsypy, trativody, potrubia, sklzy, stupne a prahy)
- vodiace pružky, spevnené aj nespevnené časti krajnice, dopravné plochy a bezpečnostné zariadenia [26] [27] [29] [30]

3.1.1 Zemné teleso

Zemné teleso je výsledkom zemných prác a úprav, ktoré vyrovnáva nerovnosti povrchu terénu danej komunikácie tak, aby boli splnené požiadavky na smerové aj výškové prvky zodpovedajúce kategórii komunikácie. Jeho funkciou je aj ochrana pred účinkami povrchových a pozemných vôd, ktorá sa zabezpečí úpravou výšky nivelety. Konštrukčné požiadavky stanovuje ČSN 73 6133, ČSN 73 3050 a vzorové listy VL 2. [26] [31]

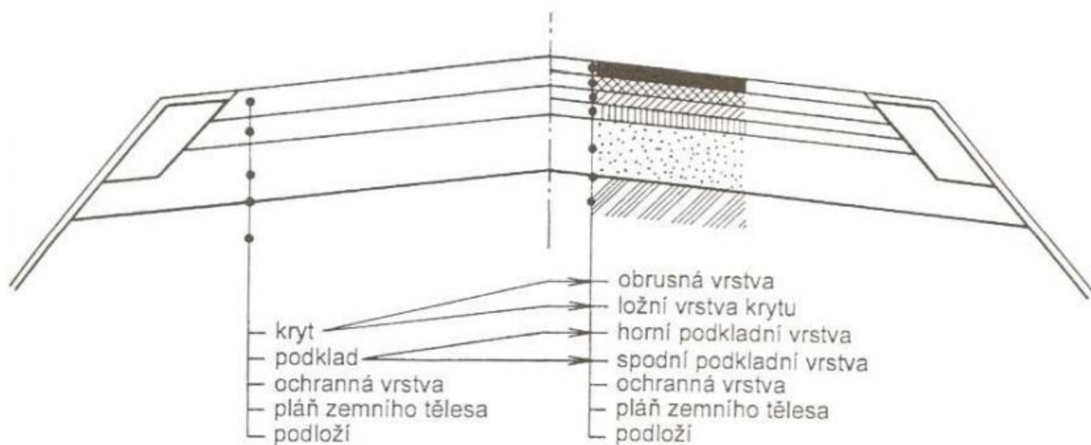
3.1.2 Vozovka

„Vozovka je viacvrstvová konštrukcia na povrchu cestného telesa alebo inej stavebnej konštrukcie, navrhnutá a postavená z cestných stavebných materiálov s vhodnými vlastnosťami tak, aby umožnila rýchlu, bezpečnú, pohodlnú a hospodárnu jazdu motorových vozidiel.“ [25]

Jednotlivé vrstvy konštrukcie vozovky (obr. 13) sú tvorené rôznymi materiálmi a majú špecifický účel, delia sa následovne:

- Kryt
 - o Obrusná vrstva
 - o Ložná vrstva
- Podkladová vrstva
 - o Horná vrstva

- Spodná vrstva
- Ochranná vrstva



Obrázok 13: Priečny rez vrstvami vozovky [57]

3.1.2.1 Kryt

„Hornú vrstvu krytu tvorí obrusná vrstva, ktorá priamo prenáša účinky dopravného zaťaženia a je priamo vystavená klimatickým vplyvom. Spodná vrstva krytu - ložná vrstva, vytvára priaznivé podmienky pre polozenie a funkciu obrusnej vrstvy a prenáša zaťaženie na podklad.“^[25]

3.1.2.2 Podkladová vrstva

Hlavnými nosnými vrstvami cestnej vozovky je podklad zložený z hornej a spodnej podkladovej vrstvy. Vytvárajú najväčšiu mechanickú odolnosť.

3.1.2.3 Ochranná vrstva

Spodnú vrstvu vozovky tvorí ochranná vrstva, ktorá má viacero funkcií - zabraňuje prieniku podložnej zeminy do konštrukcie vozovky, odvodňuje, chráni pred mrazom podložie a tvorí vhodný základný povrch pre podkladové vrstvy. Ochranné vrstvy môžu byť stmelené aj nestmelené materiály, napr. štrkodrt', štrkopiesok, mechanicky spevnená zemina, ztmelená zemina a podobne. Pri ztmelenej ochrannej vrstve je dobré použiť vrstvu nad ňou nestmelenú (nemusí byť ak je podložie z nesúdržnej zeminy), kvôli priepustnosti. [28] [31]

3.1.2.4 Pláň zemného telesa a podložie

Netvorí konštrukciu vozovky, nachádzajú sa pod ochrannou vrstvou. „Podložie ovplyvňuje skladbu a vlastnosti vozovky. Ak je únosnosť podložia malá, jeho horná časť sa upravuje zlepšením alebo výmenou zeminy.“^[25]

3.2 Cementobetónové kryty (CB)

ČSN 13877-1 definuje cementobetónová kryt ako „betonová vrstva schopná nést priáme dopravné zaťaženie a pôsobenie prostredia“. Tvorí tuhú vozovku. Už dlhšiu dobu sa využíva technológia trńov a kotiev, zabezpečujúca plynulú jazdu. Hlučnosť je eliminovaná vlečnou jutosťou, ktorá vytvára makrotextúru povrchu. [54][58]

Výhody:

- vysoká únosnosť
- životnosť (výhoda aj nevýhoda)
- odolnosť voči chemickým látkam
- svetlý povrch (dobrá viditeľnosť večer, nižšia teplota povrchu)
- protišmykové vlastnosti
- rovný povrch (absencia vyjazdených „kolají“) [59]

Nevýhody:

- technológia výroby (doba tuhnutí apod.)
- zložité opravy [59]

Mnohé krajiny EÚ sa rozhodli pre CB ako pre výhodnejšiu variantu pre ich diaľničné kryty. Krajiny, ktoré väčšinou využívajú CB a to najmä na najfrekvencovanejšie úseky sú napríklad Belgicko (41 %), Nemecko (31 %), Francúzsko, Rakúsko a Česká republika. [8]

Cementobetónové kryty, ktoré naplnili svoju životnosť, prípadne ich povrch je značne trhlinkovitý a prestáva plniť funkciu, na ktorú bol navrhnutý, je možné využiť ako recyklované kamenivo. Pri zrecyklovaní 10km cementobetónového krytu (v závislosti od hrúbky a šírky) je možné z neho vyrobiť až 30 000 ton vysokokvalitného RCA. Pre znovupoužitie je dôležité, aby RCA nebolo poškodené mrazom, ani chemickými rozmrazovacími látkami (CHRL) alebo alkalicko-kremičitou reakciou (ASR). Nemecká organizácia - German road and transportation research association hovorí o tom, že ak vrstva krytu nie je nijak výrazne zničená alebo je len poddimenzovaná (podkladné vrstvy

nie sú zničené), potom zrecyklovaniu tohto krytu a získaniu kameniva pre nové využitie nestojí nič v ceste. V súčasnosti sa na pokládku CB z RCA používa klasická technológia pozostávajúca z dávkovacieho zariadenia a finišera s kĺznymi bočnicami.[49]

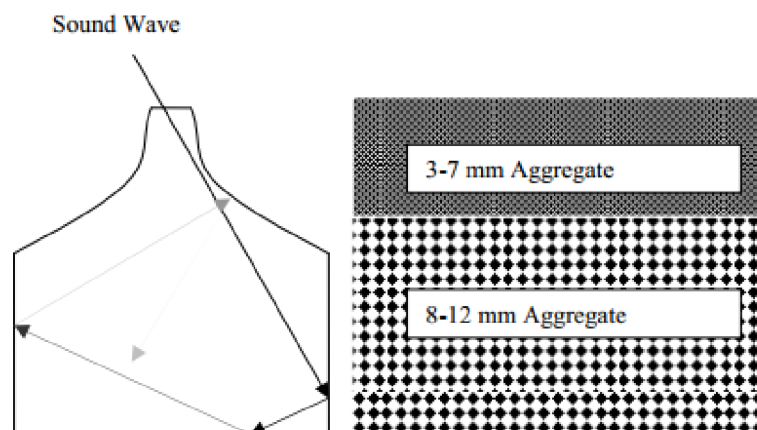
Hodnota súčiniteľa šmyku (PTV - Pendulum test value) sa pri krytoch z RCA pohybuje okolo 108 - 104, zatiaľ čo pri CB z NA je to 98. V podstate kryt z RCA dosahuje skoro rovnaké vlastnosti ako kryt z prírodného kameniva, avšak rozdiely boli pozorované v účinnosti prenosu zaťaženia v dôsledku zbytkovej malty na povrchu RCA. [48]

3.2.1 Dlhodobé správanie CB s RCA

- Yrjanson zdokumentoval, že použitie RCA v konštrukčných vrstvách vozoviek začalo už v roku 1964 v Love Field v Dallase, kde bolo použité ako kamenivo ztmelené cementom. Taktiež uvádza nespočetne veľké množstvo CB a letiskových plôch zhotovených v rokoch 1975 - 1986.
- 1986 - 1987 inštitúcia v Illinois testovala vystužený CB kryt na diaľnici I-57, ktorý obsahoval 100 % recyklátu ako hrubého kameniva a z drobnej frakcie tvoril 35 %. Vozovka bola monitorovaná a po 5 - 6 rokoch v prevádzke neboli zaznamenané žiadne poruchy. Až po 20 rokoch používania vozovka začala praskať pozdĺž výstuže.
- Ďalší výskumom bol zrýchlený test zameraný na simuláciu zaťaženia po dobu 4,2 roku. Výsledkom bolo, že aj pri nahradení hrubého kameniva 100% recyklátom, vozovka odoláva porovnateľne dobre ako s prírodným kamenivom.
- Wade zdokumentoval celú radu využitia RCA do pozemných konštrukcií. V jednej z jeho prác poukázal na fakt, že RCA vykazovalo vyšší stupeň pevnosti v tlaku ako NA, s výjimkou jednej vzorky. V práci nebolo však preukázané, že by RCA a zbytková malta z neho mala vyplv na vzniknuté praskliny a drolenie.
- Sturtevant sa zaoberal výskumom starnutia CB s RCA. Dokázal, že ich vlastnosti a chovanie je obdobné ako pri krytoch z NA, napriek tomu, že kryt z RCA obsahoval kamenivo postihnuté alkalicko-kremičitou reakciou.
- Projekt MnROAD sa zaoberal testovaním dvojvrstvého CB, pričom spodná vrstva bola z 50 % RCA. Jeden rok sledovali deformácie od nákladnej dopravy denne prechádzajúcej a dospeli k záveru, že tento kryt má odolnosť adekvátnu požiadavkám. Je dôležité podotknúť, že takto vyrábané CB dosahujú pri zmenách teplôt vzrast vnútorného napätia a preto nie sú navhodnejším riešením. [8][56]

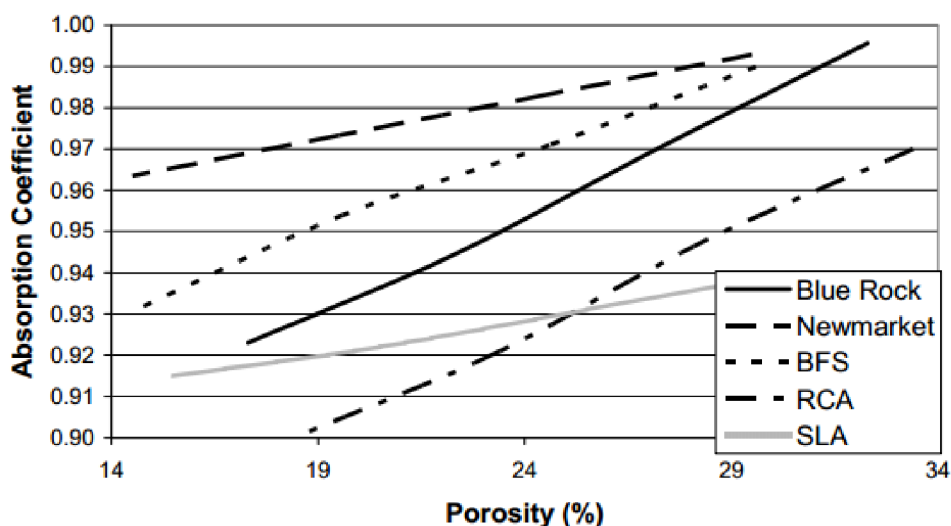
- Momentálne je v USA minimálne 15 štátov, ktoré majú aspoň jednu vozovku s krytom z RCA. [52]

