



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM MOŽNOSTÍ VYUŽÍVÁNÍ BETONOVÝCH RECYKLÁTŮ V SAE PRO VÝROBU KONSTRUKČNÍCH BETONŮ

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF USING RECYCLED CONCRETE IN THE UAE FOR THE
PRODUCTION OF STRUCTURAL CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karolína Lakomá

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Studentka:	Bc. Karolína Lakomá
Vedoucí práce:	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Akademický rok:	2023/24
Studijní program:	N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium možností využívání betonových recyklátů v SAE pro výrobu konstrukčních betonů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude zaměřena na ověření možností využívání betonových recyklátů z demolic ve Spojených arabských emirátech do konstrukčních betonů pro technologie transportbetonu. Cílem bude ověřit možnosti náhrady přírodních drcených kameniv pro výrobu pevnostních tříd C30/20 až C40/20 betonovými recykláty získanými z drcení starých betonů z demolic a odpadních betonů z výroby v produkci firmy Alas Emirates Ready Mix Abu Dhabi. V teoretické části je nutné popsat současný legislativní stav pro klasifikaci přírodních kameniv pro výrobu a betonů a případné požadavky na kamenivo z betonových recyklátů. Dále prověřit normové požadavky na betony a možnostmi náhrady přírodních kameniv recykláty. V praktické části navrhnete receptury betonů C30/20, C35/20 a C40/20 s úplnou či částečnou náhradou přírodního kameniva všech frakcí betonovým recyklátem do max. zrna 20 mm. Na těchto recepturách ověřte dopady na zpracovatelnost betonů v čase do 120 minut, pevnosti betonů v tlaku a statických modulů pružnosti ve stáří 7, 28 a 60 dnů.

Rozsah práce 60 až 80 stran.

Cíle a výstupy diplomové práce:

V teoretické části je nutné popsat současný legislativní stav pro klasifikaci přírodních kameniv pro výrobu a betonů a případné požadavky na kamenivo z betonových recyklátů podle standardů v SAE a prověřit normové požadavky na betony a možnostmi náhrady přírodních kameniv recykláty. V praktické části experimentálně stanovit potřebné důležité technologické vlastnosti dostupných betonových recyklátů do max. zrna 22 mm – nasákavost, tvarový index, objemovou hmotnost, granulometrii, obsah jemných podílů. Dále navrhnout 2 receptury betonů pevnostních tříd C30/20 a C40/20 podle standardů v SAE s úplnou či částečnou náhradou všech frakcí přírodních kameniv betonovým drceným recyklátem. Laboratorně v místních podmínkách vyrobit navržené receptury. Na těchto ověřit vlivy různých druhů a frakcí recyklátů za spolupůsobení plastifikačních přísad na konzistenci v čase 0 až 90 minut od zamíchání. Dále v laboratořích firmy Alas Emirates Ready Mix Abu Dhabi otestovat dopady na základní mechanické vlastnosti zatvrdělých betonů v různých časových obdobích.

Seznam doporučené literatury a podklady:

1. ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
2. ČSN P 73 2404/Z1 – Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
3. Hela.R: Technologie betonu I a II, učební opory VUT FAST Brno
4. Sborníky z českých a mezinárodních konferencí, české a zahraniční časopisy
5. Internetové zdroje, Science Direct apod.
6. Gonçalves, Paulo César Magalhães. COMMENTED ANALYSIS OF EXISTING LEGISLATION. CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES. Lisbon,
7. CEMEX. Pilot Project in Berlin Showcases Specialty Concrete with Recycled Aggregates. [Online] 7. 12 2015. [Citace: 20. 5 2021.] <https://www.cemex.com/-/cemex-pilot-project-in-berlin-showcases-specialty-concrete-with-recycled-aggregates>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 20. 3. 2023

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na ověření možností využívání betonových recyklátů, které pochází z demolic ve Spojených arabských emirátech (SAE), do konstrukčních betonů pro technologie transportbetonu. V teoretické části jsou shrnuty poznatky z oblasti betonových recyklátů, jejich přípravy a výroby. Jsou zde uvedeny normové požadavky jak pro SAE, Českou republiku a svět. Dále byly popsány vlivy recyklovaného kameniva na čerstvý a ztvrdlý beton. Cílem experimentální části bylo ověření výsledných vlastností přírodních a recyklovaných kameniv. Dále se práce věnuje návrhu receptur pro referenční a recyklované betony. Na těchto recepturách byly provedeny zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu. V rámci této práce byly porovnány dosažené výsledky s výsledky dosaženými v jiné práci z ČR, která se taktéž věnovala použití recyklovaného betonu. V rámci experimentální části je provedena ekonomická rozvaha pro srovnání cen referenčních a recyklovaných betonů na 1 m³.

KLÍČOVÁ SLOVA

recyklované kamenivo, recyklovaný beton, stavebně demoliční odpad, betonové recyklované kamenivo, recyklace

ABSTRACT

The thesis focuses on verifying the possibilities of utilizing recycled concrete aggregates originating from demolitions in the United Arab Emirates (UAE) in structural concretes for ready-mix concrete technologies. The theoretical part summarizes knowledge in the field of recycled concrete aggregates, their preparation, and production. It outlines the standard requirements for the UAE, the Czech Republic and globally. Additionally, it describes the influences of recycled aggregates on fresh and hardened concrete. The goal of the experimental section was to verify the resulting properties of natural and recycled aggregates. Moreover, the thesis addresses the formulation design for reference and recycled concretes. Tests for both fresh and hardened concrete were conducted based on these formulations. This work compares the achieved results with those obtained in another study from the Czech Republic which is also focused on the use of recycled concrete. Furthermore, an economic analysis comparing the prices of reference and recycled concretes on 1 m³ is conducted within the experimental section.

KEYWORDS

Recycled aggregate, recycled concrete, construction and demolition waste, concrete recycled aggregate, recycling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

LAKOMÁ, Karolína. *Studium možností využívání betonových recyklátů v SAE pro výrobu konstrukčních betonů*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152824>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Rudolf Hela.

Citace elektronické práce:

LAKOMÁ, Karolína. *Studium možností využívání betonových recyklátů v SAE pro výrobu konstrukčních betonů* [online]. Brno, 2024 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152824>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Rudolf Hela.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium možností využívání betonových recyklátů v SAE pro výrobu konstrukčních betonů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2024

Bc. Karolína Lakomá

autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborné rady a pedagogické vedení v průběhu celé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat celé své rodině a nejbližším, kteří mě podporovali po celou dobu studia a při psaní této práce.

Bc. Karolína Lakomá

Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Obecný popis vzniku a vlastností betonových recyklátů	12
2.2	Stavební a demoliční odpady.....	12
2.2.1	Recyklace sestupného typu (down cycling)	13
2.2.2	Recyklace vzestupného typu (up cycling).....	14
2.3	Recyklace stavebně demoličního odpadu	14
2.3.1	Shromažďovací prostředky a skladování stavebních a demoličních odpadů	15
2.3.2	Technologie úpravy stavebně demoličního odpadu	15
2.4	Stavební a demoliční odpad v SAE.....	17
2.4.1	Využívání betonových recyklátů z demolic (v SAE)	18
2.5	Recyklované kamenivo do betonu.....	18
2.5.1	Požadavky na recyklované kamenivo dle norem v ČR	20
2.5.2	Požadavky na recyklované kamenivo dle norem ve světě	27
2.5.3	Vlastnosti recyklovaného kameniva z betonových recyklátů.....	29
2.5.4	Vlastnosti vícenásobně recyklovaného kameniva.....	31
2.5.5	Metody pro zjištění obsahu cementového kamene v betonových recyklátech.....	32
2.5.6	Metody pro zlepšení fyzikálních vlastností kameniva	33
2.6	Konstrukční betony pro technologii transportbetonu	35
2.7	Požadavky na kamenivo z betonových recyklátů (dle standartů SAE)	36
2.8	Normové požadavky na betony s možností náhrady přírodních kameniv recykláty	39
2.9	Vlastnosti betonu s použitím betonového recyklovaného kameniva	39
2.9.1	Vlastnosti čerstvého recyklovaného betonu	40
2.9.2	Vlastnosti ztvrdlého recyklovaného betonu	40
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
3.1	Cíl experimentální části	46
3.2	Metodika zkoušení	46
3.3	Vstupní suroviny	47
3.4	Použité zkušební metody.....	51
3.4.1	Zkoušky kameniva	51
3.4.1.1	Stanov	51
3.4.2	Zkoušky na čerstvém betonu	56
3.4.3	Zkoušky na ztvrdlém betonu.....	57
3.5	ETAPA PRVNÍ	59
3.5.1	Stanovení zrnitosti kameniva – Sítový rozbor.....	59
3.5.2	Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva	64

3.5.3	Index prodloužení a štěpnosti.....	66
3.5.4	Obsah částic <75 µm.....	68
3.6	ETAPA DRUHÁ.....	69
3.6.1	Návrh receptur.....	69
3.6.2	Vyhodnocení zkoušek na čerstvém betonu.....	72
3.6.3	Vyhodnocení zkoušek na ztvrdlém betonu.....	74
3.7	ETAPA TŘETÍ.....	81
3.7.1	Porovnání výsledků SAE vs. ČR.....	81
3.7.2	Porovnání zkoušek čerstvého betonu.....	82
3.7.3	Porovnání zkoušek ztvrdlého betonu.....	84
3.8	ETAPA ČTVRTÁ.....	87
4.	ZÁVĚR.....	91
5.	SEZNAM ZDROJŮ.....	95
6.	SEZNAM TABULEK.....	100
7.	SEZNAM GRAFŮ.....	102
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	103

1. ÚVOD

Beton je základním stavebním materiálem v moderním stavebnictví, používaným po celém světě. Základními složkami betonu jsou cement, voda, kamenivo, přísady a příměsi. Má využití v široké škále stavebních odvětví a jeho vlastnosti lze upravit, dle konkrétních projektů. I když se jedná o významný prvek ve stavebnictví, představuje mnoho výzev v oblasti ekologie, kvůli vysoké spotřebě přírodních surovin. Do budoucna nastává vysoké riziko vyčerpání právě těchto přírodních surovin, jako je třeba přírodní kamenivo. Je tedy důležité najít vhodnou alternativu přírodního kameniva tak, aby nebyly ovlivněny požadované vlastnosti betonu, který je nedílnou součástí stavební výroby.

Jedním z prostředků, jak částečně řešit tento problém, je využití odpadu ze stavebních demolic jako alternativu přírodního kameniva. Tento druh odpadu tvoří významnou část celkové produkce odpadu ve světě a v SAE tvoří stavební odpad až 80 % celkové produkce. Dalším odpadem, který vzniká při výstavbě je nevyužitý beton, který je ze stavby vrácen v autodomíchávačích. Takovýto odpad je možné využít způsobem, že se po vrácení ze stavby „vylije“ z autodomíchávače a nechá se do druhého dne zatvrdnout. Následně je pomocí válce rozježděn a posléze rozdrčen na požadované frakce kameniva, které může být použito jako náhrada přírodního kameniva. Alternativou je tedy druhotné zpracování a recyklace, čímž vzniká tzv. recyklované kamenivo.

Cílem této práce je popsání současného legislativního stavu pro klasifikaci přírodních kameniv pro výrobu betonů. Dále se práce zabývá požadavky na kamenivo z betonových recyklátů podle standardů ve Spojených arabských emirátech, což bude zahrnuto v teoretické části.

Experimentální část se bude věnovat stanovení klíčových technologických vlastností dostupných betonových recyklátů do velikosti zrna 22 mm. Budou provedeny zkoušky nasákavosti, tvarového indexu, objemové hmotnosti, granulometrie a obsahu jemných podílů. Následně budou navrženy receptury pro betony pevnostních tříd C30/20 a C40/20 podle standardů v SAE, s úplnou či částečnou substitucí všech frakcí přírodních kameniv betonovými recykláty. Tyto receptury budou laboratorně vyrobeny a zkoumány v místních podmínkách za účelem zjištění vlivu různých druhů a frakcí recyklovaných materiálů a použití plastifikačních přísad na konzistenci betonu. Dále budou otestovány základní mechanické vlastnosti zatvrdlých betonů, jako jsou objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a modul pružnosti. Celý experiment bude probíhat v laboratořích firmy Alas Emirates Ready Mix Abu Dhabi. Tento průzkum má za cíl

poskytnout komplexní pohled na vlivy substituce přírodního kameniva recyklovanými materiály, což může být klíčové pro jejich efektivní a udržitelné využití ve stavebnictví.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Obecný popis vzniku a vlastností betonových recyklátů

Recyklovaný beton je jedním z nejčastěji používaných druhů recyklovaných materiálů, který nachází široké využití. Díky jeho fyzikálně-mechanickým vlastnostem připomíná přírodní kamenivo. Složení recyklované směsi se získává rozdrčením a tříděním betonu, který musí obsahovat minimálně 90 % betonu, maximálně 6 % směsi pálených zdících prvků a přírodního kamene, 1 % skla a 3 % cizorodých částic. Rozdělení recyklovaného betonu dělíme podle granulometrie na jemnou frakci (<4 mm) a hrubou frakci (> 4 mm). Používá se například jako základní materiál pro vozovky stmelené nebo nestmelené cementem, jako mechanicky zpevněná zemina a ochranné vrstvy silničních komunikací. Dalším potencionálním využitím recyklovaného betonu je jeho zahrnutí do asfaltových směsí pro výstavbu a opravy chodníků, cyklostezek nebo vozovek s nízkým provozem (místní, účelové komunikace apod.) za předpokladu dodržení předepsaných receptur a pracovních postupů podle relevantních norem. Dále je možné jej využít v základových vrstvách pro stavební projekty, pro stabilizaci svahů a zemních konstrukcí, pro terénní úpravy a také je možné jej využít při rekultivaci degradovaných oblastí či ochraně životního prostředí. Při používání je také nutné dbát na stanovenou granulometrii a poté je možné ho aplikovat do různých podkladních, ložných či obrušných vrstev. Hrubé frakce recyklovaného betonu (> 22 mm) lze využívat například pro prolévané vrstvy [1].

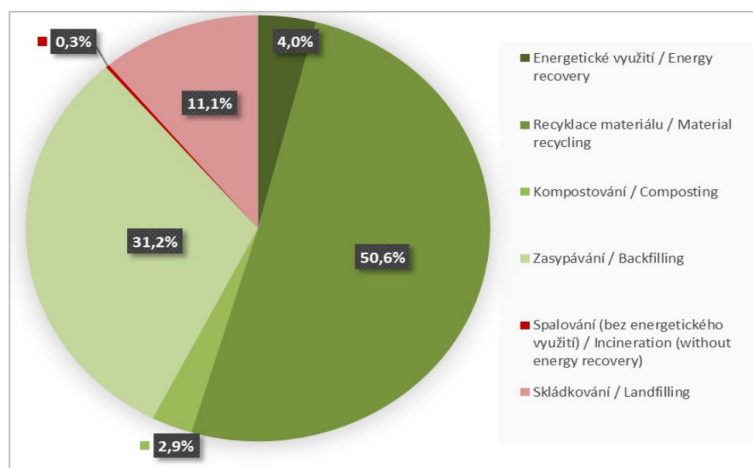
2.2 Stavební a demoliční odpady

Podle zákona o odpadech č. 541/2020 Sb. se stavebním a demoličním odpadem (jinak SDO) rozumí odpad vznikající při stavebních a demoličních činnostech. Zákonně je tedy odpadem definován jakýkoliv hmotný objekt, kterého se osoby mají v úmyslu zbavit, nebo je to jejich povinnost. Taktéž se za odpad považují věci, které již nelze využít pro svůj původní účel. Tento typ odpadu představuje více než polovinu všech odpadů, které jsou produkovány v České republice, avšak v současné době je téměř všechen využíván. Tyto odpady jsou důležitým zdrojem sekundárních surovin [2]. [2] [3]

Původci odpadu jsou povinni při odstraňování, údržbě budov či jejich stavbě dodržovat postupy pro nakládání s materiály z bouraných staveb určenými k opětovnému použití. Cílem je maximalizovat využití a recyklaci právě těchto materiálů, což jsou vedlejší produkty a stavebními a demoličními odpady. V plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 je stanoven cíl pro stavební a demoliční odpady, který má za úkol zvýšit do roku 2020

nejméně na 70 % hmotnosti míru přípravy k opětovnému využití a míru recyklace stavebních a demoličních odpadů a dalších materiálů. Tento cíl vychází ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech. [2] [3] [4]

Podle Českého statistického úřadu dosáhla celková produkce odpadů v ČR 39,2 milionu tun, přičemž 60,9 % tvořily právě stavební a demoliční odpady, což představovalo 23,87 milionu tun celkového objemu odpadů. Většinu stavebních a demoličních odpadů tvoří zemina, kamení, vytěžená jalová hornina a hlušina, což dohromady představuje kolem 70 až 75 % tohoto druhu odpadu. Naopak materiály jako beton, cihly, jejich směsi a asfaltové směsi, které jsou vhodné pro recyklaci, představují zhruba 22 až 28 % produkce stavebních a demoličních odpadů. Na obrázku č. 1 můžeme vidět nakládání s odpady v České republice v roce 2021. [5] [6] [7]



Obrázek 1: Nakládání s odpady v roce 2021 (ČSÚ) [6]

2.2.1 Recyklace sestupného typu (down cycling)

Tato recyklace označuje postupy, při kterých se získává materiál s nižšími užitnými vlastnostmi, než má původní materiál. Tento způsob recyklace je nejběžnějším jak ve světě, tak i v České republice, pokud se jedná o recyklaci betonu.

Takzvaný down – cycling můžeme vidět níže na obrázku č. 2. [8]



Obrázek 2: Schéma recyklace sestupného typu [8]

2.2.2 Recyklace vzestupného typu (up cycling)

Při tomto typu recyklace má výsledný materiál stejné nebo dokonce lepší vlastnosti než původní produkt. Ačkoliv je tento proces náročnější na vyšší množství spotřebované energie, ale také klade větší nároky na technologické vybavení, může výsledný produkt sloužit mnohem déle. Up-cycling můžeme opět vidět na obrázku č. 3 uvedeného níže. [8]



Obrázek 3: Schéma recyklace vzestupného typu [8]

2.3 Recyklace stavebně demoličního odpadu

Recyklace stavebních a demoličních odpadů (SDO) hraje klíčovou roli v omezení těžby přírodních minerálních materiálů pro stavebnictví, jako je kamenivo, písky či štěrkopísky. Prioritou by mělo být znovuvyužití stavebních či demoličních materiálů přímo na stavbě. Oproti těžbě přírodního kameniva z vody, zemského povrchu nebo lomů, se recyklované kamenivo často získává z bouracích prací či demolice. U recyklovaného kameniva se jeho kvalita odvíjí zejména na důslednosti třídění SDO přímo v místě jeho vzniku oproti přírodnímu kamenivu, kde řešíme jeho mineralogické složení a původ. Díky tomuto způsobu lze efektivně oddělit cizorodé

částice, jako je dřevo, plasty, lepenka a podobné materiály z konstrukčních zbytků. Tento přístup je levnější, ale i účinnější oproti třídění na recyklačních linkách. Pokud to práce dovolují, je vhodné oddělit i celé stavební prvky nebo jejich části. [7] [9]

2.3.1 Shromažďovací prostředky a skladování stavebních a demoličních odpadů

Musí splňovat základní technické požadavky uvedené v § 5 vyhlášky č. 383/2001 Sb. Při výběru místa pro shromažďování nebo umístění shromažďovacích prostředků je nutné brát v úvahu bezpečnost při jejich obsluze, požární bezpečnost, jeho dostupnost a možnost obsluhy mechanizačními a dopravními prostředky. Shromažďovací prostředky je možné vyprázdnit pouze do nádob určených pro přepravu daného druhu odpadu, nebo mohou samy sloužit jako přepravní nádoby. Alternativně mohou být umístěny nebo vyprázdněny do skladu jako místa skladování odpadu, nebo do zařízení určených pro sběr, recyklaci nebo likvidaci odpadu. Po vyprázdnění musí být prostředek čistý a dezinfikovaný. [3]

Sklady pro stavební a demoliční odpady mohou být volné plochy, střechy, budovy, podzemní nebo nadzemní nádrže apod., které splňují technické požadavky kladené na sklady uvedené v odst. 1 § 7 vyhlášky 383/2001 Sb., požadavky stanovené zákonem a zvláštními právními předpisy na ochranu životního prostředí a zdraví lidí. [3]

Sklady, kde jsou uloženy odpady určené k odstranění po dobu delší než 1 rok a sklady, kde jsou uloženy odpady určené k využití po dobu delší než 3 roky, musí být technicky zabezpečeny odpovídajícím způsobem pro daný typ skládky. Takové dlouhodobé skladování odpadů má specifická pravidla. [3]

2.3.2 Technologie úpravy stavebně demoličního odpadu

Stavební a demoliční odpady je nutné před dalším použitím třídít. Třídící zařízení musí rozdělit materiály vhodné pro opětovné využití od těch nevhodných. Kritickými faktory jsou hlavně hustota daných materiálů, jejich chování při odvalování a magnetické vlastnosti. Ideálním případem je třídění SDO již v místě jejich vzniku, což je technologicky jednodušší a výrazně se tím zlepšuje kvalita recyklátu.

První fáze třídění by se měla zabývat oddělením kontaminovaných materiálů od nekontaminovaných.

Poté je nutné separovat minerální suť a cizorodé složky, kterými jsou:

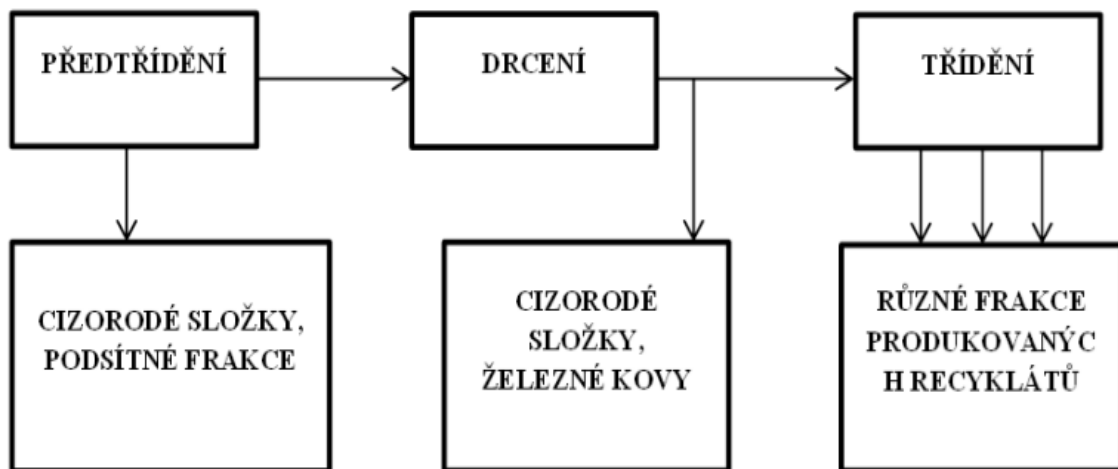
- dřevo a dřevěné materiály,

- papír,
- sádrokarton,
- asfaltové lepenky,
- plasty
- kovy

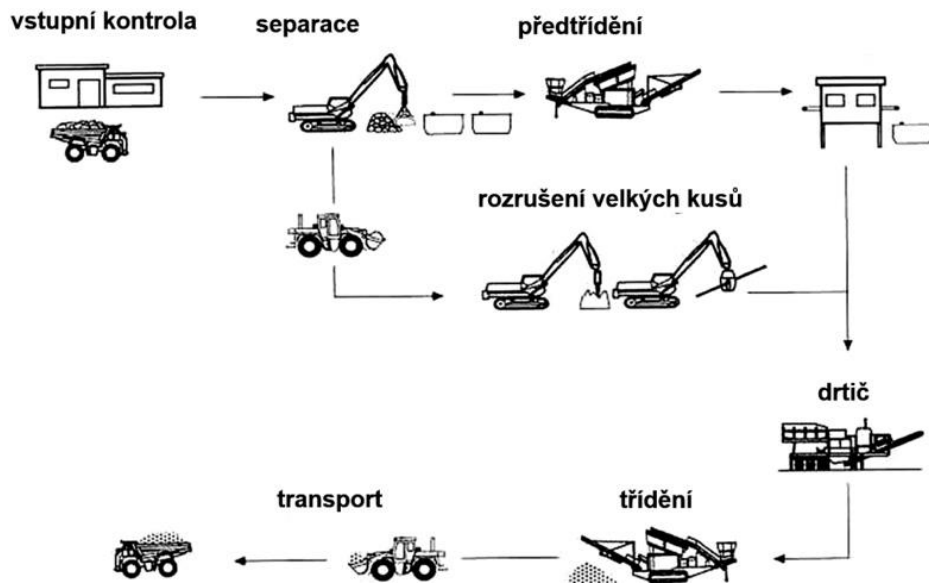
Minerální suť se dále dělí na:

- beton a železobeton,
- cihelné zdivo,
- keramika (Pokud je součástí cihelného zdiva, může ovlivnit kvalitu recyklovaného materiálu asfaltové úlomky),
- zemina a kamenivo,
- další stavební odpad nevhodný k recyklaci.

V poslední řadě se pomocí rypadla z SDO odstraňují rozměrné kusy z přivážených stavebních a demoličních odpadů, které jsou následně rozdrčeny na velikost vhodnou pro zpracování v recyklačních zařízeních. [10]



Obrázek 4: Příklad technologické návaznosti typického zařízení pro recyklaci SDO [10]

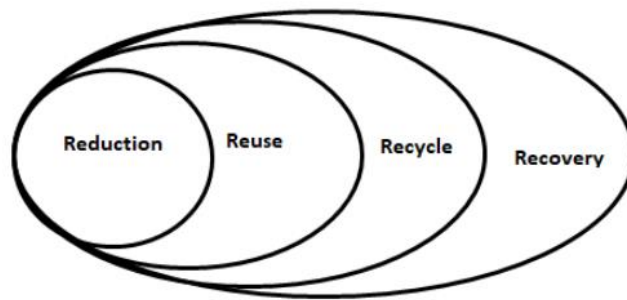


Obrázek 5: Schéma technologického procesu linky pro recyklaci SDO [10]

2.4 Stavební a demoliční odpad v SAE

Vysoké tempo růstu měst v SAE způsobuje, že se staví tolik budov, díky kterým vznikají tisíce tun stavební suti a odpadu. SAE se řídí dvěma stavebními předpisy z čehož jeden je Dubai Green Building Regulations (DGBR) a druhý Abu Dhabi Estidama Pearl. Oba tyto systémy jsou vysoce vyvinuté pro splnění cíle udržitelnosti ve stavebnictví. Potřeba využívat strategie pro udržitelná řešení v městských oblastech je tedy bezprostřední. Vláda Spojených arabských emirátů vede snahu o přizpůsobení udržitelných zásad a stavebních aktivit a je to hlavní prioritou pro plánování a rozvoj měst v SAE. Ve stavebním sektoru lze cíle udržitelnosti dosáhnout integrováním vhodného a efektivního nakládání s odpady a jejich likvidací. Stavební průmysl v SAE má jeden z největších podílů na vzniku stavebního odpadu a tvoří až 75 % pevného odpadu, který tam vznikne. V roce 2017 bylo vyprodukováno 2,58 milionu tun demoličního odpadu přímo v Abu Dhabi. [11]

SAE se snaží držet takzvané koncepce čtyř R, která zahrnuje snižování (reduction), opětovné využití (reuse), recyklaci (recycle) a zotavení (recovery). Cílem je zajištění, aby ze stavebního procesu nezůstalo nic, co by mohlo mít negativní dopad na životní prostředí, včetně zamezení vyčerpání přírodních zdrojů. [11]



Obrázek 6: Koncepte čtyř R [11]

2.4.1 Využívání betonových recyklátů z demolic (v SAE)

V současnosti probíhají ve Spojených arabských emirátech rozsáhlé stavební práce v rámci nového urbanistického rozvoje. V důsledku toho mnoho existujících staveb, kde se jejich životnost blíží ke konci, nebo nezapadají do nových urbanistických úprav, musí být demolovány, aby bylo možné vytvořit prostor pro nové projekty. Avšak demolice těchto budov generuje značné množství stavebního odpadu, který zahrnuje beton, ocel, betonové bloky apod. Tyto materiály jsou obvykle likvidovány na speciálních skládkách, kde zbytečně zabírají místo, což způsobuje environmentální problémy v půdě, vodě, vzduchu a okolním ekosystému. Bylo zjištěno, že zhruba 5 % z 348 milionů m³ čerstvého betonu bylo vráceno do betonářských závodů a poté převedeno na skládky.