Dôležitou vlastnosťou, ktorú by mali CB splňovať je ich nízka hlučnosť. Mnohokrát je táto požiadavka podporovaná protihlukovými stenami. Tie však nie sú riešením z pohľadu ekonomického. Problížne 20 - 30 miliónov Kč je potrebných na 1,6 km protihlukových stien. Rozumnou alternatívou je vyrobiť CB, ktorý je sám o sebe „tichý“. Riešenie je jednoduché - pórovitosť. S rastúcou pórovitosťou CB je hluk z premávky tlmenejší. V Japonsku namerali pri 10,5% pórovitosti CB zníženie hluku až o 6-8 dB. Štúdie z Nemecka zas pri 25% pórovitosti dosahovali o 4,3-7 dB lepšie výsledky. Princíp spočíva vo vytvorení jemnozrnej vrstvy povrchu krytu a hrubozrnejšej na spodnej časti (obr. 14). Keď sa zvuková vlna dostane do pórovej štruktúry, odráža sa od stien a tým stráca na svojej intenzite, čím sa zvuk utlmí. [53]



Obrázok 14: Šírenie zvuku v pórovitom CB [53]

Na základe výsledkov z štúdie [53] zobrazených v grafe 4 môžeme povedať, že pohltivosť zvuku je jednoznačne závislá na pórovitosti CB. Takisto je vidieť, že závisí od druhu kameniva a od jeho tvarového indexu (guľatejšie zrná tlmia lepšie). Keďže recyklát je drtený materiál, nedosahuje najlepšie výsledky, ale sú uspokojivé a obdobné ako u NA. [53]



Blue rock - prírodné drtené kamenivo; Newmarket - prírodné ťažené kamenivo z Ťadovcovej oblasti; BFS - Troskové kamenivo; RCA - recyklovaný betón; SLA - Ľahké umelé kamenivo z popolčeka a umelej hmoty

Graf 4: Závislosť pohltivosti zvuku na pórovitosti CB [53]

3.3 Podkladové vrstvy

Podľa TP 210 je recyklát z betónu vhodný pre konštrukcie vozovky podľa tabuľky 9.

	AB	CB	MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ	S	VŠ	podložie	zemné teleso
Vhodnosť použitia RCA	+	0/-	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0

+	doporučuje sa použiť	MZK	mechanicky spevnené kamenivo
-	nedoporučuje sa použiť	ŠD	štrkodrt'
0	podmienečne použiteľný	MZ	mechanicky spevnená zemina
AB	asfaltové vrstvy vozoviek	S	zmes ztmelená hydraulickými spojivami
CB	cementobetónové kryty vozoviek	VŠ	vibrovaný štrk

Tabuľka 9: RCA v konštrukcii vozovky

3.3.1 Neztmelené vrstvy

ČSN 73 6126-1 definuje nestmelené podklady ako „vrstva vozovky vyrobená z nestmelené směsi nebo zeminy bez použití pojiva“.^[39] Majú nosnú funkciu a ako z názvu vyplýva, nie sú ztmelené žiadnym spojivom. Dopravné zaťaženie sa prenáša vysokým vnútorným trením medzi jednotlivými zrnami kameniva. Môžu byť použité pri úžitkových cestách ako krytová vrstva.

Druhy neztmelených vrstiev:

- Štrkopiesek (ŠP)
- Štrkodrt' (ŠD)
- Mechanicky spevnená zemina (MZ)

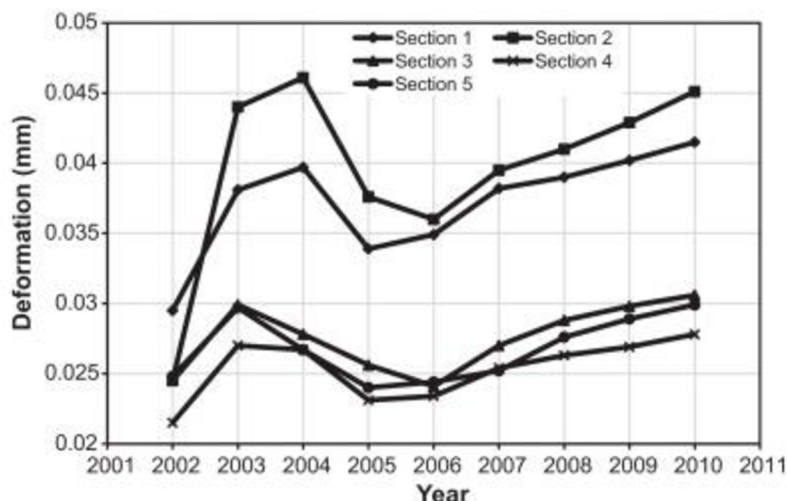
- **Mechanicky spevnené kamenivo (MZK)**
- **Mechanicky spevnené kamenivo otvorené (MZKO) [39]**

Požiadavky:

- únosnosť, taktiež závislá od únosnosti podložia
- trvanlivosť
- obmedzenie ílových minerálov - kvôli horšej spracovateľnosti
- nenamrzavosť vrstev (Casagrandeho kritérium = podiel častíc menších ako 0,02 mm < 3 %)
- filtračné kritériá [59]

V USA bolo testované RCA v nestmelených vrstvách kameniva spolu s geosyntetickým vystužením. Tento podnet vznikol na základe potreby úplne eliminovať, resp. znížiť prídavok chemických prísad ovplyvňujúcich vlastnosti RCA. Tieto chemikálie nie vždy spĺňajú ekologické požiadavky, preto práve vrstva RCA bez prírodného kameniva spevnená geosynteticky bola možným riešením. Skúšané bolo referenčné prírodné kamenivo (selection 1), prírodné kamenivo drtené (selection 2) a recyklované kamenivo (selection 3,4,5). Recyklát bol zložený z 60 % betónovej drte, 25 % asfaltovej drte a zbytok tvorili nečistoty ako napríklad tehliarske výrobky. Všetky vrstvy boli hrubé 325 mm, okrem vrstvy 5, ktorá mala 150 mm. Ako stužujúci materiál použili geomreže, geotextílie a geobuňky. Priebeh deformácií v čase je znázornený v grafe 5.

Z grafu vyplýva, že prírodné kamenivo vykazovalo približne o polovicu horšie výsledky ako recyklát. S istotou je teda možné tvrdiť, že geosyntetika je vhodná na použitie do neztmelených vrstiev vozovky, pričom hrúbka vrstvy z RCA môže byť znížená až o polovicu oproti NA. Použitie konkrétne geomreží zvyšuje účinnosť RCA, prispieva k redukcii trhlin v krytoch vozoviek a efektívne rozkladá napätie vznikajúce od dopravného zaťaženia. [50]



Graf 5: Dlhodobé správanie sa nestmelených podkladov z RCA s geosyntetikou [50]

3.3.2 Vrstvy zo zmesí ztmelených hydraulickými spojivami (S)

Výhody:

- Využitie druhotných surovín a recyklátov
- Zníženie ťažby prírodných surovín
- Trvanlivosť
- Vysoká pevnosť a tuhosť - úspora materiálu znížením hrúbky vrstvy
- Nenáročnosť na technické zariadenia

Nevýhody:

- Praskliny
- Krehkosť

Na základe toho čo tvorí spojivo týchto zmesí ich delíme nasledovne:

- **Zmes z kameniva ztmelená cementom (SC)**
- **Zmes z kameniva ztmelená troskou (SS)**
- **Zmes z kameniva ztmelená popolčekom (SP)**
- **Zmes z kameniva ztmelená hydraulickými cestnými spojivami (SH)**

3.3.2.1 Použitie RCA v zmesiach ztmelených hydraulickými spojivami

Obecné použitie S je podľa ČSN 73 6124-1 uvedené v tabuľke 10. Keďže S sú zmesi zavlhé, problém s nasiakavosťou RCA má istý dopad na spotrebu vody. V porovnaní s prírodným kamenivom, je množstvo vody potrebné pre optimálnu vlhkosť určenú Proctorovou skúškou ČSN EN 13286-2 zvýšené. Na základe toho, je dosahovaná objemová hmotnosť zatvrdlého kompozitu nižšia oproti použitiu NA.

Technológovia zo Španielska konštatovali v [61] že RCA má vplyv aj na dobu spracovateľnosti, preto odporúčajú použiť retardujúcu prísadu. Takisto uvádzajú, že pri ztmelení cementom je možné použiť RCA znečistené o tehly, je však vhodné preveriť jeho vlastnosti skúškami.

Vyplývajú z vlastností RCA sa jeho použitie do SC zdá najvhodnejším použitím z ekonomického aj enviromentálneho hľadiska.

V Texaskej štúdii sa uvádza, že optimálne množstvo cementu do SC je 1,5 %. Primárna cementová malta obaľujúca zrná zrejme zohráva rolu na tak nízke zastúpenie. Ďalšia vlastnosť pripísaná RCA je, že s jemne zvýšenou objemovou hmotnosťou SC sa zrýchľuje tuhnutie zmesi a zvyšujú sa dlhodobé pevnosti. [62]

Trieda pevnosti v tlaku Rc	Doporučená trieda dopravného zat'azenia		
	Krytová vrstva	Horná podkladná vrstva	Dolná podkladná vrstva
< C _{1,5/2}	-	-	-
C _{1,5/2}	-	III, IV, V a VI	bez obmedzenia
C _{3/4}	-	bez obmedzenia	bez obmedzenia
C _{5/6}	V, VI	bez obmedzenia	-
C _{8/10}	V, VI	bez obmedzenia	-
C _{12/16}	V, VI	-	-
≥ C _{15/20}	-	-	-

Tabuľka 10: Použitie zmesi stmelených hydraulických spojivami do vozoviek [55]

3.3.2.2 Požadavky na kamenivo

V tabulce 11 uvádám požadavky na kamenivo pro zmesi stmelené hydraulickým spojivom podľa ČSN 73 6124-1.

Článek normy ČSN EN 13242 ed. 2	Vlastnost		Kategorie podle ČSN EN 13242 ed. 2 pro třídu pevnosti	
			C _{1,5/2} a C _{3/4}	C _{5/6} , C _{8/10} a C _{12/16}
4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, tabulka 2	Všeobecné požadavky na zrnitost HK DK směs		G _C 80/20 G _F 80 G _A 80	G _C 85/15 G _F 85 G _A 85
4.3.2, tabulka 3	Typická zrnitost propadu na středním síti u hrubého kameniva		G _{NR}	
4.3.3, 4.3.4, tabulka 4	Typická zrnitost propadu na středním síti u drobného kameniva a směsi kameniva		G _{TCNR}	
4.4, tabulka 6	Max. obsah jemných částic HK DK směs		f _{Deklarovaná} f _{Deklarovaná} f ₁₅	f _{Deklarovaná} f _{Deklarovaná} f ₉
4.5, tabulka 7	Kvalita jemných částic	Ekvivalent písku	SE10 _{NR} , SE4 _{NR}	SE4 ₃₅ nebo $I_p \leq 4$ ^{a, b}
-		Plasticita	$I_p \leq 17$ ^a	
4.5, tabulka 8		Methylenová modř	MB _{NR} , MB _{FNR} , MB _{ANR}	
4.6.1, tabulka 9	Index plochosti		F _{NR}	
4.6.1, tabulka 10	Tvarový index		S _{NR}	S ₁₅₅
4.6.2, tabulka 11	Podíl drcených nebo lámaných zrn		C _{NR}	
4.6.3, tabulka 12	Tvar zrn drobného kameniva		E _{CSNR}	
5.2, tabulka 13	Odolnost proti drcení Los Angeles		LA _{NR}	LA ₅₀
5.2, tabulka 14	Odolnost proti drcení v rázu		SZ _{NR}	
5.3, tabulka 15	Odolnost proti otěru		M _{DENR}	
5.4.1	Objemová hmotnost		Deklarovaná hodnota	
6.3, tabulka 17	Složky recyklovaného kameniva		X ₁₋ pro ostatní složky deklarovaná hodnota	
6.4.1, tabulka 18	Síraný rozpustné v kyselině		AS _{NR}	
6.4.2, tabulka 19	Celkový obsah síry		S _{NR}	S ₁ S ₂ (struska)
6.4.3, tabulka 20	Obsah vodou rozpustných síranů v recyklovaném kamenivu		SS _{NR}	SS _{0,2}
6.5.1	Přítomnost organických látek ^c		Světlejší než etalon	
6.5.2.1	Silikátový rozpad vzduchem chlazené vysokopecní strusky		Bez podezření na rozpad	
6.5.2.2	Železnatý rozpad vzduchem chlazené vysokopecní strusky		Bez podezření na rozpad	
6.5.2.3, tabulka 22	Objemová stálost kameniva z ocelářské strusky (rozplínavost)		V ₅	
7.2, tabulka 23	Odolnost hrubého kameniva síranem hořečnatým		MS _{NR}	
7.3.1	Nasákavost		Bez požadavků	
7.3.2, tabulka 25	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování		F ₄	
7.4, tabulka 27	Rozpadavost čediče		SB _{NR}	SB _{LA} deklarovaná

^a I_p index plasticity a w_L mez tekutosti podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Pokud vzhledem k charakteru materiálu nelze provést zkoušku meze plasticity, pak platí I_p = 0 a zkouška meze tekutosti se neprovádí

^b Je možno použít jen jednu z uvedených zkoušek.