Kromě snížení environmentálního dopadu je využití recyklovaného betonu ekonomičtější než přírodní kamenivo, protože vyžaduje menší náklady na dopravu a spotřebu energie. Využívání betonových recyklátů z demolovaných budov v SAE je stále diskutované téma. Hlavní obavou při použití recyklovaného kameniva jsou jeho nižší mechanické vlastnosti, nízká hustota a vysoká nasákavost. Výměnný podíl recyklovaného kameniva je tedy omezen danými normami a předpisy. Jednou z povinností v SAE při využívání recyklovaného hrubého kameniva je využívání takzvaných doplňkových cementových materiálů (SCM), což by mohlo být efektivním způsobem, jak kompenzovat uhlíkovou stopu. [38]

2.5 Recyklované kamenivo do betonu

Recyklované kamenivo se označuje jako kamenivo anorganického původu, které bylo dříve využito v konstrukci a řídí se dle ČSN EN 12620+A1. Jedná se o produkt, který je získán z technologického procesu v recyklačních linkách.

Recyklované kamenivo dělíme třemi způsoby:

- 1) kamenivo do betonu,
- 2) kamenivo pro malty,
- 3) kamenivo pro násypy a obsypy inženýrských sítí.

Každý typ recyklovaného kameniva musí splňovat odlišné požadavky stanovené danými normami. Pro kamenivo do betonu platí norma ČSN EN 12620+A1, která stanovuje jeho vlastnosti a norma ČSN EN 933-11, která specifikuje složení recyklovaného materiálu. Kamenivo určené pro malty musí vyhovět normě ČSN EN 13369. Recyklované kamenivo určené pro násypy a obsypy inženýrských sítí musí splňovat požadavky týkající se obsahu nebezpečných látek, které jsou definovány vyhláškou č. 294/2005 Sb. v tabulkách 10.1 a 10.2. [12] [13]

Také existují normy pro výrobu betonu ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404, které stanovují různé typy recyklovaného kameniva a jejich použití. Podmínky týkající se složení hrubého recyklovaného kameniva a jeho aplikace v betonu podle těchto norem je uvedeno v tabulce č. 1 níže. [13]

Tabulka č. 1 – Podmínky složení a použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu podle norem [13]

Norma		ČSN EN 206+A2		ČSN P 73 2404	
Typ recyklovaného kameniva		Typ A	Typ B	Typ 1	Typ 2
Podíl betonové složky	[%]	min. 90	min. 50	min. 90	min. 70
Podíl cihelné složky	[%]	max. 10	max. 30	max. 10	max. 30
Podíl recyklátu v betonu	do 50 %	pouze s. v. p. X0	pouze s. v. p. X0 a max. C30/37	pouze s. v. p. X0	pouze s. v. p. X0 a max. C8/10
	do 30 %	do s. v. p. XC4, XF1, XD1, XA1*	nelze použít	do s. v. p. XC4, XF1 a XF3	nelze použít

Jak můžeme pozorovat, je patrné, že tyto normy povolují použití betonového recyklátu, pokud je jeho podíl větší než 50 %. Současně jím však můžeme nahradit maximálně 50 % z celkového obsahu kameniva, a to pouze v betonech s nižšími pevnostními třídami a vlivy prostředí. Betonový recyklát je kvalitní surovinou, kterou je možné použít pro mnoho aplikací, kde směsný nebo cihelný recyklát nestačí. Hlavním cílem je však zpracování právě směsného recyklátu, což současné normy buď neumožňují nebo povolují jen v omezené míře. [12] [13] [15]

2.5.1 Požadavky na recyklované kamenivo dle norem v ČR

Norma ČSN EN 12620+A1 pro kameniva do betonu z roku 2008 udává, že je využití recyklovaného kameniva do betonu velmi rozsáhlé. Tato norma se týká kameniva získaného úpravou přírodního, umělého či recyklovaného materiálu a zahrnuje kameniva s objemovou hmotností po vysušení > než 2000 kg/m³, přičemž lze v některých případech využívat i recyklované kamenivo s nižší objemovou hmotností v rozmezí 1500 až 2000 kg/m³. [14] [15] [16] Tato norma stanovuje specifické požadavky na chemické vlastnosti recyklovaného kameniva, kterými jsou:

- **Obsah chloridů:** postupuje se dle EN 1744-1. Výrobce musí uvést obsah chloridových iontů. U recyklovaných kameniv obsahujících ztvrdlý beton či maltu hrozí riziko chloridů, které mohou být vázány v látkách jako je hlinitan vápenatý či jiné fáze, u kterých není možné odstranění vyluhováním vodou, a to ani po rozemletí vzorku na jemný prášek. Avšak obecně je obsah chloridů u recyklovaného kameniva nízký. [15] [16]
- **Obsah síranů:** postupuje dle EN 1744-1, kterou je nutno deklarovat v souladu s příslušnými kategoriemi. Síraný obsažené v recyklovaném kamenivu představují riziko agresivního rozpínání v betonu. Kategorie pro maximální obsah rozpustných síranů ve vodě pro recyklované kamenivo jsou uvedeny v tabulce č. 2 níže. [15] [16]

Tabulka č. 2 – Podmínky složení a použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu podle norem [16]

Obsah vodou rozpustných síranů [% z hmotnosti]	Kategorie
≤ 0,2	SS _{0,2}
Bez požadavku	SS _{NR}

- **Prvky ovlivňující proces tuhnutí a tvrdnutí betonu:** Mohou mít anorganický původ, který postupuje dle EN 1744-6 nebo organický, který se řídí EN 1744-1:1998, oddíl 15.1 a 15.2. Průběh hydratace cementu ovlivňují zejména humusovité látky a materiály obsahující cukry. Některé druhy jílovitých minerálů negativně ovlivňují pevnosti a trvanlivost betonu. Tyto prvky jsou kategorizovány v tabulce č. 3 níže.

Tabulka č. 3 – Kategorie pro vliv vodou rozpustných látek z recyklovaného kameniva na dobu tuhnutí cementové kaše [16]

Změna počáteční doby tuhnutí t_e [min]	Kategorie
≤ 10	A ₁₀
≤ 40	A ₄₀
> 40	A _{deklarovaná}
Bez požadavku	A _{NR}

Tato norma se dále věnuje požadavkům na fyzikální vlastnosti recyklovaného kameniva:

- **Nasákavost:** Recyklované kamenivo projevuje odolnost vůči zmrazování a rozmrazování, pokud je hodnota nasákavosti $< 1\%$ a splňuje normu EN 1097. [15]
- **Odolnosti vůči zmrazování a rozmrazování:** Mrazuvzdornost stanovujeme dle EN 1367-1. Pro recyklované kamenivo, které nemá částice spojené cementem, je vhodné využít hodnoty ze zkoušky síranem hořčnatým podle EN 1376-2. [15]
- **Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva:** Norma EN 933-11 stanovuje poměr materiálu v hrubém recyklovaném kamenivu, které je deklarováno příslušnými kategoriemi. [15]

Dalšími požadavky je posouzení vlivu kameniva na smrštění betonu, které je podrobně popsáno v normě ČSN EN 1367-4 a věnuje se i recyklovanému kamenivu. Pokud má recyklované kamenivo nasákavost $> 3,5\%$ nebo měrnou hmotnost $< 2450 \text{ kg/m}^3$, je možné použít alternativní metodu. Tato metoda zahrnuje kamenivo nasáklé vodou, ale s osušeným povrchem nebo přidáním přísady redukující vodu, což umožní dosažení vhodné zpracovatelnosti ke ztuhnutí zkušebních těles. [15] [16]

Dokumentace k recyklovanému kamenivu musí obsahovat veškeré vstupní informace o vstupním materiálu, ze kterého byl recyklát získán. Mezi tyto údaje patří:

- druh základního materiálu,
- alkalicko-křemičitá reakce s recyklovaným kamenivem,
- zdroj a místo původu,
- dodavatel a dopravce,
- minimální četnost zkoušek pro vlastnosti recyklovaného kameniva. [15]

Pokud se recyklované kamenivo použije v betonu s omezeným obsahem alkálií, je nutné ověřit jejich přítomnost v recyklovaném kamenivu a stanovit jejich obsah. Dále je nutné zjistit, zda recyklované kamenivo obsahuje reaktivní složky. Minimální požadované zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 4 níže. [15]

Tabulka č. 4 – Minimální četnost zkoušek recyklovaného kameniva [15]

Vlastnost		Článek	Poznámka	Zkušební metoda	Minimální četnost zkoušek
2	Objemová stálost - smršťování při vysychání	05.07.2002		ČSN EN 1367-4	Jednou za 5 let
3	Chloridy	06.II	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-5	
4	Složky obsahující síru	6.3.	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-1+A1	Dvakrát ročně
5	Organické složky	06.04.2001		*ČSN EN 1744-1 +A1	
	Obsah humusu			15.1*	Jednou ročně
	Fulvo kyselina			15.2*	Jednou ročně
	Srovnávací zkoušky pevnosti v průběhu tuhnutí			15.3*	Jednou ročně
	Lehké organické znečišťující složky			14.2*	Dvakrát ročně
8	Vliv na počáteční dobu tuhnutí cementu	06.04.2001	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-5	Dvakrát ročně
9	Složky hrubého recyklovaného kameniva	05.VIII	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 933-11	Jednou měsíčně
10	Objemová hmotnost zrn a nasákavost	05.V	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 1097-6	Jednou měsíčně
11	Vodou rozpustné sírany	06.III	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-1 + A1	Jednou měsíčně

Dalšími vlastnostmi u recyklovaného kameniva jsou geometrické vlastnosti, kterými se zabývá norma ČSN EN 933. Konkrétně norma ČSN EN 933-3 - Stanovení tvaru zrn – index plochosti a ČSN EN 933-11 - Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva, která slouží k identifikaci a odhadu jednotlivých podílů materiálů. Podrobnosti o klasifikaci složek hrubého recyklovaného kameniva jsou obsaženy v tabulce č. 5. [15] [16]

Tabulka č. 5 – Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva dle ČSN EN 12620+A1 [16]

Složka	Obsah [% z hmotnosti]	Kategorie
Rc	≥ 90	Rc ₉₀
	≥ 80	Rc ₈₀
	≥ 70	Rc ₇₀
	≥ 50	Rc ₅₀
	< 50	Rc deklarovaná
	Bez požadavku	Rc _{NR}
Rc + Ru	≥ 95	Rcu ₉₅
	≥ 90	Rcu ₉₀
	≥ 70	Rcu ₇₀
	≥ 50	Rcu ₅₀
	< 50	Rcu deklarovaná
	Bez požadavku	Rcu _{NR}
Rb	≤ 10	Rb ₁₀
	≤ 30	Rb ₃₀
	≤ 50	Rb ₅₀
	> 50	Rc deklarovaná
	Bez požadavku	Rc _{NR}
Ra	≤ 1	Ra ₁₋
	≤ 5	Ra ₅₋
	≤ 10	Ra ₁₀₋
X + Rg	$\leq 0,5$	XRg _{0,5-}
	≤ 1	XRg ₁₋
	≤ 2	XRg ₂₋
Složka	Obsah [cm ³ /kg]	Kategorie
FL	$\leq 0,2$	FL _{0,2-}
	≤ 2	FL ₂₋
	≤ 5	FL ₅₋

Tabulka č. 6 – Vysvětlivky k tabulce č. 5 podle EN 933-11 [16]

Složka	Popis
Rc	Beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky
Ru	Nestmelené kamenivo, přírodní kámen, směsi kameniva stmelené hydraulickými pojivy
Rb	Pálené zdící prvky (např. cihly a dlaždice), vápenopískové zdící prvky, provzdušněný neplovoucí beton
Ra	Asfaltové materiály
FL	Plovoucí materiál podle objemu
Rg	Sklo
X	Soudržné (např. jíl a zemina), kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, plasty a guma, sádrová omítka

Mechanickým a fyzikálním vlastnostem recyklovaného kameniva se věnuje norma ČSN EN 1097. Odolnost proti otěru stanovuje ČSN EN 1097-1 zkouškou mikro-Deval. Odolnost proti drcení zajišťuje norma ČSN EN 1097-2 metodou Los Angeles. Část 6 této normy, ČSN EN 1097-6, se zaměřuje na stanovení objemové hmotnosti zrn a jejich nasákavosti. [15]

Pórovité kamenivo anorganického původu s objemovou hmotností <math> < 2000 \text{ kg/m}^3 </math> nebo sypanou hmotností $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$ určuje norma ČSN EN 13055, která taktéž zmiňuje recyklované kamenivo pro použití do betonu. [15]

V normě ČSN EN 206+A2 jsou stanoveny maximální procentuální náhrady přírodního hrubého kameniva recyklovaným kamenivem podle vlivu prostředí. Tato norma rozlišuje recyklované kamenivo na dva druhy:

- druh A,
- druh B – tento druh však není určen pro použití v betonu > C30/C37.

Tyto specifikace jsou uvedeny v tabulce č. 7. [15] [17]

Tabulka č. 7 – Maximální procentuální nahrazení hrubého kameniva recyklovaným kamenivem [16]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Všechny ostatní stupně*
Druh A (RC ₉₀ /Rcu ₉₅ /Rb ₁₀ /Ra ₁₋ /XRg ₁ /FL ₂)	50%	30%	30%	0%
Druh B (RC ₅₀ /Rcu ₇₀ /Rb ₃₀ /Ra ₅₋ /XRg ₂ /FL ₂)	50%	20%	0%	0%

*Použití recyklovaného kameniva druhu A ze známého zdroje pro vliv prostředí, na který byl navržen původní beton, s maximální náhradou 30 %.

V normě ČSN EN 206+A2 jsou uvedeny doporučené vlastnosti pro hrubé recyklované kamenivo, které bude použito do betonu dle ČSN EN 12620. Doporučení jsou uvedena v tabulce č.8. [16]

Tabulka č. 8 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [16]

Vlastnost	Článek v EN 12620	Druh	Kategorie
Obsah jemných částic	4.6	A + B	Kategorie nebo deklarovaná hodnota
Index plochosti	4.4	A + B	$\leq FL_{50}$ nebo $\leq SI_{55}$
Odolnost proti drčení	5.2	A + B	$\leq LA_{50}$ nebo $\leq SZ_{32}$
Objemová hmotnost zrn	5.5	A	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
		B	$\geq 1700 \text{ kg/m}^3$
Nasákavost zrn	5.5	A + B	Hodnota musí být stanovena
Složky	5.8	A	(RC ₉₀ /RCu ₉₅ /Rb ₁₀ /Ra ₁ /XRg ₁ ./FL ₂ .)
		B	(RC ₅₀ /RCu ₇₀ /Rb ₃₀ /Ra ₅ /XRg ₂ ./FL ₂ .)
Sírany rozpustné ve vodě	6.3.3	A + B	$\leq SS_{0,2}$
Obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů	6.2	A + B	Hodnota musí být stanovena
Vliv na počátek tuhnutí	6.4.1	A + B	$\leq A_{40}$

Norma ČSN P 73 2404 v článku 5.1.3 s názvem – Kamenivo poskytuje dodatečné informace pro normu ČSN EN 206+A2. Jsou zde stanoveny podmínky, za kterých může recyklované kamenivo splňovat požadavky pro použití do betonu. [18]

Podle této technické normy musí vlastnosti recyklovaného kameniva odpovídat podmínkám uvedeným v normě ČSN EN 12620+A1. Při navrhování betonové směsi je důležité brát v úvahu vysokou nasákavost recyklovaného kameniva. Kamenivo do betonu lze použít pouze recyklát „typ 1“, avšak výjimkou jsou betony pevnostních tříd C8/10 a nižší, kde je možné použít „typ 2“. Tyto informace vyplívají z tabulky č. 9. [18]

Tabulka č. 9 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [18]

Druh hmoty	Obsah hmot v hmotnostních procentech	
	Typ 1	Typ 2
	Drť nebo písek vyrobený drcením pouze z betonu	Drť nebo písek vyrobený drcením stavebním sutě
Beton a kamenivo dle ČSN EN 12620	≥ 90	≥ 70
Slinutá keramika, nikoliv porézní střep	≤ 10	≤ 30
Vápenkový pískovec		
Ostatní minerální podíly	≤ 2	≤ 3
Asfalt	≤ 1	≤ 1
Ostatní příměsi	≤ 0,2	≤ 0,5

V tabulce č. 9 jsou uvedeny ostatní minerální podíly, kterými se rozumí například pórobeton, lehký beton, porézní cihelný střep, štuk, malta, mezerovitý beton, škvára a pemza. Ostatní příměsi jsou sklo, keramika, štuková sádra, guma, plasty, kovy, dřevo apod. [18]

Při použití recyklovaného kameniva „typu 1“ nesmí celkový obsah reaktivních alkálií přesáhnout hranici, která by mohla zapříčinit alkalicko-křemičitou reakci. Z hlediska expozičních tříd není možné použít recyklované kamenivo pro výrobu betonu odolnému prostředí XF2, XF4, XD1 až XD3. Také se nedoporučuje pro předpjaté betonové konstrukce, konstrukce s vysokými požadavky na odolnost vůči průsaku tlakové vody a pohledové betony. [18]

V tabulce č. 10 jsou uvedeny požadavky, které tato norma dále stanovuje pro minimální objemovou hmotnost a nasákavost recyklovaného kameniva, ale také požadavky pro maximální obsah rozpustných chloridů, který je omezen na 0,04 % hmotnosti pro oba typy recyklátu. [18]

Tabulka č. 10 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [18]

Objemová hmotnost a nasákavost	Recyklované kamenivo	
	Typ 1	Typ 2
Minimální objemová hmotnost [kg/m ³]	2000	
Povolená tolerance objemové hmotnosti [kg/m ³]	± 150	
Maximální nasákavost po 10 minutách [hm. podíl v %]	10	15

Pokud se recyklované kamenivo používá do provzdušněného betonu, provádí se zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7, a to minimálně jednou denně během procesu betonáže. Recyklované kamenivo se nesmí používat pro betony, které jdou ve styku s potravinami nebo pitnou vodou. [18]

2.5.2 Požadavky na recyklované kamenivo dle norem ve světě

Každá země má odlišné požadavky na recyklované kamenivo, zejména pokud jde o jeho použití v betonu. Například v Brazílii bylo recyklované kamenivo omezeno až do roku 2020 na nekonstrukční aplikace. Od roku 2021 zavedla brazilská norma ABNT NBR 15116 povolení až 20 % recyklovaného kameniva v konstrukčním betonu jakéhokoli druhu. V Německu je povoleno použití recyklovaného kameniva z betonového odpadu až do 90 %, pokud je však nasákavost maximálně 10 % a obsah kontaminovaných látek 0,2 %. Podobně je tomu v Austrálii, Portugalsku či Itálii. Například v Japonsku neexistuje stanovený limit pro jeho použití. Každá země si stanovuje specifické parametry a omezení v souladu se svými vlastními normativními požadavky a standardy. Tyto požadavky jsou uvedeny v tabulce č. 11 níže. [19]

Tabulka č. 11 – Požadavky na recyklované kamenivo ve světě [19]

Stát	Norma	Typ recyklovaného hrubého kameniva	Podrobnosti betonu	Povolené množství recyklovaného kameniva [%]	Vlastnosti recyklovaného kameniva							
					Beton [%]	Zdivo [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]	SO ₄ [%]	Cl [%]	Znečišťující látky [%]	Propad sítem 75 µm [%]
Austrálie	HB 155:2002	RCA (Třída 1A)	C 40	30	< 100	-	≥ 2100	≤ 6	n.a.	n.a.	< 1	n.a.
		RCA (Třída 1B)	C 25	100	< 70	> 30	≥ 1800	≤ 8	n.a.	n.a.	< 2	n.a.
Brazílie	NBR 15116	RCA	Konstrukční beton	20	100	-		≤ 7		≤ 0,1		≤ 10
		CRA RMA	Nekonstrukční beton	n.a.	> 90 < 90	< 10 ≥ 10	n.a.	≤ 12	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1	≤ 12
Čína	DG/TJ 07/008	RCA	n.a.	n.a.	≥ 95	< 5	n.a.	< 10	< 1	< 0,25	< 1	< 2
		RMA			≤ 95	> 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Itálie	NTC - 2008	RCA	C30/37	30	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Japonsko	JIS A 5021	RCA	C45/55	n.a.	n.a.	< 2	≥ 2500	≤ 3	n.a.	≤ 0,04	≤ 1	≤ 1
Německo	DIN 4226-100	RCA (původem z betonu)		90	> 90	< 10		≤ 10			≤ 0,2	
		RCA (stavebně demoliční odpad)	Konstrukční beton	70	> 70	< 30	≥ 2000	≤ 15	n.a.	≤ 0,04	≤ 0,5	n.a.
Nizozemsko	DIN 12620	RBA (čihly) RMA (smíšené)	Nekonstrukční beton	20 n.a.	< 20	> 80	≥ 1800 ≥ 1500	≤ 20 n.a.		≤ 0,15	≤ 1	
		RCA RMA		20 n.a.	n.a.	n.a.	≥ 2100 ≥ 2000	n.a.	≤ 1	≤ 1	≤ 1	n.a.
Portugalsko	LNEC E471	RCA 1 RCA 2 RMA	C35/45 C40/50 n.a.	25 20 n.a.	> 90 > 70 ≤ 10	≤ 10 ≤ 30 > 90	≥ 2200 ≥ 2000 ≥ 2000	≤ 7 ≤ 10	≤ 0,8	n.a.	< 0,2 < 0,5	n.a.
		RCA RA	C20/25 až C40/50 C16/20	20 100	> 95 -	< 5 < 100	n.a.	n.a.	≤ 1 n.a.	n.a.	≤ 0,5 ≤ 1	≤ 5 ≤ 3

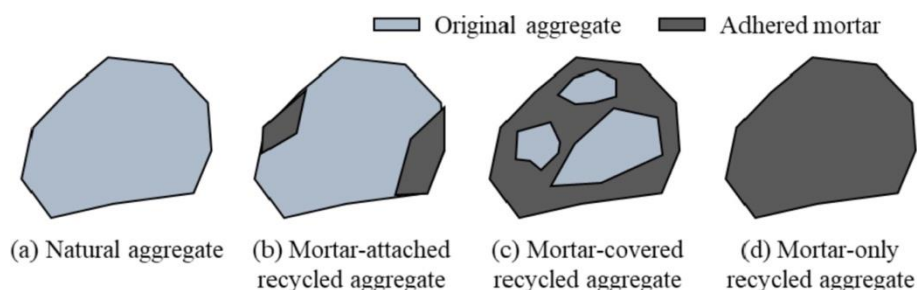
2.5.3 Vlastnosti recyklovaného kameniva z betonových recyklátů

Recyklované kamenivo se od přírodního liší tím, že obsahuje zbytky betonu, známé jako „cementový kámen“, který ovlivňuje vlastnosti recyklovaného kameniva. Stěžejními vlastnosti recyklovaného kameniva jsou objemová hmotnost, pórovitost a nasákavost, tvarový index, křivka zrnitosti a odolnost proti drcení a ořezu. Recyklované kamenivo z betonových recyklátů má vyšší nasákavost a pórovitost. To je způsobeno zbytkovým množstvím cementového kamene přilepeného na zrnech původního kameniva, které má vyšší porozitu a umožňuje větší retenci vody v pórech. Kvalita a množství cementového kamene je ovlivněna kvalitou původního betonu, tedy pevnostní třídou betonu a vodním součinitelem, technologií recyklace a frakcí recyklátu. Pro zlepšení kvality recyklovaného kameniva se používají různé technologie, jako je zvýšení drcení a mletí recyklátu, zahřívání nebo máčení v kyselinách (fosforečná, chlorovodíková, sírová). [20] [21]

Nasákavost u přírodního kameniva se pohybuje od 0 do 1 %, kdežto u recyklátu se hodnoty pohybují mezi 3–9 %. V drobné frakci recyklovaného kameniva je obsaženo více cementového kamene, a to způsobuje nasákavost v rozmezí zhruba od 6,5 do 13 %. Pórovitost u hrubého recyklovaného kameniva, měřená pomocí rtuťové porozimetrie dosahuje hodnot od 11 do 19,5 %. Tato hodnota je výrazně ovlivněna kvalitou původního betonu, zejména vodním součinitelem, který určuje množství vody použité při míchání betonu. [20] [21]

Zrna betonových recyklátů dělíme na 4 druhy:

- původní kamenivo,
- původní kamenivo s cementovým kamenem,
- kamenivo obalené cementovým kamenivem,
- cementový kámen. [21]



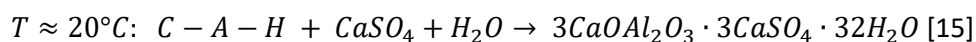
Obrázek 7: Druhy kameniva v závislosti na lepené maltě [21]

Křivka zrnitosti a tvar betonových recyklátů je závislý na technologii recyklace. Použitím odrazového drtiče lze dosáhnout kubického tvaru zrn s tvarovým indexem do 20 %. Oproti přírodnímu kamenivu mají zrna betonových recyklátů drsnější povrch, především díky cementovému kameni nacházejícím se na jejich povrchu. U hrubé frakce recyklovaného kameniva se rozdíly v křivkách zrnitosti v porovnání s hrubým přírodním kamenivem projevují minimálně. Avšak v drobné frakci je zaznamenatelné vyšší zastoupení větších zrn v porovnání s přírodním kamenivem. [20] [21]