^c Vlastnost se vyžaduje pouze u drobného kameniva.

Tabulka 11: Požadavky na kamenivo

4 Zhrnutie

Na základe vyššie uvedeného hodnotím znovupoužitie kameniva z recyklovaného betónu ako vhodné. Vo viacerých praktických prípadoch sú opomínané problematické vlastnosti RCA, ktoré spôsobujú nepredvídateľné chovanie a takisto majú dopad na zhoršenie výsledných charakteristík. Napriek tomuto poznatku sa uvádzajú aj výsledky podporujúce využívanie RCA, ktoré pri hlbšom preskúmaní môžu viesť k zdarnému vyriešeniu tejto problematiky.

II. Experimentálna časť

1 Cieľ

Cieľom praktickej časti bolo overenie použitia recyklovaného kameniva (RCA) z betónových predpínaných dutinových stropných panelov SPIROLL zo závodu Prefa Brno a. s. do zmesi kameniva ztmeleného cementom a betónu. Zároveň na základe skúšky mrazuvzdornosti mala byť posúdená vhodnosť použitia betónu C 30/37 s recyklovaným kamenivom do stupňa vplyvu prostredia XF3.

2 Metodika

Pre zmesi stmelené cementom budú použité značky podľa ČSN 73 6124 (SC C_{8/10} = KSC I, SC C_{5/6} = KSC II). Bolo vytvorených celkovo 6 skúšobných valcov pre KSC I a 6 skúšobných valcov pre KSC II na základe receptúry stanovenej s ohľadom na optimálnu vlhkosť zmesi a požadovanú krivku zrnitosti. Po 7 a 28 dňoch normového zrenia sa valcové telesá podrobili skúške pevnosti v tlaku. Z výsledkov pevností sa zmesi zatriedili do pevnostných kategórií a na základe tohto označenia sa posúdili na vhodnosť do podkladových vrstiev stmelených cementom. Zo zmesi na výrobu betónu C16/20 sa zhotovilo 6 skúšobných telies 150 × 150 × 150 mm frakcia 0/4 mm z prírodného kameniva a frakcie 4/8 a 8/16 z recyklovaného kameniva (RCA) a 6 referenčných skúšobných telies 150 × 150 × 150 mm s kamenivom čiste prírodným (NA). U zmesi na výrobu pevnostnej triedy C30/37 bolo zhotovených 6 skúšobných telies 150 × 150 × 150 mm s prírodným kamenivom frakcie 0/4 a frakcie 4/8, 8/16 boli z recyklovaného kameniva a 6 referenčných skúšobných telies 150 × 150 × 150 mm s kamenivom prírodným. Kvôli skúške mrazuvzdornosti boli z tejto triedy zhotovené aj 4 trámce 100 × 100 × 400 mm s prírodným kamenivom a 4 trámce 100 × 100 × 400 mm s náhradou frakcie 4/8 a 8/16 kamenivom recyklovaným. Všetky skúšobné telesá boli podrobené skúškam na základe noriem vypísaných v tabuľke č. 12. Pre zloženie receptúr, viz tabuľka 15.

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 16/20	
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
KSC I, II	
ČSN 73 6124	Stavba vozovek. Kamenivo stmelené hydraulickým pojivem**
ČSN EN 13286-2	Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška
ČSN EN 13286-50	Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 50: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu
ČSN EN 13286-41	Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelěných hydraulickými pojivy

* Nasiakavosť bola určovaná iba na recyklovanom kamenive

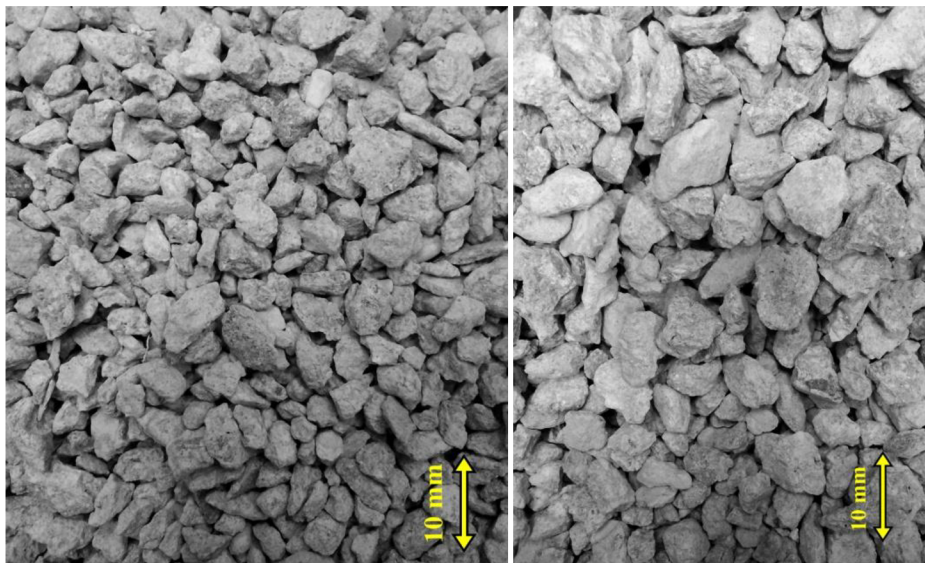
** Neplatná norma, bola použitá iba na oblasť zrnitosti pre kamenivo ztmelené cementom použitú v grafe 12, 13

Tabuľka 12: Výpis noriem použitých v praktickej časti

3 Použité suroviny

3.1 Kamenivo

Na výrobu skúšobných telies boli použité kamenivá prírodné, konkrétne TK 0/4 mm Žabčice, DK 4/8 Olbramovice, DK 8/16 Olbramovice a kamenivá recyklované z výroby betonových predpínaných dutinových stropných panelov SPIROLL ($f_{ck} = 55$ MPa) zo závodu Prefa Brno a. s. (obr. 15).

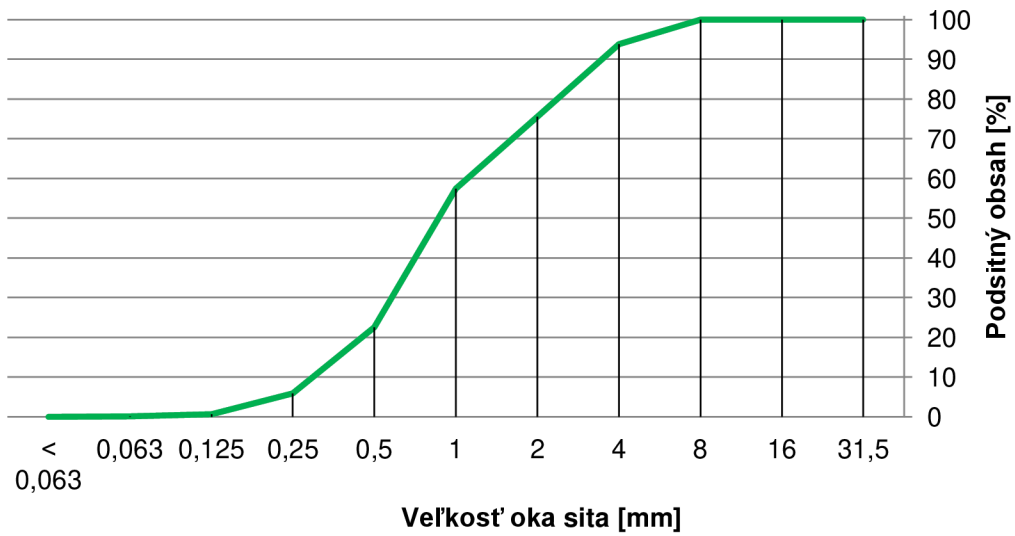


Obrázok 15: Betonový recyklát - vľavo frakcia 4/8 mm a vpravo 8/16 mm

3.1.1 Granulometria

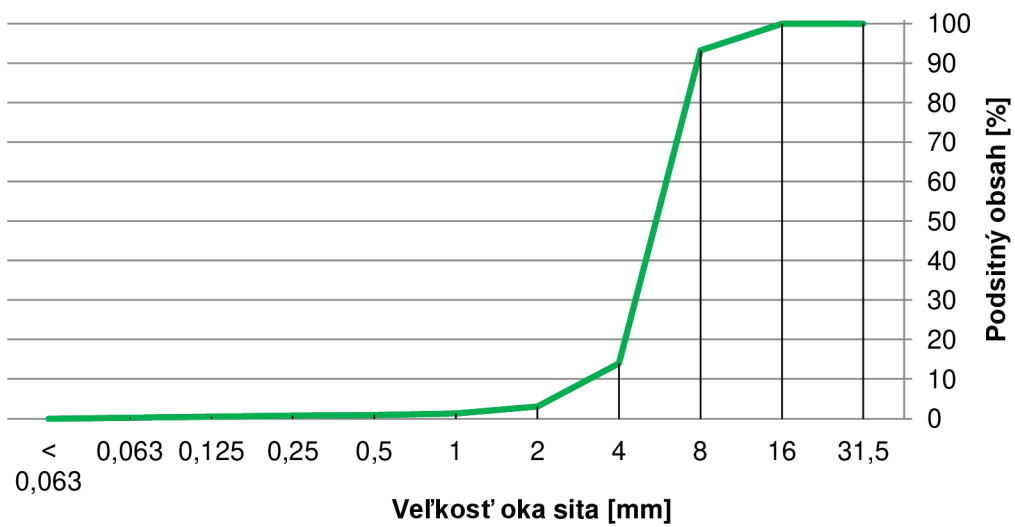
Pre návrh jednotlivých receptúr bolo smerodátne poznať krivku zrnitosti kamenív použitých do zámesí. Bola vykonaná skúška granulometrie na základe normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. Výsledné zastúpenie jednotlivých frakcií je uvedené v grafe č. 6 - 10.