Hodnota objemové hmotnosti betonového recyklátu je ovlivněna vodním součinitelem původního betonu. U betonu s vyšším vodním součinitelem, a tedy i vyšší porozitou cementového kamene, jsou dosahovány nižší hodnoty objemové hmotnosti recyklovaného materiálu. Objemová hmotnost betonových recyklátů obvykle bývá nižší než u přírodního kameniva, které má objemovou hmotnost v rozmezí 1500 – 1900 kg/m³. Obecně se objemová hmotnost betonových recyklátů pohybuje od 2150 – 2550 kg/m³, hrubá frakce má hodnoty od 2280 do 2550 kg/m³ a drobná frakce nepřesahuje 2350 kg/m³. Odolnost proti drcení zkoušíme metodou Los Angeles, kde betonové recykláty vykazují větší ztráty na hmotnosti než přírodní kamenivo, a to z důvodu oddělení cementového kamene od původního kameniva. Větší odolnost proti drcení mají recykláty z betonů s nižším obsahem vody. Odolnost proti drcení klesá s menší maximální velikostí zrna. Koeficient odolnosti proti drcení Los Angeles se u betonových recyklátů pohybuje mezi 25–40 %. [20] [21]

Alkalicko-křemičitá reakce (ASR) je chemický proces, kdy dochází k expanzi gelů, které mají vyšší objem než původní složky, což způsobuje rozpad betonu. Tato reakce se vyskytuje v situacích, kdy jsou v betonu přítomny alkálie, voda a amorfní křemík. Preventivními opatřeními proti ASR jsou použití cementu s nízkým obsahem alkálií, příměsí jako je například popílek, používání recyklovaného kameniva s nízkou nasákavostí a udržování nízkého obsahu alkálií v samotném betonu. Pro snížení expanze ASR se často využívá dusičnan lithný (LiNO₃). [22] [23]

Mezi látky, které znečišťují recyklované kamenivo, patří hlavně chloridy a sírany. Sírany se v materiálu z betonového recyklátu často objevují jako sádrovec (síran vápenatý), jehož zdrojem jsou převážně omítkové malty. V takových situacích může docházet k reakci síranů s C-A-H nebo C-S-H ve ztvrdlém cementovém kameni, což vede k vytváření ettringitu či thaumasitu. [15] [24]

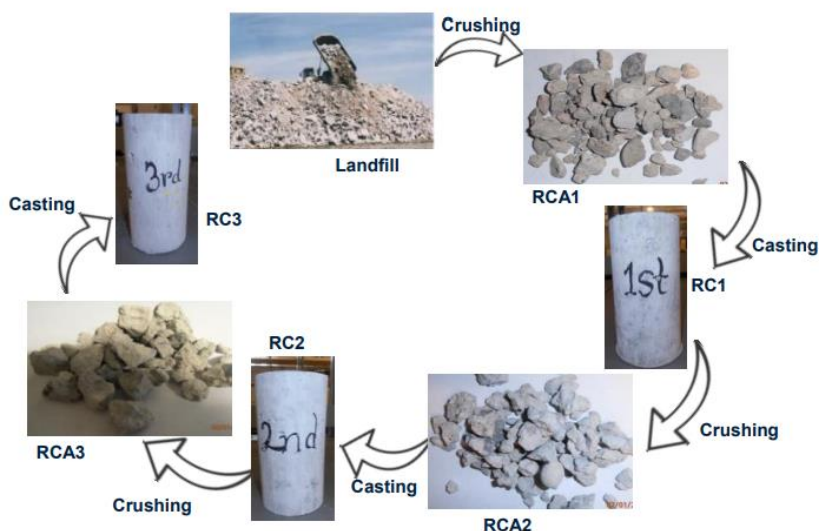


Tyto minerály zvětšují svůj objem, což následně vede k porušení betonu. Obsah rozpustných síranů ve vodě je v recyklovaném kamenivu omezen maximálně na 0,2 % hmotnosti kameniva. Chloridy se obvykle vyskytují v recyklovaném kamenivu z betonu, který byl v kontaktu s rozmrazovacími solemi či mořskou vodou. Obsah chloridů musí být deklarován výrobcem recyklovaného kameniva, avšak obecně tyto hodnoty nejsou příliš vysoké. [15] [24]

Dalšími znečišťujícími látkami mohou být plovoucí látky (FL), které jsou v recyklovaných materiálech pro konstrukční betony omezeny na maximální objem 0,2 % v cm^3/kg . Mezi další možné nečistoty patří kovy, neplovoucí částice dřeva, plastu a také sklo. Tyto látky se označují jako X+Rg a jejich obsah je limitován maximálně na 1 % hmotnosti recyklovaného kameniva „typu A“ a maximálně 2 % „typu B“. Přítomnost těchto látek má negativní dopad na pevnosti betonu. [15] [24]

2.5.4 Vlastnosti vícenásobně recyklovaného kameniva

U recyklovaného kameniva, které je opakovaně recyklováno dochází díky tomuto cyklu ke zhoršení kvality, což zapříčiňuje nárůst obsahu ztvrdlého cementového kamene, který se každým cyklem zvyšuje. Tento jev má za následek snížení objemové hmotnosti materiálu a zvýšení jeho nasákavosti. S každým dalším cyklem recyklace se zvyšuje i výskyt trhlin a pórů v recyklovaném kamenivu. Studie ukazují, že již po třetím cyklu recyklace obsahuje více než 80 % materiálu ztvrdlý cementový kámen a s každým dalším cyklem se tento obsah zvyšuje. [25]



Obrázek 8: Proces vývoje recyklovaného betonu vyrobeného opakovanou recyklací [25]

* RC1 – Recyklované kamenivo 1.generace, RC2 – Recyklované kamenivo 2.generace, RC3 – Recyklované kamenivo 3.generace [25]

2.5.5 Metody pro zjištění obsahu cementového kamene v betonových recyklátech

Obsah cementového kamene v betonových recyklátech lze zjistit pomocí tří metod, kterými jsou:

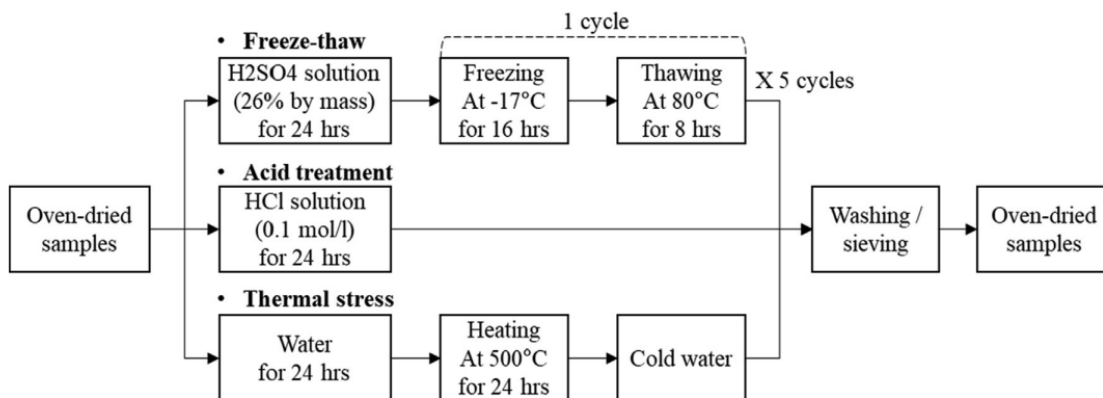
1. metoda zmrazování a rozmrazování v kombinaci s H_2SO_4 ,
2. úprava kyselinou chlorovodíkovou,
3. metoda tepelného namáhání cementového kamene. [26]

U první metody zmrazování a rozmrazování musí být vzorky důkladně očištěny od cizích těles, které by mohly mít negativní vliv na výsledné hodnoty. Například asfalt ovlivňuje přesnost měření a přispívá k nevhodnému dávkování směsi. Metoda využívá 26% roztok kyseliny sírové, do kterého se jednotlivé části vysušeného recyklovaného kameniva ponoří a nechají se nasycovat po dobu 24 hodin. Poté jsou vzorky podrobeny 5 cyklům. Každý cyklus podrobí vzorky zmražení na $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ s výdrží 16 hodin a následně je rozmrazují po dobu 8 hodin při $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. [26]

Druhá metoda, využívající 0,1 % kyselinu chlorovodíkovou a roztok síranu sodného má velkou výhodu, protože po 24hodinovém nasycení recyklovaného kameniva touto kyselinou není potřeba dalších postupů, jelikož je cementový kámen zcela oddělen od původních zrn kameniva. [26]

Třetí metodou je metoda tepelného namáhání cementového kamene, která zahrnuje namočení vysušeného recyklovaného kameniva do vody po dobu 24 hodin a následně jej vystaví zahřívání v peci při $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, taktéž po dobu 24 hodin. Poté je recyklované kamenivo ihned ponořeno do studené vody, což způsobí praskliny v cementovém kameni a jeho následné oddělení od původního kameniva. [26]

Pokud však na původním kamenivu zůstanou zbytky cementového kamene, je možné je lehce odstranit pomocí kovových či gumových kartáčů. V poslední řadě se pomocí sady sít oddělí cementový kámen frakce $<4,75\text{ mm}$, ošetřené kamenivo se vysuší do ustálené hmotnosti. Poté se vypočítá obsah cementového kamene jako poměr hmotností vysušeného kameniva před a po provedení zkoušky. [26]



Obrázek 9: Experimentální schéma pro zjištění obsahu cementového kamene v betonových recyklátech [26]

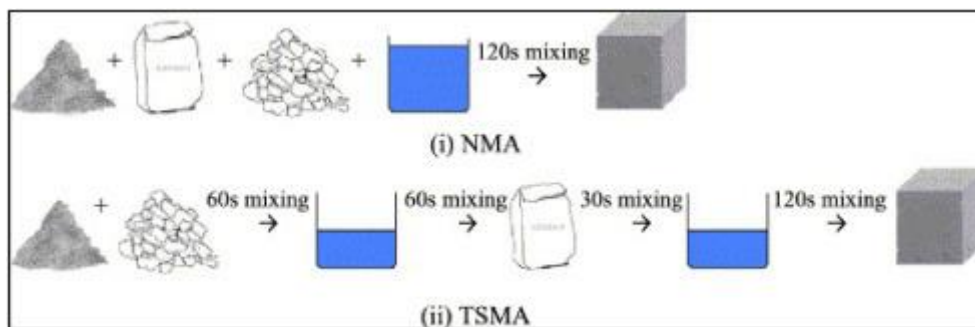
2.5.6 Metody pro zlepšení fyzikálních vlastností kameniva

Pro snížení negativních vlastností recyklovaných kameniv a k minimalizaci rozdílu mezi přírodním a recyklovaným kamenivem existuje řada metod. Mezi tyto metody patří například:

- předmáčení v kyselinách,
- dvoufázové míchání (TSMA),
- přidání jemně mletých pucolánových příměsí,
- použití polymerních emulzí,
- působení bakterií (mikrobiální srážení uhličitanu vápenatého),
- karbonatace. [27]

Předmáčením v kyselinách je docíleno rozpuštění hydratačních produktů na cementovém kameni obsaženém v betonovém recyklátu. Také dochází ke zlepšení kvality recyklovaného betonového kameniva, protože produkty hydratace cementu snižují porozitu a schopnost absorbovat vodu. Nicméně použitím kyselin ve vyšších koncentracích dochází ke zvýšení obsahu chloridů a sulfidů v recyklátu. Pro tuto metodu je vhodné použití kyseliny octové, která je bezpečnější a levnější než HCl nebo H₂SO₄. Optimální koncentrace HCl by měla být do 0,5 mol, jelikož vyšší koncentrace mohou negativně ovlivnit recyklované kamenivo. Tuto techniku lze také kombinovat s impregnací kameniva pomocí pucolánových příměsí. [27]

K úpravě vlastností betonu při použití recyklovaného kameniva stačí změnit pořadí míchání jednotlivých materiálů. Například takzvané „dvoufázové míchání“, kde je voda rozdělena do dvou dávek a přidána v odlišném časovém rozmezí. Tímto způsobem se pozoruje vrstva cementového tmelu, celkový objem dutin a krystalů hydroxidu vápenatého (tzv. cementové mléko) v přechodu mezi vazbou cementu a recyklovaným kamenivem. [27]



Obrázek 10: Rozdíl mezi běžným /i) a dvoufázovým mícháním (ii) [27]

Přidáním jemně mletých pucolánových příměsí se dosáhne zaplnění pórů v recyklovaném materiálu a podnítí se reakce pucolánů po přidání vody. Tyto faktory vedou ke zvýšení pevnosti recyklovaného betonu. Pucolánová vrstva na povrchu kameniva navíc vytváří bariéru, která redukuje tzv. „bleeding“, zlepšuje zpracovatelnost a posiluje tranzitní zónu. Pucolánové příměsi také reagují s původním $\text{Ca}(\text{OH})_2$, což vede ke vzniku C-S-H, které vytvoří kompaktnější strukturu betonu, a C_3A , který má schopnost na sebe vázat chloridy, zesiluje vazbu mezi cementovou maticí a recyklovaným materiálem. [27]

Polymerové emulze mají lepivé vlastnosti a dokážou velmi rychle ztuhnout. Jelikož jsou odolné vůči vodě, polymerové emulze snižují schopnost porézních materiálů absorbovat vodu. Namáčením recyklovaného kameniva do polymerních emulzí můžeme docílit obalením jejich struktury a vyplněním pórů. Nejideálnější je 10 % roztok PVA. Tato metoda zvyšuje objemovou hmotnost kameniva, lehce snižuje nasákavost recyklátu a zvyšuje odolnost proti otěru. Důležité je si uvědomit, že tato metoda může vést k hydrofobizaci povrchu, což má za následek nižší hydrataci cementu a následné snížení pevnosti recyklátů. [27]