TK 0/4 ŽABČICE



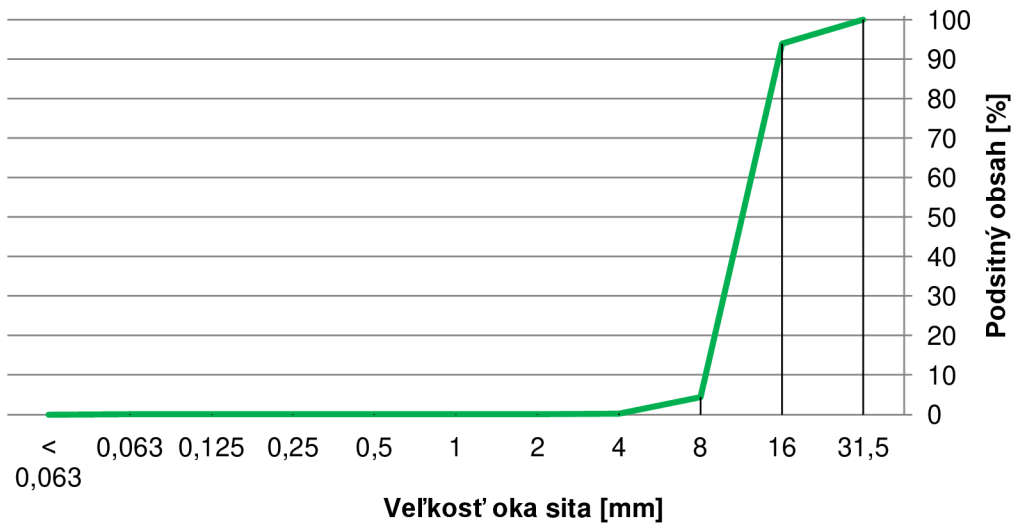
Graf 6: Krivka zrnitosti prírodného ťaženého kameniva frakcie 0/4 Žabčice

DK 4/8 OLBRAMOVICE



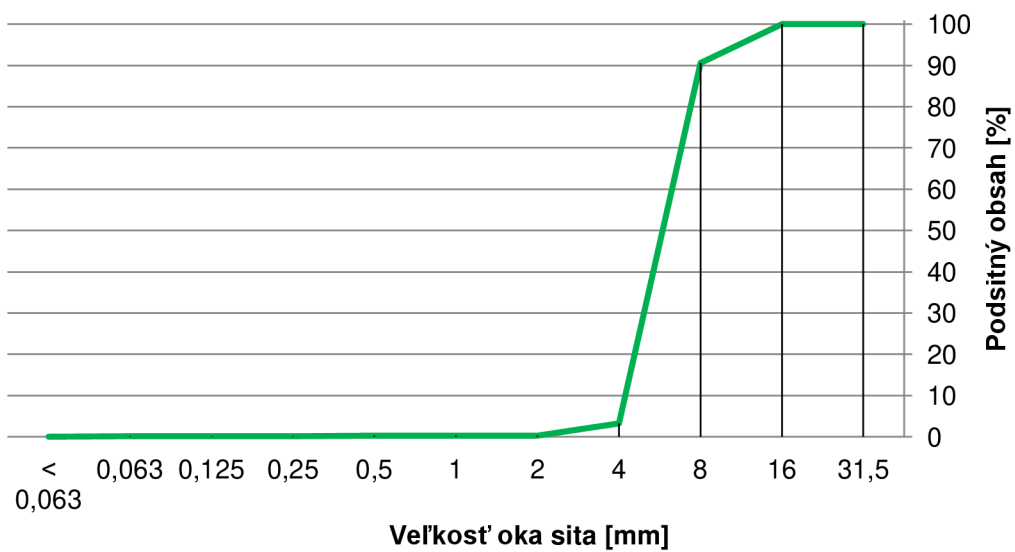
Graf 7: Krivka zrnitosti prírodného drteného kameniva frakcie 4/8 Olbramovice

DK 8/16 OLBRAMOVICE



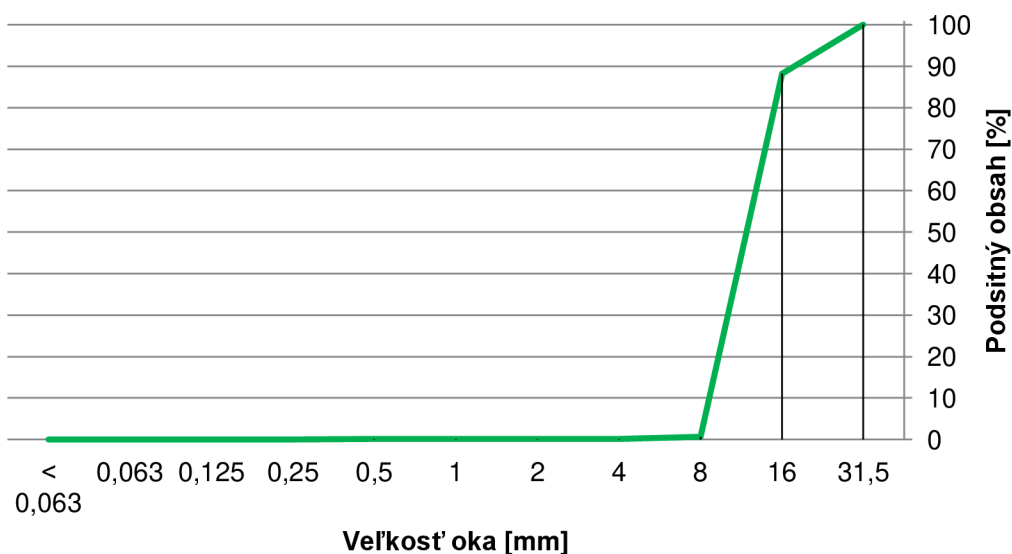
Graf 8: Krivka zrnitosti prírodného drteného kameniva frakcie 8/16 Olbramovice

4/8 BETÓNOVÝ RECYKLÁT



Graf 9: Krivka zrnitosti betónového recyklátu frakcie 4/8

8/16 BETÓNOVÝ RECYKLÁT



Graf 10: Krivka zrnitosti betónového recyklátu frakcie 8/16

3.1.2 Objemová hmotnosť a nasiakavosť kamenív

Po zistení zrnitosti kameniva nasledovalo stanovenie objemových hmotností kamenív pomocou odmerného valca (objem 2 l) pre NA aj RCA a nasiakavosti 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 13 a nasiakavosti RCA tabuľka 14. Porovnanie nasiakavosti recyklátu znázorňuje graf 11 a výsledky objemových hmotností kamenív použitých v praktickej časti zobrazuje graf 12.

TK Žabčice	
0/4	ρ_p [kg·m ⁻³]
	2540
DK Olbramovice	
4/8	ρ_p [kg·m ⁻³]
	2440
DK Olbramovice	
8/16	ρ_p [kg·m ⁻³]
	2560

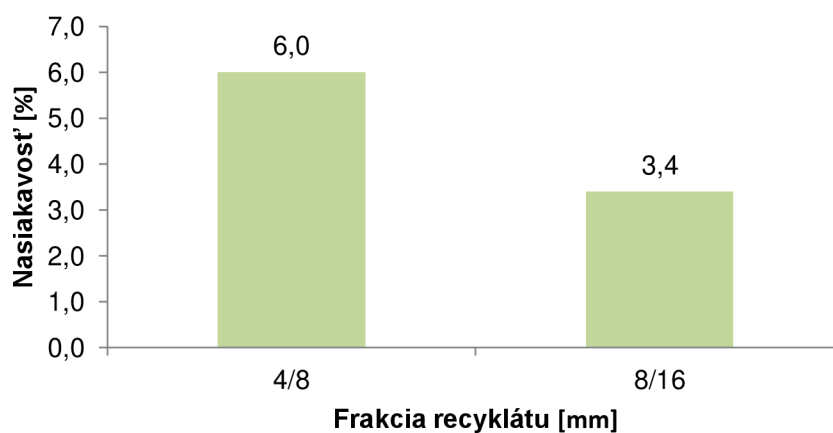
Betónový recyklát	
4/8	ρ_p [kg·m ⁻³]
	2380
8/16	ρ_p [kg·m ⁻³]
	2360

Tabuľka 13: Objemové hmotnosti prírodného a recyklovaného kameniva

Betónový recyklát	
Frakcia	Nasiakavosť [%]
4/8	6,0
8/16	3,4

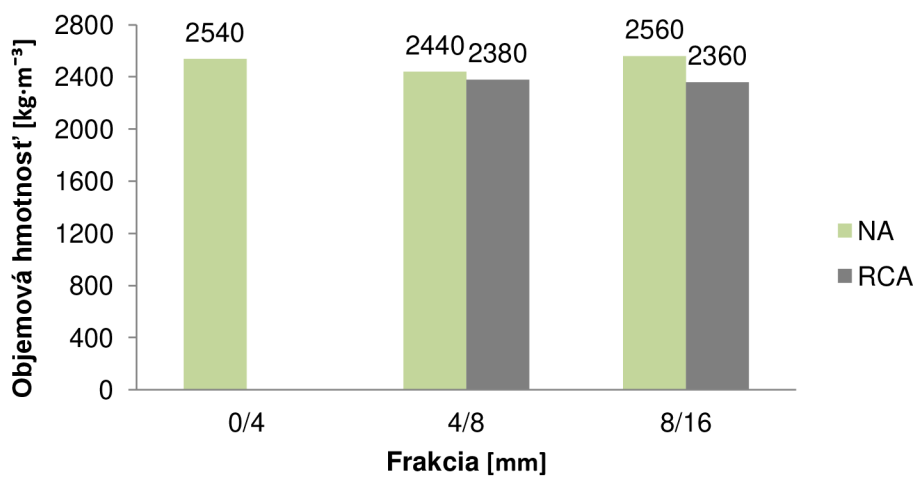
Tabuľka 14: Nasiakavosť betónového recyklátu

Nasiakavosť betónového recyklátu



Graf 11: Nasiakavosť recyklovaného betónu

Objemová hmotnosť kamenív



Graf 12: Porovnanie objemových hmotností použitých kamenív

3.2 Cement

Cement bol použitý dvojaký. Na použitie do KSC I/ KSC II bol potrebný cement s nízkym vývinom hydratačného tepla kvôli predĺženej dobe manipulácie s čerstvým betónom, z tohto dôvodu som zvolila CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R od spoločnosti Českomoravský cement a.s., závod Mokrý. Na betónové zmesi bol použitý CEM I 42,5 R taktiež od spoločnosti Českomoravský cement a.s., závod Mokrý.

3.3 Voda

Zámesová voda nebola špeciálne upravovaná, jednalo sa o vodu z mestskej vodovodnej siete.

3.4 Prísady

Ako plastifikačná prísada bol použitý naftalén Mapefluid N200 a to iba do zmesi C 30/37.

3.5 Prímеси

Neboli použité žiadne prímеси.

4 Čerstvý betón

4.1 Receptúra

Pri návrhu receptúry bolo usilované o ponechanie rovnakých, prípadne minimálne líšiacich sa hodnôt cementu a vody. Jediné čo sa obmieňalo výraznejšie bolo množstvo kameniva frakcie 4/8 a 8/16 jak recyklovaného, tak prírodného. Snahou bolo poukázať na vplyv kameniva z recyklovaného betónu v porovnaní s kamenivom prírodným bez možnosti zkeslenia výsledkov účinkom ostaných zložiek betónu.

Pre jednoduchšiu orientáciu v označeniach použitých v receptúrach v tabuľke 15, prikladám kľúč k určaniu skratiek:

NA - zmes z prírodného kameniva

RCA - zmes z recyklovaného kameniva frakcie 4/8 a 8/16 mm (frakcie 0/4 mm prírodné kamenivo)

M - mrazuvzdornosť (100 cyklov)

REF - referenčné vzorky príslušné k zmrazováním

Napr.: C 16/20 RCA

= betón pevnosti 16/20 s recyklovaným kamenivom

C 30/37 NAM

= betón pevnosti C30/37 s prírodným kamenivom určený k zmrazovaniu na 100 cyklov

C 30/37 RCAR

= referenčný betón k zmrazovaniu pevnosti C 30/37 s recyklovaným kamenivom

C 16/20 NA	kg/m³
CEM I 42,5 R Mokr	320
0/4 abice	905
4/8 Olbramovice	202
8/16 Olbramovice	680
Voda (v/c = 0,59)	189
C 16/20 RCA	kg/m³
CEM I 42,5 R Mokr	320
0/4 abice	905
4/8 RCA	173
8/16 RCA	580
Voda (v/c = 0,58)	185
C 30/37 NA	kg/m³
CEM I 42,5 R Mokr	365
0/4 abice	872
4/8 Olbramovice	220
8/16 Olbramovice	702
Voda (v/c = 0,47)	172
Mapefluid N200	0,8 % m _c = 2,92
C 30/37 RCA	kg/m³
CEM I 42,5 R Mokr	365
0/4 abice	872
4/8 RCA	189
8/16 RCA	598
Voda (v/c = 0,47)	171
Mapefluid N200	0,8 % m _c = 2,92

Tabulka 15: Použit receptury pre jednotlivé zmesi



Obrázok 16: Ukzka zmeis pre betón C 30/37 RCA

4.2 Konzistencia

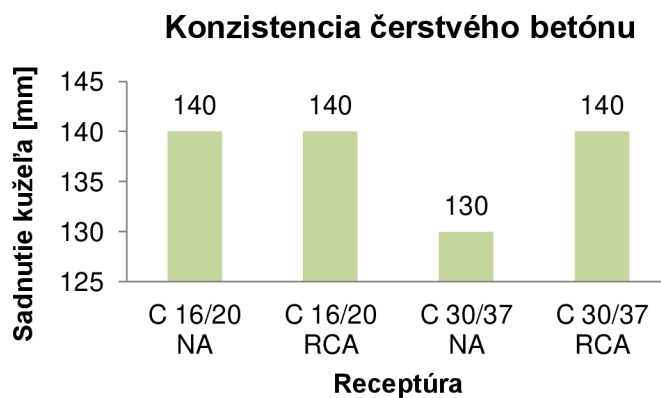
Pomocou receptúr uvedených vyššie boli namiešané im zodpovedajúce zámesi. Skúška konzistenie sadnutím kužela bola stanovená na všetkých betónových zámesiach podľa ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sadnutím. Stupeň konzistencie a samotné sadnutie je znázornené v tabuľke 16, grafe 13 a na obrázku 17.