Metoda mikrobiálního srážení uhličitanu vápenatého vytváří kontinuální vodotěsnou vrstvu na povrchu, zaplňuje póry a funguje jako bariéra (voděodolná vrstva), která snižuje propustnost recyklovaného betonu. Účinnost této metody závisí zejména na hodnotách pH, teplotě, množství vápníku a koncentraci bakterií. Nejvyšší účinnost mikrobiálního srážení uhličitanu vápenatého se projevuje při pH 9,5, ale při vyšších hodnotách pH klesá. Aktivita bakterií stoupá s teplotou, což naznačuje, že tato metoda má v tropických oblastech s vysokou vlhkostí a teplotami vysoký potenciál. Urychlení srážení CaCO_3 je patrné při vyšších koncentracích bakterií a množství vápníku nad 15 g/l CaCl_2 . Bakterie můžeme aplikovat například postříkem či ponořením, avšak postřík je vhodnější z hlediska technologie, zatímco ponoření je efektivnější. [27]

Metoda karbonatace snižuje porozitu a nasákavost recyklátu. Je šetrný k životnímu prostředí, jelikož dokáže zachytit CO_2 , který vzniká v průmyslových procesech. Při karbonataci recyklovaného kameniva reaguje CO_2 s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a hydratovaným vápenatým křemičitanem (C-S-H), což jsou hlavní produkty hydratace cementu ve ztvrdlém cementovém kameni. Touto reakcí vzniká CaCO_3 a silikátový gel, které vyplní póry ve ztvrdlém cementovém kameni. Tuto techniku lze kombinovat s namáčením kamene do kyselin, dvoufázovým mícháním a použitím jemně mletých pucolánových příměsí. Velmi důležitou otázkou je použití této metody v betonových konstrukcích s ocelovou výztuží, neboť karbonatací snižujeme pasivitu výztuže. [27]

2.6 Konstrukční betony pro technologii transportbetonu

Transportbetony jsou na stavbu dodávány v autodomíchávačích, tzv. mixech a každý z nich má svoje dané specifikace. Jedná se o tekuté směsi s konzistencí betonu S3 a více. Tyto betony se obvykle vybírají podle specifických vlastností a požadavků na pevnost, manipulaci, výrobní proces a konečné použití betonu. Hlavní výhodou transportbetonu je ta, že eliminuje potřebu míchání betonu přímo na staveništi, což šetří čas, zajišťuje konzistenci a kvalitu betonu. Máme několik typů konstrukčních betonů používaných pro transportbeton. [32]

Beton z portlandského cementu (PCB) je nejběžnějším typem betonu používaný pro výrobu transportbetonu. Označuje se jako CEM I. A pokud se jedná o portlandský směsný cement, tak se můžeme setkat s označením CEM II., kde je přísadou například popílek, vápenec nebo struska. Tyto cementy vyhovují požadavkům normy ČSN EN 197-1 ed. 2 a jsou určeny pro přípravu betonů vyšších a běžných pevnostních tříd, suchých maltových směsí, malt včetně injektážních a jiných směsí pro využití na stavbě, včetně jiných stavebních výrobků. Minimální pevnosti jsou u těchto betonů 42,5 MPa po 28 dnech. [28]

Vysokopevnostní beton (HPC – High Performance Concrete) má vysokou pevnost a odolnost vůči vlivům prostředí. Jeho složení je optimalizováno pro zvýšenou pevnost, což ho činí ideálním pro konstrukce vyžadující vyšší odolnost a zatížení. Při jeho výrobě musí základní složky vyhovovat přísným kritériím a pro dosažení požadovaných vlastností betonové směsi i výsledného betonu musí být doplněny o různé přísady a příměsí. Vybrané složky se nesmí negativně ovlivňovat ani vyvolávat nežádoucí chemické reakce. U těchto betonů se dosahuje pevnostních tříd C55/67 až C100/115 a obecně dosahuje tlakové pevnosti až 150 MPa. Struktura tohoto betonu by měla být co nejhutnější a počet uzavřených vzduchových pórů co nejmenší, čehož dosáhneme snížením vodního součinitele. [29]

Samozhutnitelný beton (SCC – Self Compacting Concrete) je speciální typ betonu, určený hlavně pro vyplnění těžko přístupných míst jako jsou silně vyztužené konstrukce, složité tvary, pohledové stěny, kazetové stropy, a to bez nutnosti vibrace. Skládá se ze směsi drobného a hrubého kameniva o maximální frakci D_{\max} 16, hydraulického pojiva, přísad, příměsí a vody. Vše se dávkuje v takovém množství, aby byl beton stále kompaktní a zároveň značně tekutý. Doba zpracovatelnosti činí stejně tak jako u běžných betonů 90 minut od namíchání v betonárně. [30]

Speciální betony pro extrémní podmínky jsou takové betony, u nichž některý z klíčových parametrů nabývá neobvyklých hodnot ve srovnání s běžnými betony. Mají své specifické vlastnosti a jsou určeny pro zvláštní použití. Například betony odolné vůči chemikáliím, které slouží pro konstrukce vystavené agresivnímu prostředí a díky tomu zvyšují odolnost vůči koroziivním látkám. Dále sem mohou patřit betony odolné cyklickému zmrazování a rozmrazování, které jsou navrženy tak, aby odolaly hlavně ve velmi chladných podmínkách. Obsahují přísady, které minimalizují riziko popraskání a degradace vlivem těchto cyklů. Dále sem mohou patřit vláknité betony, betony s vysokou odolností proti opotřebení a betony odolné vůči agresivnímu prostředí mořské vody. [31]

2.7 Požadavky na kamenivo z betonových recyklátů (dle standartů SAE)

Vzhledem k místním požadavkům a standardům na recyklovaná kameniva platí několik směrnic a norem. V SAE jsou standardy pro stavební materiály zaštiťovány organizací nazývanou Emirates Authority for Standardization and Metrology (ESMA). Pro kamenivo z betonových recyklátů se zahrnují následující aspekty:

- Kvalita a složení – specifikace požadavků na kvalitu betonového recyklátu, včetně fyzikálních a chemických vlastností.
- Zpracování a příprava – postupy pro zpracování a přípravu recyklovaného kameniva, zjištění kvality a použitelnosti pro výrobu betonu.
- Normy pro použití recyklovaného kameniva v betonu – normy týkající se podílu, míchání a vlivu tohoto materiálu na vlastnosti hotového betonu.
- Environmentální a udržitelné aspekty – zohlednění environmentálních aspektů recyklovaného kameniva, včetně jeho ekologického dopadu a schopností snižovat množství odpadu.
- Certifikace a testování – ESMA vyžaduje certifikaci a pravidelné testování recyklovaného kameniva z betonu, aby byla zaručena shoda s místními normami a standardy. [34] [36]

Pro přírodní i recyklované kamenivo se dále využívají odlišné normy a každá z nich slouží pro jiný účel. Například druhy kameniva, vlastnosti a zkušební metody pro získávání a zpracování kameniva pro beton se řídí dle evropského standardu **BS EN 12620:2002**. Tato norma je důležitá pro výrobce stavebních materiálů, projektanty a stavebníky, aby mohli zaručit, že použité kamenivo splňuje potřebné technické standardy a zajišťuje kvalitní výsledky v rámci stavebních projektů. [34] [35]

Dalším standardem je **ASTM C33/C33M**, což je americký standard pro jemné a hrubé kamenivo používané v betonu. Tento standard stanovuje požadavky na velikost zrn, tvar a texturu zrn, zkušební metody a kontrolu kvality. Tento standard je důležitý pro výrobce betonu, architekty, inženýry a stavebníky, kteří potřebují kamenivo splňující přesné technické specifikace pro optimální výkon a vlastnosti betonu v rámci stavebních projektů. [35] [36]

Soubor předpisů a směrnic zajišťuje tzv. **Dubai Municipality Standards**, který zajišťuje technické požadavky a normy pro různé aspekty stavebních a dalších odvětví v Dubaji. Tyto standardy a předpisy vydává a upravuje Městská rada Dubaje a mají za cíl zajistit kvalitu, bezpečnost a efektivitu ve stavebnictví a dalších oblastech. Tento soubor zahrnuje širokou škálu témat, jako jsou například stavební materiály a jejich specifikace, požární bezpečnost, hygienické a zdravotní normy, životní prostředí, kvalitu a bezpečnost. Tyto standardy jsou důležité pro všechny subjekty a účastníky ve stavebnictví v Dubaji, včetně developerů, inženýrů, stavebních firem a regulačních orgánů. [33] [35]

Konkrétní standardy a specifikace pro danou oblast ve Spojených arabských emirátech se mohou lišit v závislosti na konkrétním typu stavebního projektu či lokalitě. [33] [35]

Zkoušky a podmínky, které se využívají pro testování jemného a hrubého kameniva můžeme vidět v tabulce č. 12 uvedené níže. [33] [35]

Ozn.	Kamenivo	Standardní specifikace/Metody testování	Povolené limity		Frekvence testování	
			Jemné kamenivo	Hrubé kamenivo	Interní testování	Testování prováděné třetí stranou
1	Vzorkování	BS 812: p102:1989	25 kg	25 kg	Dle potřeby	Dle potřeby
2	Obsah vlhkosti	BS 812: p109:1990	NA	NA	F.A Daily	-
3	Sítový rozbor	BS 812-p103.1:1985	BS 882 Table 4	BS 882 Table 3	Denně	Každých 6 měsíců kompletní testování
4	Obsah jílu, prachu a částic <75um	BS 812:p103:1:1985/ ASTM C117	Natural Sand Curshed Sand 7%max	1.0%max		
5	Specifická hmotnost	BS 812:p2:1995/ ASTM C -127/128-12CL	2.60 Mg/m ³ Min	2.60 Mg/m ³ Min	Týdně	
6	Nasákavost	BS 812:p2:1995/ ASTM C -127/128-12CL	2% Max	2% Max		
7	Plochosť zrna [%]	BS 812 : p105.1:1989	-	25% Max		
8	Délka zrna [%]	BS 812 : p105.2:1990	-	25% Max		
9	Odolnost kameniva proti nárazu	BS 812: p112:1990	-	25% Max	Neprovádí se	
10	Odolnost kameniva proti drcení	BS 812:p110:1990	-	25% Max		
11	Odolnost vůči oděru Los Angeles	ASTM C131: 2006	-	30% Max		
12	10% fines Value	BS 812: p111:1990	-	100 KN Min		
13	Obsah jílovitých a křehkých částic	ASTM C 142: 2017	1% max	1% Max		
14	Potencionální alkalicko-křemičitá reakce	ASTM C 289: 2007	Neškodné	Neškodné		
15	Srážení při sušení	BS 812 p120	0.05% Max			
16	Organické nečistoty	ASTM C40:1990	Lehčí než referenční vzorky	-		
17	Chloridy rozpustné v kyselině	BS 812: p118: 1988	0.03% max	0.01% max		
18	Sírany rozpustné v kyselině	BS 812:p118:1988	0.3% max	0.3% max		
19	Stabilita (Sodík/Hořčík)	ASTM C88-99	12% mx	12% max		

2.8 Normové požadavky na betony s možností náhrady přírodních kameniv recykláty

V České republice existují normy a směrnice týkající se používání recyklovaných materiálů v betonech, které se řídí několika dokumenty.

- ČSN EN 206+A2 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda:

Tato norma určuje vlastnosti, složení a výrobní postupy pro beton zahrnující i možnosti využití recyklovaných materiálů. Obsahuje směrnice a limity pro množství a typy recyklovaných materiálů, které lze používat. Jejím cílem je podpořit udržitelnost výstavby a minimalizovat dopady na životní prostředí. [17]

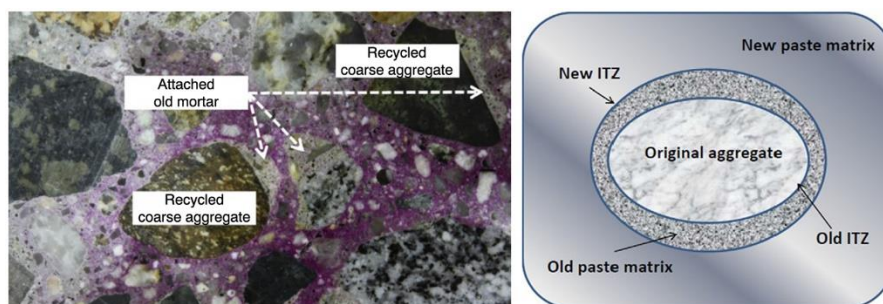
- ČSN EN 12620+A1 – Kamenivo pro beton:

Zabývá se kamenivem používaným v betonu a stanovuje požadavky na různé druhy kameniva včetně přírodního, drtě, šterku nebo oblázku. Tato norma je důležitá pro zajištění kvality a vhodnosti kameniva pro různé typy a aplikace. Hlavním bodům, kterým se tato norma věnuje, jsou specifikace kameniva, testování kameniva, označení a dokumentace a kontrola kvality. Správný výběr kameniva je klíčový pro dosažení správných fyzikálních vlastností betonu. Tato norma platí i pro recyklované kamenivo. [16]

Viz kapitola 2.5 – Recyklované kamenivo do betonu.