Označenie zmesi	Sadnutie kužela [mm]	Stupeň konzistencie
C 16/20 NA	140	S3
C 16/20 RCA	140	
C 30/37 NA	130	
C 30/37 RCA	140	

Tabuľka 16: Vyhodnotenie skúšky konzistencie čerstvého betónu



Obrázok 17: Sadnutie kužela, stupeň S3 - 130 mm



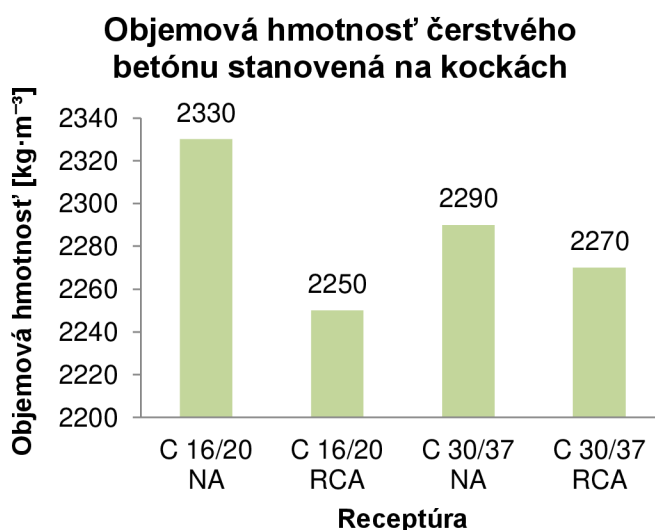
Graf 13: Konzistencia čerstvých zmesí

4.3 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 17 a grafe 14.

Označenie zmesi	$D_{\text{čB}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
C 16/20 NA	2330
C 16/20 RCA	2250
C 30/37 NA	2290
C 30/37 RCA	2270

Tabuľka 17: Objemové hmotnosti čerstvého betónu



Graf 14: Objemová hmotnosť čerstvého betónu

4.4 Zhrnutie výsledkov a diskusia

Pre navrhované betónové zmesi bola určená konzistencia sadnutím kužľa - S3. Spracovateľnosť betónu s recyklovaným kamenivom nebola nijak poznateľne horšia. Objemové hmotnosti čerstvého betónu podľa očakávania mala vždy nižšie zmes s recyklátom. Tento jav je možné vysvetliť zvýšeným množstvom vody v betóne z dôvodu vyššej nasiakavosti recyklátu.

5 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 Δm oproti referenčným vzorkám. Ďalším krokom bolo stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu, pevnosti v tlaku na zlomkoch trámcov a určenie vhodnosti tejto zmesi do triedy prostredia XF3. Všetky skúšky zatvrdlého betónu prebiehali v súlade s normami uvedenými v tabuľke 12. Vyššie spomenuté hodnoty sú uvedené prehľadne v tabuľkách 18 a 19.

5.1 Namerané hodnoty

Označenie zmesi	D_{ZB} [kg·m ⁻³]		R_c [MPa]		Požiadavok na triedu pevnosti
	28 dní	60 dní	28 dní	60 dní	
C 16/20 NA	2300	2270	32,4	36,1	VYHOVUJE
C 16/20 RCA	2220	2190	24,4	27,3	VYHOVUJE
C 30/37 NA	2330	2320	46,7	43,9	VYHOVUJE
C 30/37 RCA	2270	2260	41,1	50,9	VYHOVUJE

Tabuľka 18: Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku zatvrdnutého betónu

Označenie zmesi	$D_{\check{C}B}$ [kg·m ⁻³]	D_{ZB} [kg·m ⁻³]	R_b [MPa]	R_c [MPa]	Δm [%]	Koeficient mrazuvzdornosti [%]
C 30/37 NAREF	2300	2320	10,8	46,1	-1,7	17 => NEVYHOVUJE pre XF3
C 30/37 NAM	2280	2270	1,8	23,6		
C 30/37 RCAREF	2300	2280	11,7	45,1	+0,7	24 => NEVYHOVUJE pre XF3
C 30/37 RCAM	2280	2230	2,8	33,0		

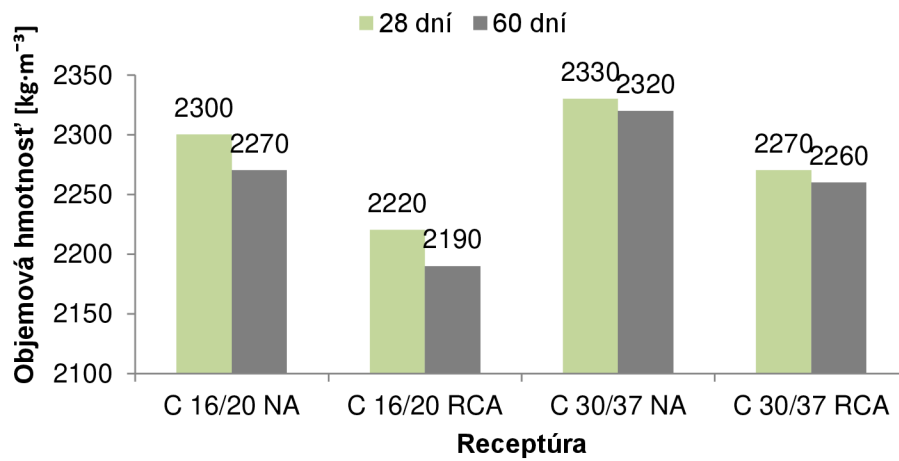
Δm . . . úbytok (-) alebo nárast (+) hmotností trámca pred a po 100 cykloch zmrazovania

Tabuľka 19: Pevnosti trámcov a porovnanie hmotností vplyvom zmrazovacieho procesu



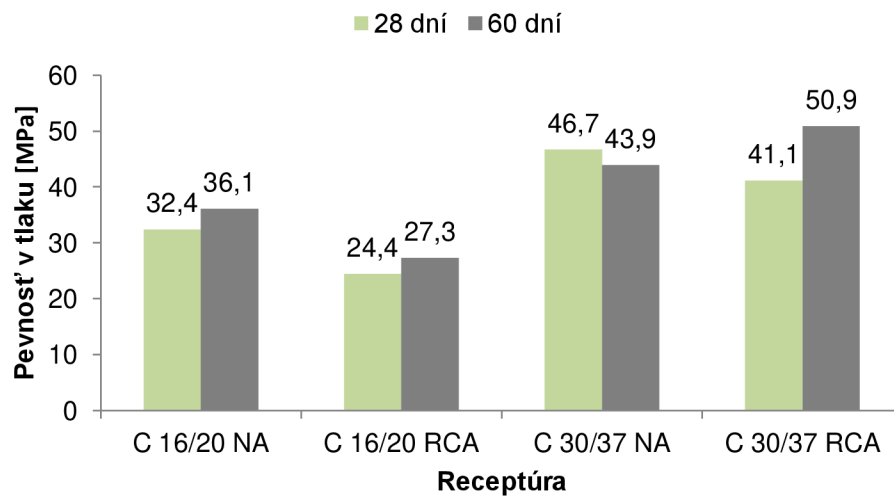
Obrázok 18: Tráмец s NA po zmrazovacích cykloch

Objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu stanovená na kockách



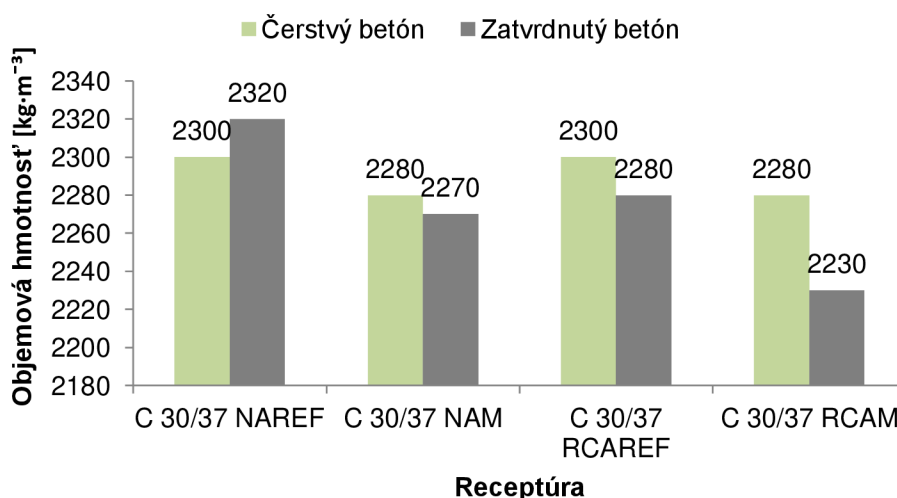
Graf 15: Objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu

Pevnosť v tlaku stanovená na kockách



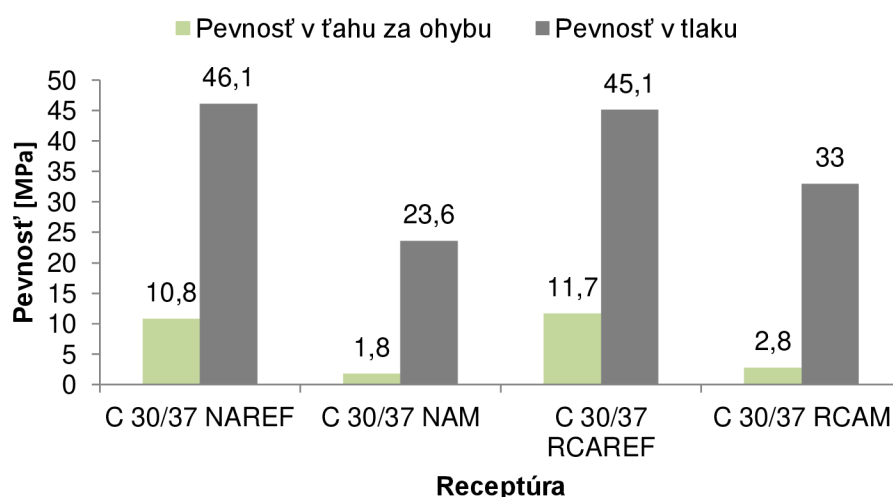
Graf 16: Porovnanie pevností

Objemová hmotnosť stanovená na trámoch



Graf 17: Porovnanie objemových hmotností stanovených na trámoch

Pevnosti stanovené na trámoch



Graf 18: Porovnanie pevností stanovených na trámoch

5.2 Zhrnutie výsledkov a diskusia

Namerané hodnoty ukazujú pokles objemovej hmotnosti po zatvrdnutí betónu oproti čerstvej zmesi. Tento jav je prirodzený a je spôsobený odchodom vody a vznikom pórov. V porovnaní betónu s NA a RCA je zjavné, že bol naplnený predpoklad, betón s RCA má nižšiu objemovú hmotnosť ako betón s NA z dôvodu vyššie spomenutého väčšieho množstva vody v zmesi s recyklátom. Obdobný trend sa ukazuje aj pri pevnostiach v tlaku. Požiadavka na pevnosti betónov po 28 dňoch síce bola splnená pri každej zámesi, no betón s RCA má celkovo nižšie pevnosti v tlaku po 28 dňoch normového dozrievania ako betón s NA. Nárast pevnosti je však pozorovaný pri pevnostiach v tlaku po 60 dňoch.