2.9 Vlastnosti betonu s použitím betonového recyklovaného kameniva

Tradiční beton má tři hlavní složky na mikroskopické úrovni, kterými jsou cementová matrice, kamenivo a tranzitní zóna mezi nimi, která je nejslabší zónou konvenčního betonu. Recyklovaný beton má dvě základní rozhraní. První rozhraní je tvořeno původním cementovým kamenem přilepeným k původnímu kamenivu a druhé rozhraní, které se skládá z nové tranzitní zóny mezi recyklovaným kamenivem a novou cementovou maticí. Přítomnost původního cementového kamene v recyklovaném kamenivu oslabuje spojení mezi recyklovaným materiálem a novou cementovou maticí, čímž vzniká nejslabší část recyklovaného betonu. Tato skutečnost vede ke zhoršení deformačních vlastností betonu, což zahrnuje modul pružnosti, smršťování při vysychání a dotvarování betonu. Dále dochází ke zvýšení absorpce vody a vyšší propustnosti betonu, přičemž dochází ke snížení mechanických vlastností, hlavně pevností. Tato skutečnost ovlivňuje také zpracovatelnost čerstvého betonu, která se snižuje díky zvýšené nasákavosti cementového kamene. [20] [38]



Obrázek 11: Tranzitní zóna mezi recyklovaným kamenivem a novou cementovou matricí [20]

*Přilnutá stará malta a recyklované hrubé kamenivo

2.9.1 Vlastnosti čerstvého recyklovaného betonu

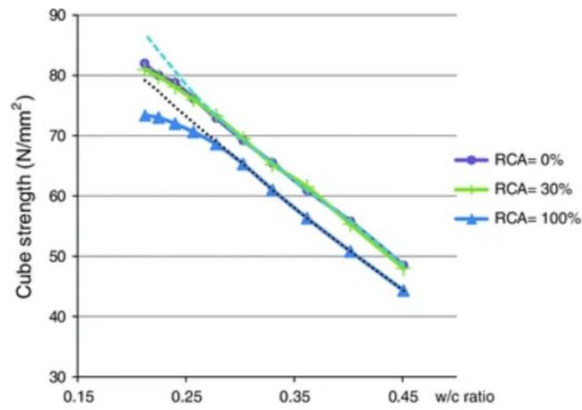
Reologii čerstvého betonu ovlivňuje vlhkost recyklovaného kameniva, jeho hrubost a tvar. Betony s recyklovaným kamenivem mají horší vlastnosti reologie než ty s přírodním kamenivem a to při stejném obsahu vody. Kombinace povrchově osušeného nasáklého recyklovaného materiálu a super plastifikátory dokáže efektivně zlepšit reologické vlastnosti recyklovaného betonu. [21]

Objemová hmotnost čerstvého recyklovaného betonu klesá s rostoucím podílem recyklovaného kameniva, protože objemová hmotnost recyklovaného materiálu je nižší než přírodní kameniva. Recyklované betony, které jsou 100 % nahrazeny recyklovaným kamenivem, vykazují objemovou hmotnost nižší o 13–17 %. [21]

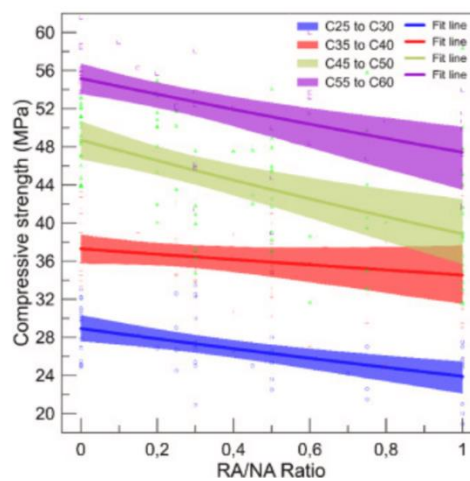
Obsah vzduchu v čerstvém betonu není ovlivněn hrubým recyklovaným kamenivem. Nicméně hrubé recyklované kamenivo výrazně ovlivňuje tzv. bleeding betonu, který je až o 34 % vyšší než u běžného betonu. [39]

2.9.2 Vlastnosti ztvrdlého recyklovaného betonu

Obecně platí, že pevnost recyklovaného betonu v tlaku je nižší než pevnost betonu s přírodním kamenivem. Tato pevnost klesá s rostoucím množstvím recyklovaného kameniva a s vyšším obsahem vody. Pomyslným limitem je 25–30 % náhrada hrubého kameniva betonovým recyklátem, kdy dochází pouze k minimálnímu poklesu v pevnosti tlaku. Pokud se chce dosáhnout stejné pevnosti v tlaku při náhradě 50–100 % hrubého kameniva recyklovaným materiálem, je třeba snížit obsah vody o 4–10 %. Pokud se obsah vody nemění, očekává se pokles pevnosti v tlaku až o 25 %. [40]



Obrázek 12: Závislost pevnosti v tlaku na množství recyklovaného kameniva a vodním součinitelem [25]



Obrázek 13: Závislost pevnosti v tlaku na náhradě přírodního kameniva betonovým recyklátem [25]

Pokud je vodní součinitel $>0,6$, tak množství recyklovaného kameniva už nemá klíčový vliv, ale nahradí ho nízká kvalita cementové matrice. Recyklovaný beton je ovlivněn objemovou hmotností a nasákavostí recyklovaného materiálu stejně jako způsobem míchání, který může kompenzovat vysokou nasákavost recyklovaného materiálu pomocí přídavku záměsové vody nebo namočením recyklátu. Materiály s nízkou nasákavostí mají problém absorbovat nadměrné množství vody, což může vést k tzv. bleedingu, negativně ovlivňujícímu tranzitní zónu betonu, a to vede ke snížení pevnosti v tlaku. Naopak recyklované materiály s vysokou nasákavostí vykazují opačný efekt. Dokážou v sobě udržet vodu, která se postupně uvolňuje během zrání betonu, což přispívá k hydrataci a zvyšuje se odolnost vůči tlaku. [20]

Pevnost recyklovaného betonu v příčném tahu je stejně jako pevnost v tlaku negativně ovlivněna zvyšujícím se obsahem recyklovaného kameniva a vodním součinitelem. Při 25 % náhradě hrubého kameniva recyklátem s konstantním vodním součinitelem lze očekávat pokles

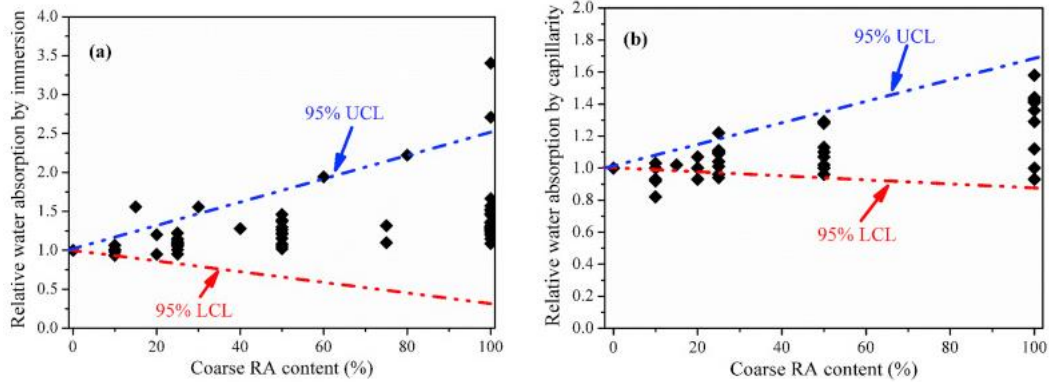
o 2–8 %, při náhradě pak o 7–19 %. Na pevnost v tahu za ohybu recyklovaného betonu a vodní součinitel mají vliv vlastnosti kameniva, jako je tvar, drsnost a modul pružnosti. S poklesem modulu pružnosti kameniva klesá také pevnost v tahu za ohybu. Avšak tvrdý cementový kámen na recyklovaném kamenivu má pozitivní vliv na pevnost v tahu za ohybu, jelikož na recyklovaném kamenivu vytvoří zdrsňené hrany, což společně s cementovou maticí posiluje mechanické spoje. Při nahrazení 15–50 % přírodního kameniva hrubým recyklovaným betonem dochází k poklesu odolnosti v ohybu o přibližně 13 %. [41]

Hlavním faktorem ovlivňujícím modul pružnosti recyklovaného betonu je modul pružnosti samotného recyklovaného kameniva. Kvůli vyšší náchylnosti recyklovaného kameniva k deformacím oproti přírodnímu kamenivu, dochází k výraznému poklesu modulu pružnosti recyklovaného betonu. Nasákavost recyklovaného betonu roste s množstvím použitého recyklovaného kameniva. Oproti běžnému betonu se nasákavost zvyšuje zhruba o 5–10 %. Toto zvýšení je způsobeno dutinami v původním ztvrdlém cementovém kameni a jeho porózní strukturou. Nasákavost lze snížit zvýšením dávek cementu, což vede k vytvoření hutnější cementové matrice. [41]

Permeabilita recyklovaného betonu je hlavně ovlivněna množstvím použitého recyklovaného kameniva, vodním součinitelem, pevnostního matečního betonu z recyklovaného kameniva, dobou zpracování a přísady do betonu. Obecně platí, že permeabilita recyklovaného betonu bývá horší než u běžného betonu. Nepropustnost recyklovaného betonu klesá s rostoucím podílem recyklovaného kameniva. Závislost mezi nasákavostí a množstvím hrubého recyklovaného kameniva a kapilární absorpcí v závislosti na jeho objemu je znázorněna na obrázku č.14. [22]

Kapilární absorpce recyklovaného betonu, stejně jako nasákavost, je negativně ovlivněna dutinami a porozitou v původním cementovém kameni. S vyšším podílem recyklovaného kameniva a větším množstvím vody dochází k vytváření více porézní cementové pasty a ke snížení kvality tranzitní zóny, což vede ke zvýšené kapilární absorpci a nasákavosti. [22]

Podle křivky horního intervalu spolehlivosti (UCL) je patrné, že beton s plnou náhradou recyklovaným kamenivem bude s 95 % pravděpodobností ukazovat kolem 2,5x vyšší nasákavost a 17x vyšší kapilární absorpci než běžný beton. [22]



Obrázek 14: Závislost nasákavosti recyklovaného betonu (vlevo) a závislost kapilární nasákavosti recyklovaného betonu (vpravo) na množství hrubého kameniva [22]

Křivka horního intervalu spolehlivosti (UCL) naznačuje, že při úplné náhradě hrubého kameniva v recyklovaném betonu lze s 95% jistotou očekávat 2,5krát větší hloubku karbonatace. Naopak, při úplné náhradě drobného kameniva lze předpokládat 8,7krát vyšší hloubku karbonatace oproti přírodním kamenivům. Zvýšení vodního součinitele vytváří více pórovitou strukturu betonu, což umožňuje snazší pronikání CO_2 . Pro zlepšení odolnosti recyklovaného betonu vůči karbonataci lze výhodně využít vysokopecní granulovanou strusku. Jejím přidáním se vytváří méně pórovitá a hustější struktura betonu. Na druhou stranu, použití popílku místo cementu ve samo-zhutnitelném betonu s recyklovaným kamenivem může negativně ovlivnit karbonataci betonu. Tento jev je způsoben nižším obsahem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v betonech s vysokým obsahem popílku, ale lze to kompenzovat použitím metakalionu, který pozitivně ovlivňuje mikrostrukturu betonu. Využitím plastifikátorů v počáteční fázi výroby lze efektivně snížit karbonataci recyklovaného betonu, a to větší mírou než u běžného betonu. [22]

Tabulka č. 13 – Vliv různých parametrů na karbonataci recyklovaného betonu [22]

Parametry	Změna parametrů	Ovlivnění
Množství recyklovaného kameniva	Zvýšení	Velmi negativní
Vodní součinitel	Zvýšení	Velmi negativní
Velikost recyklovaného kameniva	Snížení	Lehce negativní
Množství cementového kamene	Zvýšení	Velmi negativní
Expoziční doba	Zvýšení	Negativní
Pucolánové příměsi	Zvýšení	Negativní
Superplastifikátory	-	Pozitivní
Předúprava recyklovaného kameniva	-	Lehce pozitivní
Metoda míchání betonu	-	Lehce pozitivní

Recyklovaný beton má nižší odolnost vůči mrazuvzdornosti oproti běžnému betonu a tato odolnost klesá s četností cyklů zmrazování a rozmrazování. Mrazuvzdornost recyklovaného betonu se zhoršuje s vyšším obsahem cementu a recyklovaného kameniva, ale také s rostoucím množstvím vody přidaného do směsi. Kvůli vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva oproti přírodnímu kamenivu obsahuje více vody, která se může uvolňovat do cementové matrice během zmrazování a rozmrazování, což způsobuje vznik většího množství trhlin. [22]

Pro zlepšení odolnosti betonu vůči mrazu se často využívají recyklované materiály z vysokohodnotných nebo provzdušněných betonů, což může dosáhnout srovnatelných výsledků s použitím přírodního kameniva. Předem namočené recyklované materiály mají tendenci poskytovat lepší výsledky než ty, které nebyly namočeny, jelikož se z těchto materiálů uvolňuje voda, která napomáhá hydrataci cementu. Další možností pro zlepšení mrazuvzdornosti je využití speciálních příměsí, jako je popílek nebo metakaolín. Tyto látky reagují s Ca(OH)_2 , což vede k tvorbě gelu C-S-H a vytváření hustší a pevnější struktury recyklovaného betonu. [22]

Tabulka č. 14 – Vliv různých parametrů na mrazuvzdornost recyklovaného betonu [22]

Parametr	Změna parametru	Ovlivnění
Množství recyklovaného kameniva	Navýšení	Velmi negativní
Vodní součinitel	Navýšení	Velmi negativní
Množství cementového kamene	Navýšení	Velmi negativní
Pevnost původního betonu	Navýšení	Lehce pozitivní
Provzdušňovací přísada	Navýšení	Lehce pozitivní
Pucolánové příměsi		Lehce pozitivní
Namáčení recyklovaného kameniva		Lehce pozitivní