Recyklát po tejto dobre prekonal NA, z tohto dôvodu je doporučené sledovať vlastnosti recyklátov z dlhodobého hľadiska. Čo sa týka overenia zmesi C30/37 v prostredí XF3, je bohužiaľ výsledkom - nevyhovel. Objemové hmotnosti stanovené na trámcoch vykazujú rovnaké trendy ako objemové hmotnosti stanovené na kockách. Je zaujímavé, že betón s recyklovaným kamenivom zaznamenal po 100 cykloch zmrazovania nárast na hmotnosti oproti betónu s prírodným kamenivom. Z môjho úsudku to môže byť spôsobené väčším vsiaknutím vody do štruktúry vďaka nasiakavému recyklátu. Ďalší pozitívny výsledok bol zaznamenaný pri zvýšenej pevnosti v ťahu za ohybu v betóne s RCA oproti betónu s NA, dokonca aj po zmrazovaní. Hodnotu pevnosti v tlaku zmrazovaných trámcov mala opäť vyššiu zmes s RCA. Tento jav je možno podmienený práve väčšou pórovitosťou RCA a tým lepšou mrazuvzdornosťou. Je odporúčaný ďalší výskum v prostrediach XF.

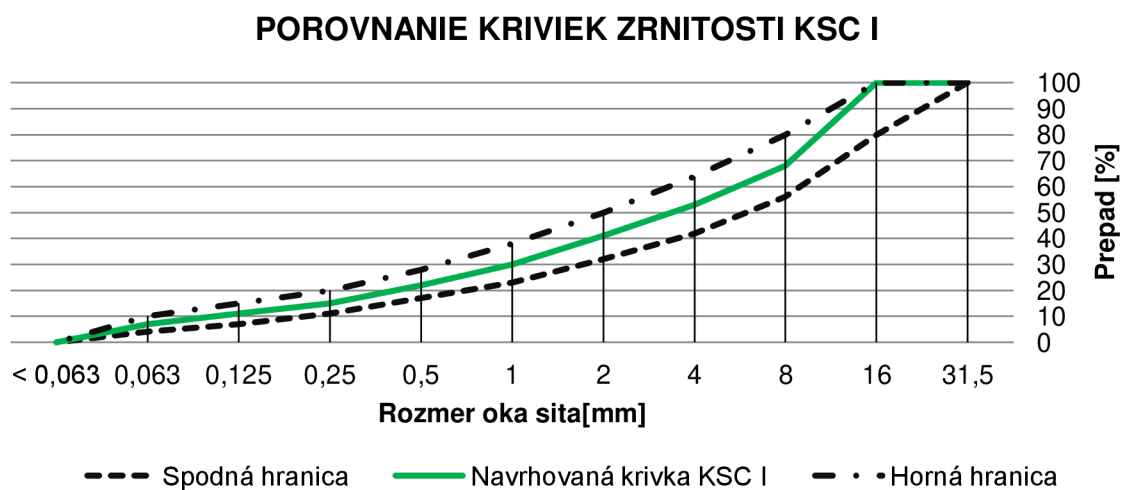
6 Kamenivo ztmelené cementom

V druhej polovici praktickej časti som sa venovala použitiu betónového recyklátu ako substitučného materiálu do podkladových ztmelených vrstiev komunikácií. Návrh receptúry sa odvíjal od množstva hydraulického spojiva - cementu. Krivky zrnitosti boli vyskládané podľa ČSN 73 6124 - Tabuľka 9 - Obory zrnitosti kameniva zpevněného cementem. Zmes bola pripravovaná bez prímiesí a použité kamenivo bolo chudobné na jemné podiely, preto pôvodne zamýšľané nižšie množstvo cementu bolo dvakrát zvýšené o cca 40 kg/m³. V tabuľke 20 je uvedená konečná použitá receptúra.

Podľa ČSN EN 13286-2 boli vyrobené valcové telsá pre KSC I a KSC II, všetky priemeru 100 mm a výšky 115 mm. U každého bola stanovená objemová hmotnosť v čerstvom aj zatvrdlom stave a pevnosť v tlaku po 7 a 28 dňoch dozrievania v normovom prostredí.

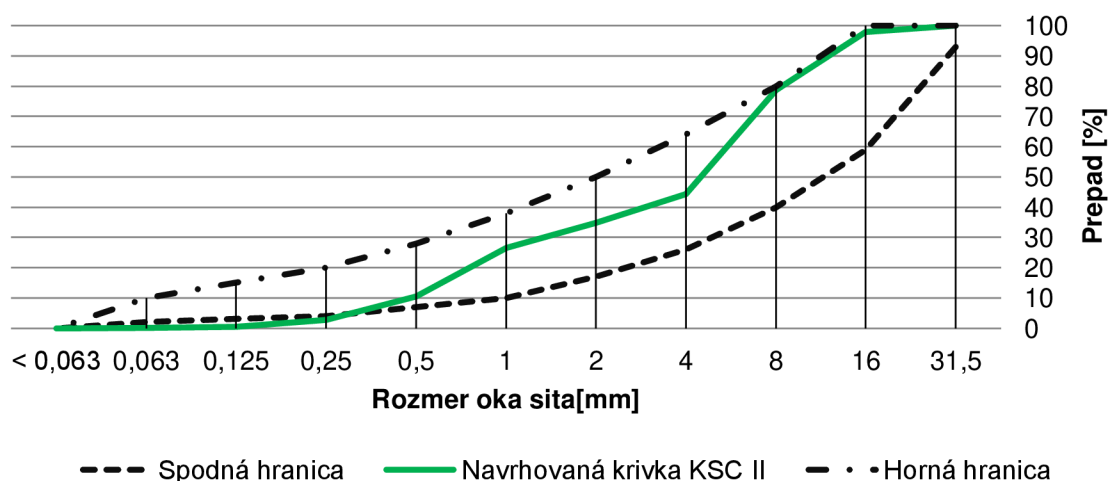
6.1 Granulometria

V grafoch 19 a 20 uvádzam porovnanie kriviek zrnitosti podľa ČSN 73 6124 a navrhnutú krivku pre KSC I a KSC II.



Graf 19: Krivka zrnitosti pre KSC I

POROVNANIE KRIVIEK ZRNITOSTI KSC II



Graf 20: Krivka zrnitosti pre KSC II

6.2 Receptúra

KSC I	kg/m ³
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrú	140
Voda (v/c = 1,21)	170
0/4 Žabčice	1043
4/8 RCA	229
8/16 RCA	626
KSC II	kg/m ³
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrú	131
Voda (v/c = 1,47)	193
0/4 Žabčice	919
4/8 RCA	718
8/16 RCA	359

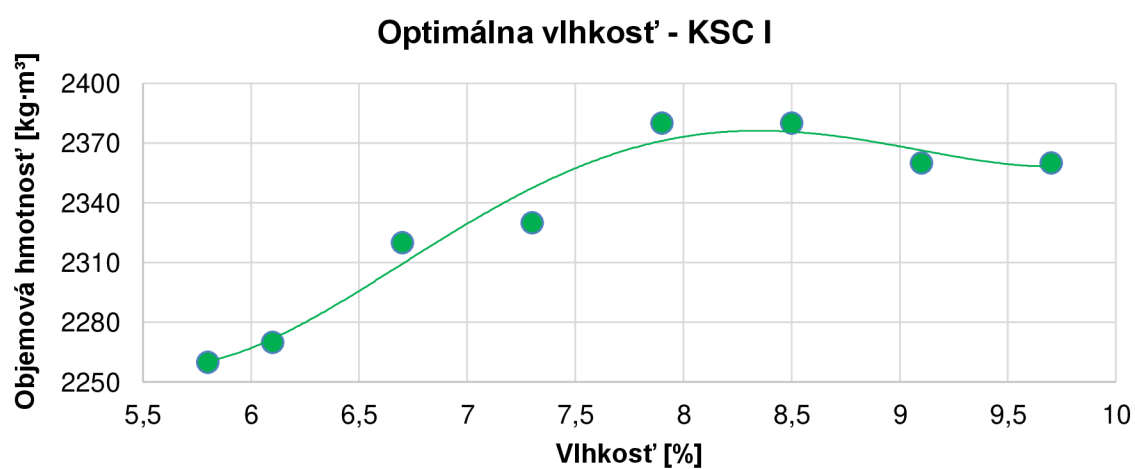
Tabuľka 20: Použitá receptúra pre KSC I a KSC II

6.3 Optimálna vlhkosť

Stanovenie optimálnej vlhkosti pre zmes kameniva ztmeleného cementom je jedným z kľúčových parametrov pre správny návrh receptúry a vysoké pevnostné charakteristiky. Pri návrhu je potrebné vziať do úvahy fakt, že RCA je materiál so zvýšenou nasiakavosťou, preto podiel vody oproti zmesi s NA má zvýšený. Hľadanie optimálnej vlhkosti prebehlo v súlade s ČSN EN 13286-2 a jednotlivé vlhkosťové štádiá a ich závislosť na objemovej hmotnosti sú uvedené v tabuľke 21 a graficky znázornené v grafe 21 a 22.

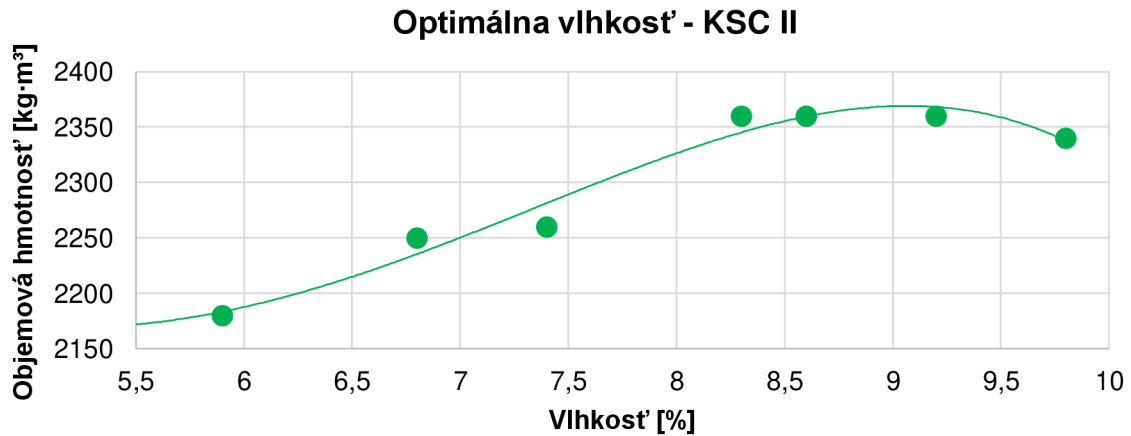
KSC I	Vlhkosť [%]	Objemová hmotnosť [kg·m ⁻³]
	9,7	2360
	9,1	2360
	8,5	2380
	7,9	2380
	7,3	2330
	6,7	2320
	6,1	2270
5,8	2260	
KSC II	Vlhkosť [%]	Objemová hmotnosť [kg·m ⁻³]
	9,8	2340
	9,2	2360
	8,6	2360
	8,3	2360
	7,4	2260
	6,8	2250
	5,9	2180
5,3	2170	

Tabuľka 21: Stanovenie optimálnej vlhkosti v závislosti na objemovej hmotnosti



Výsledná optimálna vlhkosť pre KSC I: **8,4 %**

Graf 21: Stanovenie optimálnej vlhkosti Proctorovou skúškou - KSC I



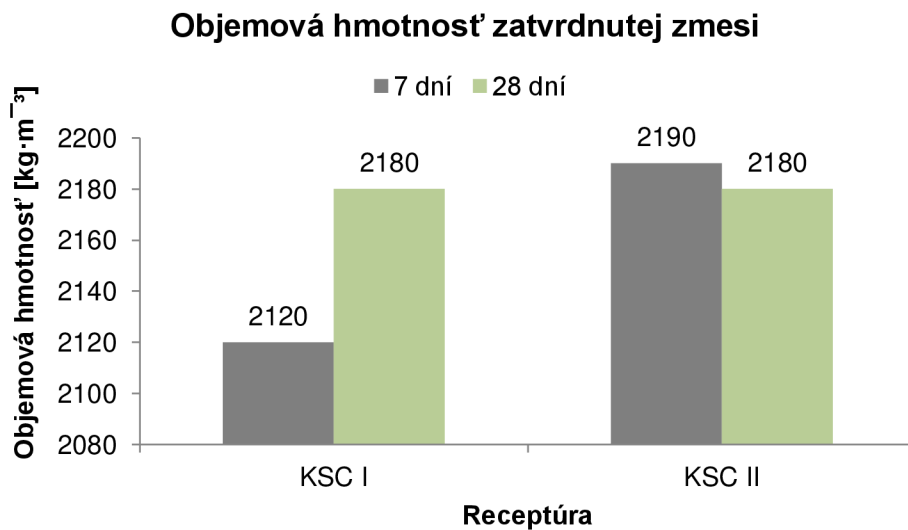
Výsledná optimálna vlhkosť pre KSC II: **9,1 %**

Graf 22: Stanovenie optimálnej vlhkosti Proctorovou skúškou - KSC II

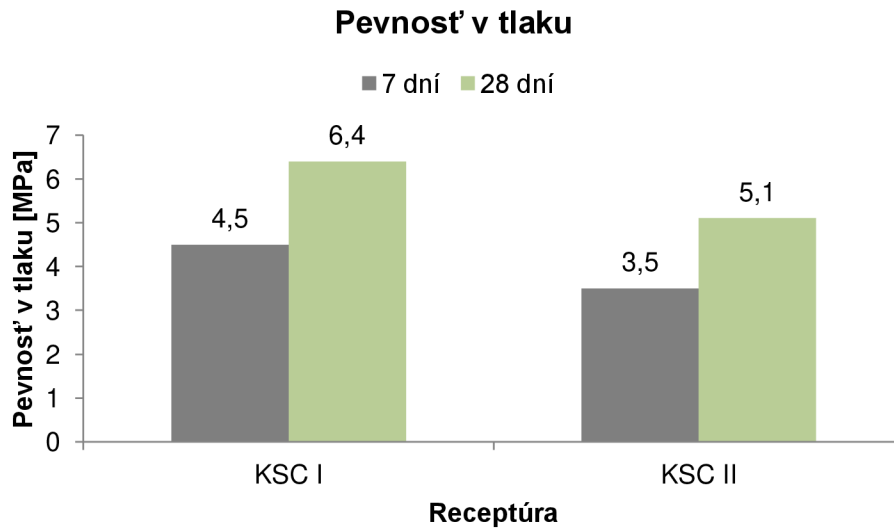
6.4 Namerané hodnoty

KSC I	D _č [kg·m ⁻³]	D _z [kg·m ⁻³]	R _c [MPa]	Trieda pevnosti	Minimálna požadovaná trieda
7 dní	2400	2120	4,5	C _{5/6}	C _{8/10} => NEVYHOVUJE
28 dní		2180	6,4		
KSC II	D _č [kg·m ⁻³]	D _z [kg·m ⁻³]	R _c [MPa]	Trieda pevnosti	Minimálna požadovaná trieda
7 dní	2350	2190	3,5	C _{4/5}	C _{5/6} => NEVYHOVUJE
28 dní		2180	5,1		

Tabuľka 22: Namerané charakteristiky kameniva ztmeleného cementom



Graf 23: Objemová hmotnosť zatvrdnutého KSC



Graf 24: Pevnosť v tlaku KSC



Obrázok 19: Skúšobné teleso po 28 dňoch zrenia

6.5 Zhrnutie výsledkov a diskusia

Ako optimálne množstvo vlhkosti sa pri zmesi KSC I ukázalo 8,4 % a pri KSC II 9,1 %. Pri týchto hodnotách začali objemové hmotnosti zmesí klesať. Z navrhnutých zmesí boli určené objemové hmotnosti v čerstvom a zatvrdlom stave. Pri KSC I s nárastom dní objemová hmotnosť zatvrdlého betónu stúpala. Pretože sa jedná o relatívne malé telesá, je celkom možné, že sa v zmesi vyskytoval väčší počet hrubej kameniva, čo by vysvetľovalo nárast objemovej hmotnosti. Z pevností v tlaku bola určená trieda $C_{5/6}$, čo je pre zmes KSC I, resp. $SC_{8/10}$ nedostačujúce. Obdobne je to pri zmesi KSC II, kedy jej pevnosť dosiahla triedu $C_{4/5}$ a to pre KSC II, resp. $SC_{5/6}$ nevyhovuje. Napriek tomu si myslím, že kamenivo z recyklovaného betónového panelu Spiroll je vhodným adeptom pre používanie v podkladných vrstvách. Z krivky zrnitosti KSC I, II je vidieť malý obsah jemných častíc,

čo môže byť príčinou, že zmes nebola dostatočne ztmelená. Táto zmes by dosiahla určite vyšších pevností pridaním prímiesí ako je popolček, ktorý sa do takýchto vrstiev bežne používa.

Záver

V tejto bakalárskej práci bolo skúmané využitie recyklovaného kameniva z betónu do konštrukčných betónov. V úvode teoretickej časti som sa venovala recyklácii ako technologickému postupu a možnostiam jej realizácie. Ďalej som opísala vybrané vlastnosti recyklovaných kamenív a popísala požiadavky a praktické realizácie. Poslednou kapitolou teoretickej časti bolo využitie recyklátov do pozemných komunikácií, hlavne cementobetónových krytov a podkladov.

Praktická časť bola venovaná výskumu použitia recyklátu z betónových stropných panelov do nových betónových zmesí a do podkladovej vrstvy. Recyklované kamenivo splnilo požiadavky na betónové zmesi C16/20 a C30/37. Do prostredia XF3 nie je vhodné. Takisto nevyhovelo na požadovanú pevnosť podkladovej vrstvy, čo mohlo byť zapríčinené nízkym podielom jemných častíc.

Na záver by som len rada podotkla, že problém spojený s recyklovaným kamenivom je určite riešiteľný a bude skúmaný ešte dlhú dobu. Výsledkom tohto úsilia a bádania po „nemožnom“ však nakoniec prinesie ovocie v podobe zvýšenia enviromentálnej úrovne. Za cenu ochrániť životné prostredie ľudstvo už dokázalo prekonať viaceré hranice, preto verím, že jedného dňa sa budeme na otázku recyklovaného kameniva z betónovej sute pozerat' ako na gravitačný zákon.

Zoznam použitých zdrojov

[1] Šenitková, I. a Številová, N.: Recycling in the civil engineering from the viewpoint of energetic savings, Acta Montanistica Slovaca, 1998, ročník 3, ISSN 318-322

[2] Cais, L.: Recyklačné zariadenia na spracovanie stavebného odpadu, [online] 2008 [cit. 2014-02-13] Dostupné z: <http://www.asb.sk/stavebnictvo/stavebna-technika/recyklačne-zariadenia-na-spracovanie-stavebneho-odpadu-2412.html>

[3] Blaha, P.: Recyklácia stavebných materiálov – princípy použitia a dopady na architektúru II., [online] 2010 [cit. 2014-03-10] Dostupné z: <http://www.archiportal.sk/2010/03/07/recyklacia-stavebnch-materilov-principy-pouzitia-a-dopady-na-architektru-ii/>

[4] Briancin J., Trpčevská J., Kollárik I.: Využitie elektrohydroimpulzného výboja pre recyklácii železobetónových prefabrikátov, [online] 2006 [cit. 2014-03-16] Dostupné z <http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/waste/briancin.pdf>

[5] Procházka, J.: Nad starým betónom sa blýska, žeby na lepšie časy?, [online] 2012 [cit. 2014-03-18] Dostupné z <http://www.techbox.sk/temy/c6143/nad-starym-betonom-sa-blyska-zeby-na-lepsie-casy.html>

[6] Dohnal, R.: Demoliční robot ničí vodou beton, [online] 2013 [cit. 2014-03-18] Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/recykl/97380/demolicni-robot-nici-vodou-beton>

[7] [online]. 2013 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.ecoficial.com/erasing-and-recycling-buildings-with-ero-robot-2577/>

[8] ZUZULOVÁ, Andrea a Dominika HODÁKOVÁ. Napätostný stav a správanie sa konštrukcií cementobetónových vozoviek. In: Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012, s. 376-384. ISBN 978-80-905243-1-6. Dostupné z: http://www.vedeckekonference.cz/library/proceedings/czechstav_2012.pdf

[9] TREFIL, Vladislav. MODERNÍ RECYKLACE BETONU V KONCEPTU DELVO SYSTEM. In: [online]. 2013 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.basf-cc.cz/cs/novinky/prisadydobetonu/transportbeton/Documents/TECH%202013%20Modern%C3%AD%20recyklace%20zbytkov%C3%A9ho%20betonu%20v%20konceptu%20DELVO.pdf>

[10] The concrete case: Workshop on the Management of C&D waste in the EU. In: [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.eu-smr.eu/cdw/docs/Alessio%20Rimoldi%20-%20The%20Concrete%20Case%20-%20201062010.pdf>

[11] ADAMS, Matthew P. *Alkali-Silica Reaction in Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates* [online]. Oregon, 2012 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/27864/AdamsMatthewP2012>.

pdf?sequence=1. Diplomová práce. Oregon State University. Vedoucí práce Jason H. Ideker.

[12] Véronique Monier, Mathieu Hestin, Manuel Trarieux, Sihame Mimid, Lena Domrose, Mike Van Acoleyen, Peter Hjerp and Shailendra Mudgal, 2011, Study on the management of construction and demolition waste in the EU. Contract 07.0307/2009/540863/SER/G2, Final report for the European Commission (Dg Environment). In: [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: http://www.eu-smr.eu/cdw/docs/BIO_Construction%20and%20Demolition%20Waste_Final%20report_09022011.pdf

[13] READY-MIXED CONCRETE INDUSTRY STATISTICS. In: *EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION* [online]. 2013 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: http://www.ermco.eu/documents/ermco-documents/ermco-statistics-2012_final.pdf

[14] <http://theconstructor.org/concrete/concrete-recycling/755/>

[15] SAKAI. RECYCLING CONCRETE: The present state and future perspective. In: [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://library.tee.gr/digital/m2469/m2469_sakai.pdf

[16] PAVLŮ T.; ŠEFFLOVÁ M., POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA Z RŮZNÝCH ZDROJŮ, příspěvek na konferenci *RECYCLING 2014 "Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin"*, ISBN 978-80-214-4866-7, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, Brno, 2014

[17] KANG, D., et al. Recycled Materials as Substitutes for Virgin Aggregates in Road Construction: I. Hydraulic and Mechanical Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, Jul, 2011, vol. 75, no. 4. pp. 1265-1275 ProQuest Central; ProQuest Natural Science Collection; ProQuest Science Journals; ProQuest Technology Collection. ISSN 03615995.

[18] A. Barbudo, F. Agrela, J. Ayuso, J.R. Jiménez, C.S. Poon, Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications, *Construction and Building Materials*, Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 129-138, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811003898>)

[19] Bibhuti Bhusan Mukharjee, Sudhirkumar V. Barai, Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 55, 31 March 2014, Pages 29-37, ISSN 0950-0618,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.003>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814000257>)

[20] HANSEN, Edited by T.C. *Recycling of Demolished Concrete and Masonry* [online]. 1st ed. London: Spon Press, 1992 [cit. 2014-03-18]. ISBN 02-036-2645-1.

[21] Modrý, S.: *Rešeršní průzkum alkalické reakce s vyhodnocením* Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací

- [22] Výhody trvalej udržateľnosti betónových konštrukcií. In: JACOBS, Jean-Pierre. [online]. Brusel: Európska betonárska platforma, 2009 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.savt.sk/attachments/article/390/UdrzatelnostBetonovychKonstrukcii.pdf>
- [23] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [24] Resonant Machines. [online]. [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://www.resonantmachines.com/InPlaceRecycling/tabid/454/Default.aspx>
- [25] KATEDRA GEOTECHNIKY A DOPRAVNÉHO STAVITELSTVA. ISBN 9788080739393. [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.svf.tuke.sk/pracoviska/kgads/e_Vzdelavanie/CaD/MODULY/M11/m11.htm
- [26] Kapitola IV. Projektování silničních staveb (ČÁST 4). VŠB-TU OSTRAVA. [online]. 2009 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/161>
- [27] KŘIVDA, Vladislav a Václav ŠKVAJN. MĚSTSKÉ KOMUNIKACE A KŘÍŽOVATKY. VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mkk/podklady/ds-15.pdf>
- [28] KUDRNA, Jan. VZDĚLÁVÁNÍM KE KVALITĚ. [online]. 2011 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf>
- [29] KATEDRA GEOTECHNIKY A DOPRAVNÉHO STAVITELSTVA. ISBN 9788080739393. [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.svf.tuke.sk/pracoviska/kgads/e_Vzdelavanie/CaD/MODULY/M7/m7.htm
- [30] ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ. [online]. 2003 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/PKO/0M3/predn3/prednaska3.htm>
- [31] TP 170. *NAVRHOVÁNÍ VOZOVEK POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ*. Ministerstvo dopravy České republiky, 2004. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20170.pdf>
- [32] ŠKOPÁN, Miroslav. Možnosti zvyšování jakosti recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů. [online]. 2008 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://stavebni-technika.cz/clanky/moznosti-zvysovani-jakosti-recyklatu-ze-stavebnich-a-demolicnich-odpadu/>
- [33] PAVLŮ, Tereza a Magdaléna ŠEFFLOVÁ. Fyzikální vlastnosti recyklovaného kameniva. In: *Juniorstav 2014 : 16. odborná konference doktorského studia : sborník anotací : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební : 30. 1. 2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-4851-3.
- [34] PAVLŮ, Tereza. Porovnání vlastností přírodního a recyklovaného kameniva. In: *Konstrukce: odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [CD]. Ostrava, 2013 [cit. 2014-03-10]. ISBN 1213-8762ISSN 1213-8762.

- [35] VAN DAM, Ton, Kurt SMITH, Carrie TRUSCHKE a Stan VITTON. Using Recycled Concrete in MDOT's Transportation Infrastructure: Manual of Practice. In: [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT_Research_Report_RC1544_368544_7.pdf
- [36] BURIÁNEK, Pavel. Využití recyklovaného betonu při odstraňování fosforu z vody. In: [online]. 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/clanky/vodarenstvi/162-vyuziti-recyklovaneho-betonu-pri-odstranovani-fosforu-z-vody>
- [37] NOVÁKOVÁ, Iveta. Možnosti využití recyklovaného betonu jako náhrady drobného kameniva v cementových potěrech. Brno, 2012. 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D..
- [38] Test servis. *QOP COMPUTERS s.r.o.* [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.testservis.cz/sluzby/kamenivo>
- [39] ČSN 73 6126-1. *Stavba vozovek - Nestmelené vrstvy*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [40] Khaleel H. Younis, Kypros Pilakoutas, Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 49, December 2013, Pages 688-701, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.003>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008404>)
- [41] THOMAS, Jeff a Hamlin JENNINGS. The interfacial transition zone (ITZ). [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_5_2.html
- [42] Ashraf M. Wagih, Hossam Z. El-Karmoty, Magda Ebid, Samir H. Okba, Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *HBRC Journal*, Volume 9, Issue 3, December 2013, Pages 193-200, ISSN 1687-4048, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.08.007>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404813000588>)
- [43] Marios N. Soutsos, Kangkang Tang, Stephen G. Millard, Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks, *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 7, July 2011, Pages 3131-3143, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810007014>)
- [44] M. Arabani, A.R. Azarhoosh, The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Volume 35, October 2012, Pages 1-7, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001134>)

[45] Sallehan Ismail, Mahyuddin Ramli, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications, *Construction and Building Materials*, Volume 44, July 2013, Pages 464-476, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813002195>)

[46] ŠIDLOVSKÝ, Ján. *Využitie neurónových sietí pre rozpoznávanie fliaš pri recyklácii* [online]. Košice, 2005 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://neuron.tuke.sk/jaksa/theses/2005/Sidlovsky-Jaksa-MSc05-thesis.pdf>. Diplomová práca. Technická univerzita v Košiciach. Vedoucí práce Ing. Rudolf Jakša, PhD.

[47] Zhen Hua Duan, Chi Sun Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials & Design*, Volume 58, June 2014, Pages 19-29, ISSN 0261-3069, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914000703>)

[48] SMITH, James Trevor. *Recycled concrete aggregate - a viable aggregate source for concrete pavements* [online]. Canada, 2009 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fuwspace.uwaterloo.ca%2Fbitstream%2Fhandle%2F10012%2F4900%2FPhD_THESIS-JSmith.pdf%3Fsequence%3D1. Dizertačná práca. University of Waterloo.

[49] FLEISCHER, Walter a Michael RUBY. *Recycled aggregates from old concrete highway pavements* [online]. Munich, 1999, s. 150-160 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://books.google.sk/books?id=ehbL6Z5-8AwC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

[50] Jie Han, Jitendra K. Thakur, Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics, *Sustainable Cities and Society*, Available online 18 January 2014, ISSN 2210-6707, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.011>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067071400002X>)

[51] Valerie Spaeth, Assia Djerbi Tegguer, Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Available online 1 April 2014, ISSN 2212-6090, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbe.2014.03.003>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609014000144>)

[52] BRAND, Alexander, Jeffery AMIRKHANIAN a ROESLER. *UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN. Flexural capacity of rigid pavement concrete slabs with recycled aggregates* [online]. Illinois, 2013, 102 s. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://ict.illinois.edu/publications/report%20files/ICT-13-018.pdf>

[53] PITRE, Jonathan Gene. *Improving the sound absorbing capacity of portland cement concrete pavements using recycled materials* [online]. New Hampshire, 2007 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://rmrc.wisc.edu/wp-content/uploads/2012/10/p5final.pdf>. Diplomová práca. University of New Hampshire. Vedoucí práce David Gress.

- [54] ČSN EN 13877-1. *Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály*. Praha, 2013.
- [55] ČSN 73 6124-1. *Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelěných hydraulickými pojivy - Část 1: Provádění a kontrola shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [56] *Specifying Sustainable Concrete: Understanding the role of constituent materials* [online]. Camberley: The Concrete Centre, 2011 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-908257-01-7.
- [57] STEHLÍK, Dušan. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích: MODUL 07 Nestmelené podkladní vrstvy* [online]. Brno, 2006 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://dc198.4shared.com/doc/F5voBJIZ/preview.html>. Vysoké učení technické v Brně.
- [58] Rozdíly mezi CB a AB. *Ceskedalnice.cz* [online]. c 2002-2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.ceskedalnice.cz/odborne-info/rozdily-mezi-cb-a-ab>
- [59] MIKULÍKOVÁ, Petra. Nestmelené a stmelené směsi z betonového recyklátu dálnice D1. Brno, 2013. 93 s., 107 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D..
- [60] Construction & Demolition Materials. *The Industrial Resources Council* [online]. c 2008-2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.industrialresourcescouncil.org/Materials/ConstructionDemolitionMaterials/tabid/366/Default.aspx>
- [61] Francisco Agrela, Auxi Barbudo, Antonio Ramírez, Jesús Ayuso, María Dolores Carvajal, José Ramón Jiménez, Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 58, January 2012, Pages 98-106, ISSN 0921-3449, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.003>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911002369>)
- [62] 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. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://d2dtl5nnlpr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/0-6037-1.pdf>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

NA	prírodné kamenivo (z angl. natural aggregate)
HRM	metóda ohrevu a trenia (z angl. Heating & Rubbing method)
RCA	recyklované kamenivo z betónu (z angl. recycled concrete aggregate)
SDO	stavebne-demoličný odpad
NN	neurónová sieť (z angl. neural networks)
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)
ASR	alkalicko-kremičitá reakcia (z angl. alkali-silica reaction)
AAR	reakcia kameniva s alkáliami v betóne (z angl. alkali-aggregate reaction)
CB	cementobetónový kryt
AB	asfaltový kryt
MZK	mechanicky stmelené kamenivo
ŠD	štrkodrť
ŠP	štrkopiesok
MZ	mechanicky spevnená zemina
MZKO	mechanicky spevnené kamenivo otvorené
TK	ťažné kamenivo
DK	drtené kamenivo
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

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Porovnanie štátov v spotrebe cementu a produkcii betónu [13]	24
Tabuľka 2: Ročné množstvo stavebného a demoličného odpadu [10]	24
Tabuľka 3: Cena recyklácie v ČR	25
Tabuľka 4: Porovnanie dlhodobých pevností RCAC a NAC [11]	31
Tabuľka 5: Maximálne množstvo škodlivých prvkov v RCA [48]	32
Tabuľka 6: Porovnanie vlastností čerstvého betónu s NA a RCA [35]	35
Tabuľka 7: Porovnanie vlastností zatvrdnutého betónu s NA a RCA [35]	35
Tabuľka 8: Použitie RCA pre jednotlivé stupne vplyvu prostredia [57]	36
Tabuľka 9: RCA v konštrukcii vozovky	43
Tabuľka 10: Použitie zmesí stmelených hydraulickými spojivami do vozoviek [55]	46
Tabuľka 11: Požiadavky na kamenivo	47
Tabuľka 12: Výpis noriem použitých v praktickej časti	50
Tabuľka 13: Objemové hmotnosti prírodného a recyklovaného kameniva	55
Tabuľka 14: Nasiakavosť betónového recyklátu	55
Tabuľka 15: Použité receptúry pre jednotlivé zmesi	57
Tabuľka 16: Vyhodnotenie skúšky konzistencie čerstvého betónu	58
Tabuľka 17: Objemové hmotnosti čerstvého betónu	59
Tabuľka 18: Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku zatvrdnutého betónu	60
Tabuľka 19: Pevnosti trámčov a porovnanie hmotností vplyvom zmrazovacieho procesu	60
Tabuľka 20: Použitá receptúra pre KSC I a KSC II	65
Tabuľka 21: Stanovenie optimálnej vlhkosti v závislosti na objemovej hmotnosti	66
Tabuľka 22: Namerané charakteristiky kameniva ztmeleného cementom	67

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Schéma recyklácie čerstvého betónu s nádržou [3]	15
Obrázok 2: Bubón pred a po 8 týždňoch používania prípravku Delvo [9]	16
Obrázok 3: Schéma recyklačnej linky	17
Obrázok 4: Postup recyklácie zatvrdnutého betónu [32]	18
Obrázok 5: Rezonančná recyklácia betónu [24]	19
Obrázok 6: ERO CDR [7]	20
Obrázok 7: Schéma recyklácie betónu pomocou ERO CDR [7]	20
Obrázok 8: Metóda ohrevu a trenia (HRM) [15]	21
Obrázok 9: Spojenie neurónov synapticky [46]	26
Obrázok 10: Dopredná neurónová sústava [46]	27
Obrázok 11: Rekurentná neurónová sústava [46]	27
Obrázok 12: Neurónová sieť recyklovaného kameniva [47]	28
Obrázok 13: Pričný rez vrstvami vozovky [57]	39
Obrázok 14: Šírenie zvuku v pórovitom CB [53]	42
Obrázok 15: Betónový recyklát - vľavo frakcia 4/8 mm a vpravo 8/16 mm	51
Obrázok 16: Ukážka zámeis pre betón C 30/37 RCA	57
Obrázok 17: Sadnutie kužeľa, stupeň S3 - 130 mm	58
Obrázok 18: Trámec s NA po zmrazovacích cykloch	61
Obrázok 19: Skúšobné teleso po 28 dňoch zrenia	68

Zoznam grafov

Graf 1: Časová závislosť výroby betónu, produkcie cementu a HDP v Európe [13]	23
Graf 2: Vplyv sekundárneho drtenia na ASR	34
Graf 3: Percentuálne využitie kameniva z recyklovaného betónu [11]	37
Graf 4: Závislosť pohltivosti zvuku na pórovitosti CB [53]	43
Graf 5: Dlhodobé správanie sa nestmelených podkladov z RCA s geosyntetikou [50]	45
Graf 6: Krivka zrnitosti prírodného ťaženého kameniva frakcie 0/4 Žabčice	52
Graf 7: Krivka zrnitosti prírodného drteného kameniva frakcie 4/8 Olbramovice	52
Graf 8: Krivka zrnitosti prírodného drteného kameniva frakcie 8/16 Olbramovice	53
Graf 9: Krivka zrnitosti betónového recyklátu frakcie 4/8	53
Graf 10: Krivka zrnitosti betónového recyklátu frakcie 8/16	54
Graf 11: Nasiakavosť recyklovaného betónu	55
Graf 12: Porovnanie objemových hmotností použitých kamenív	55
Graf 13: Konzistencie čerstvých zmesí	58
Graf 14: Objemová hmotnosť čerstvého betónu	59
Graf 15: Objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu	61
Graf 16: Porovnanie pevností	61
Graf 17: Porovnanie objemových hmotností stanovených na trámcoch	62
Graf 18: Porovnanie pevností stanovených na trámcoch	62
Graf 19: Krivka zrnitosti pre KSC I	64
Graf 20: Krivka zrnitosti pre KSC II	65
Graf 21: Stanovenie optimálnej vlhkosti Proctorovou skúškou - KSC I	66
Graf 22: Stanovenie optimálnej vlhkosti Proctorovou skúškou - KSC II	67
Graf 23: Objemová hmotnosť zatvrdnutého KSC	67
Graf 24: Pevnosť v tlaku KSC	68