Odolnost recyklovaného betonu vůči pronikání chloridů klesá s rostoucím množstvím recyklovaného kameniva. Celkově je odolnost proti pronikání chloridů u recyklovaného betonu nižší než u běžného betonu. Pronikání chloridů do betonu je zejména ovlivněna trhlinami ve ztvrdlém cementovém kameni. Avšak u recyklovaného betonu s nízkým obsahem vody může být zaznamenán opačný trend. Tato skutečnost může být způsobena přítomností C-S-H gelů v recyklovaném kamenivu, které napomáhají vázat chloridy v betonu. [22] [41]

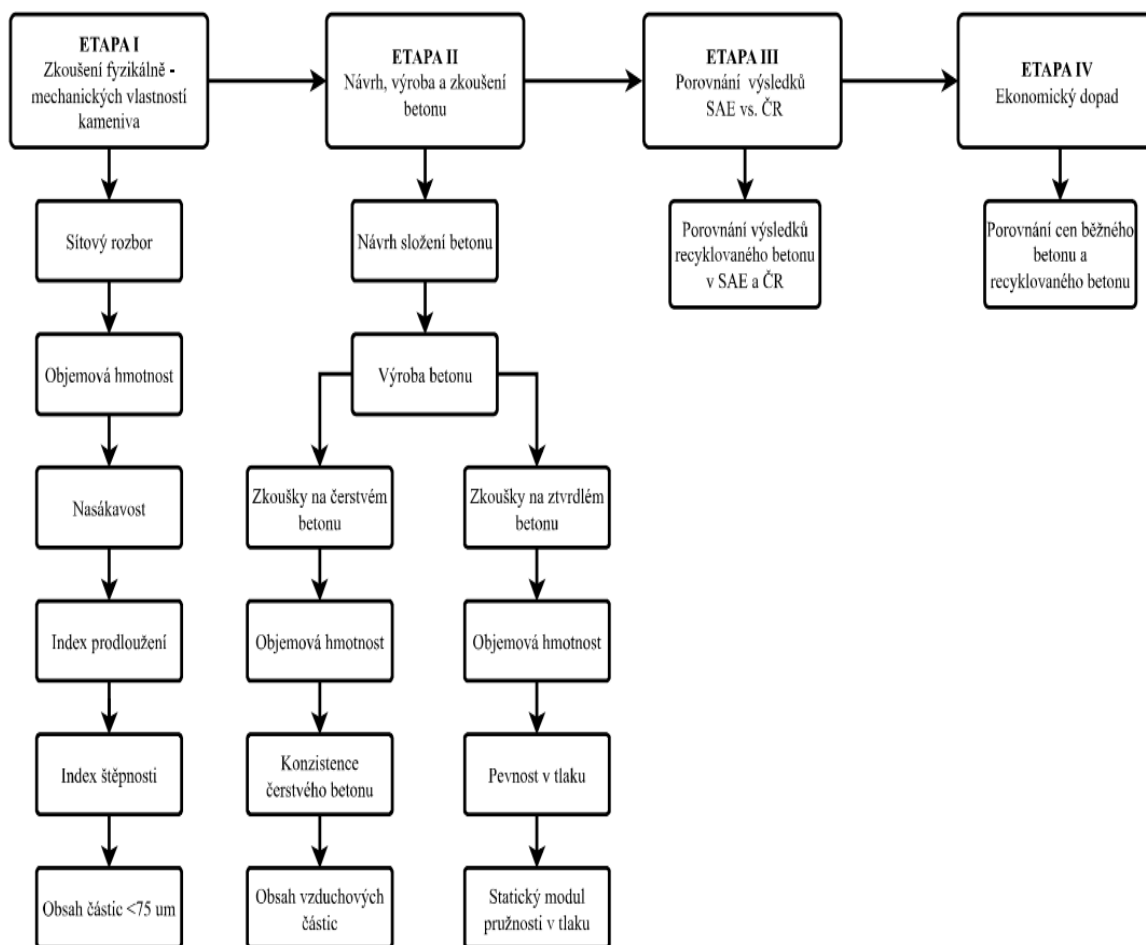
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl experimentální části

Cílem experimentální části bylo stanovení fyzikálně-mechanických vlastností přírodního a recyklovaného betonového kameniva. Následovalo navrhnutí dvou receptur betonu pevnostních tříd C30/20 a C40/20 podle standardů v SAE s úplnou, nebo částečnou náhradou všech frakcí přírodních kameniv betonovým recyklátem. Dále byla pozornost věnována vlastnostem čerstvých betonů, zejména konzistenci v čase 0 až 90 minut. Dále byly otestovány mechanické vlastnosti ztvrdlých betonů v různých časových obdobích.

3.2 Metodika zkoušení

Praktická část této diplomové práce byla provedena ve Spojených Arabských Emirátech v Abu Dhabi, ve firmě Alas Emirates Ready Mix. Tato diplomová práce je rozdělena do čtyř etap. První etapa byla zaměřena na zkoušení přírodního kameniva a betonových recyklátů. Cílem bylo získání základních charakteristik kameniv pro návrh betonových směsí. Druhá etapa se věnovala návrhu betonové směsi, obsahující přírodní kamenivo a jeho nahrazení recyklovaným kamenivem. Testovaly se vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Třetí etapa se věnovala porovnání výsledků recyklovaného betonu v SAE a ČR. Čtvrtá etapa se zabývá ekonomickými dopady použití betonových recyklátů, na cenu za 1 m³ betonové směsi. Diagram metodiky experimentální části je zobrazen níže.



3.3 Vstupní suroviny

Pro přípravu betonů s přírodními kamenivými a betonovými recykláty byly použity tyto suroviny:

Cement

K přípravě betonových směsí byl použit cement CEM I 42,5 N, jehož výrobcem je Arkan – Al Ain Cement Factory, UAE. Charakteristickou vlastností tohoto cementu je vysoký obsah cementu až 95 %, normální pevnostní třída 42,5 MPa po 28 dnech a normální rychlost tvrdnutí. Tento typ cementu je vhodný pro aplikaci v konstrukcích, kde se požaduje specifická pevnost a odolnost betonu, dle BS EN 197-1:2011. Tento cement nabízí vyšší pevnostní třídu než jiné typy cementů. V tabulce níže jsou uvedeny vybrané fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti.

Tabulka č. 15 – Fyzikální a mechanické vlastnosti CEM I 42,5 N – Arkan, Al Ain

Parametr	Průměrné dosahované hodnoty
Pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	19,5
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	34,8
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	48,1 – 62,5
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	9
Počátek tuhnutí [min]	190
Konec tuhnutí [min]	240
Měrný povrch [m ² /kg]	345

Tabulka č. 16 – Chemické vlastnosti CEM I 42,5 N – Arkan, Al Ain

Parametr	Požadavky	Průměrně dosahované hodnoty [%]
SiO ₂	bez omezení	20,9
IR	max 5,0 %	0,31
Al ₂ O ₃	bez omezení	4,9
Fe ₂ O ₃	bez omezení	3,9
CaO	bez omezení	64
MgO	max 5,0 % (pro slínek)	1,7
SO ₃	max 3,5 %	2,5
Na ₂ O	bez omezení	0,55
LOI	max 5,0 %	1,6
Cl ⁻	max 0,10 %	0,02
C ₃ A	bez omezení	6,3

Přírodní kamenivo

Jako přírodní kamenivo drobné frakce byl použit dunový písek (Dune Sand) Al Ain Municipality, který byl zbaven organických látek, jemného prachu a nečistot. Je žluto-oranžové barvy.

Přírodní kamenivo drobné frakce 0/5 mm bylo zvoleno Riddhi Siddhi – Limestone, dodáno výrobcem Riddhi Siddhi Crusher and Land Transport. Toto drcené kamenivo je dováženo z Fujairahy a surovinou je vápenec.

Jako přírodní kamenivo hrubé frakce 5/10 mm a 10/20 mm bylo zvoleno kamenivo Al Amara – Oman, dodáno výrobcem ATT – Al Tasamoh Sand and aggregates. Jedná se o drcené kamenivo dováženo z Ománu, surovinou je vápenec.

Výše zmíněná kameniva splňují normu BS 812: Part 2: 1995, která je obdobná jako ČSN EN 12620+A1.



Obrázek 15: vlevo Dune Sand, Al Ain – Municipality, vpravo Riddhi Siddhi – Limestone 0/5 mm



Obrázek 16: vlevo Al Amara 5/10 mm, vpravo Al Amara 10/20 mm

Betonový recyklát

Betonový recyklát byl dodáván firmou Alas Emirates Ready Mix ve frakcích 0/5 mm a 5/10 mm a 3/16 mm.

Záměsová voda

Jako voda pro přípravu betonových směsí byla použita pitná voda z vodovodního řádu, splňující normu BS EN 1008:2002 – Mixing water for concrete, obdobná jako ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu.

Superplastifikační přísada

Použitá superplastifikační přísada byla zvolena od společnosti Sika s názvem SikaPlast – 750. Jedná se o superplastifikátor na bázi polykarboxylátu, vyvinutý zejména pro použití v hotových betonových směsích. Cílem je prodloužení doby zpracovatelnosti betonové směsi, snížení rizika segregace, zlepšení vlastností betonu a zvýšení vodotěsnosti. Tato superplastifikační přísada neobsahuje chloridy ani další složky podporující korozi oceli, a proto je vhodná pro použití do železobetonových a předpjatých konstrukcí. Vlastnosti této přísady jsou shrnuty v tabulce č. 17. [49]

Tabulka č. 17 – Vlastnosti SikaPlast – 750 [49]

Druh přísady	Aditivum pro snížení množství vody a urychlení tuhnutí
Vzhled	Bělavá zakalená kapalina
Hustota [kg/m ³]	1070 při 25 °C
Maximální obsah chloridů [% z hm.]	0

Přísada zpomalující tuhnutí

Použitá přísada zpomalující tuhnutí byla zvolena od společnosti Sika India, s názvem SikaPlast – 1000 ES. Jedná se o modifikovaný polykarboxylát snižující množství vody a urychlující tuhnutí betonové směsi. Zlepšuje pohyb čerpaného betonu na stavbách, zvyšuje vodotěsnost, napomáhá k efektivní disperzi a distribuci cementu, přísad a pigmentů, nemá nepříznivý vliv na konečné pevnosti betonu, a napomáhá k rychlejšímu zrání betonových směsí. Vlastnosti této přísady jsou shrnuty v tabulce č. 18. [50]

Tabulka č. 18 – Vlastnosti SikaPlast – 1000 ES [50]

Druh přísady	Středně vodoredukující a zpomalovací plastifikační přísada
Vzhled	Černohnědá homogenní kapalina
Hustota [kg/m ³]	1020 při 25 °C
Obsah pH	≥ 6

3.4 Použité zkušební metody

3.4.1 Zkoušky kameniva

3.4.1.1 Stanovení zrnitosti kameniva – Sítový rozbor

Sítový rozbor byl proveden na přírodním kamenivu i betonovém recyklátu, dle normy BS 812–103.1:1985. [51] Zkouška závisí na prosévání vzorku kameniva sadou normových sít. Vzorky neboli zbytky na sítích se po prosévání zváží a stanoví se jejich hmotnostní podíl. Pro výpočet procenta jemných částic slouží následující vzorec:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

Kde:

M_1 : suchá hmotnost zkušební navážky [kg]

M_2 : suchá hmotnost zkušební navážky po propláchnutí [kg]

M_3 : suchá hmotnost materiálu zbylého na sítě [kg]

P: hmotnost vytríděného materiálu zbylého na dně [kg]

Pro výpočet procentuálního propadu na daném sítě slouží vzorec:

$$\frac{M_3}{M_1} \times 100$$

Kde:

M_1 : suchá hmotnost zkušební navážky [kg]

M_3 : suchá hmotnost materiálu zbylého na sítě [kg]

Tabulka č. 19 – Velikost používaných sít pro síťový rozbor [51]

Velikost používaných sít pro síťový rozbor	
Perforovaná deska s čtvercovými otvory o průměru 450 mm nebo 300 mm	Drátěné síto o průměru 300 mm nebo 200 mm
[mm]	[mm]
75,0	3,35
63,0	2,36
50,0	1,7
37,5	1,18
28,0	[um]
20,0	850
14,0	600
10,0	425
6,3	300
5,0	212
	150
	75
* síto o velikosti 63 um, se spíše nepoužívá	

Tabulka č. 20 – Minimální hmotnost vzorků pro síťový rozbor [51]

Minimální hmotnost vzorku pro síťový rozbor	
Velikost materiálu [mm]	Minimální hmotnost testovaného materiálu [kg]
63	50
50	35
40	15
28	5
20	2
14	1
10	0,5
6	0,2
5	0,2
3	0,2
<3	0,1

3.4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva

Objemová hmotnost a nasákavost zrn kameniva byla provedena na přírodním kamenivu a betonovém recyklátu, dle normy ASTM C127. [52] V této metodě je testováno kamenivo, které je prvně vysušeno v sušárně do konstantní hmotnosti. Po ustálení a ochlazení je ponořeno do vody na 24 ± 4 hodiny, aby byl vyplněn prázdný prostor mezi kamenivem. Následně je kamenivo vyjmuto z vody a osušeno od přebytečné vody. Po vysušení se kamenivo opět zváží. Následně je vypočtena objemová hmotnost kameniva a jeho nasákavost. Po stanovení hmotnosti na vzduchu je zkušební vzorek vložen do nádoby a zvážen ve vodě při $23 \pm 2,0$ °C, čímž je určena jeho zdánlivá hmotnost.

Pro výpočet objemové hmotnosti jsou použity následující vzorce:

$$OD = \frac{A}{(B - C)} * 1000$$

Kde:

OD: hmotnost vzorku vysušeného v sušárně [kg/m^3]

A: hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně na vzduchu [g]

B: hmotnost nasyceného povrchu suchého zkušební vzorku na vzduchu [g]

C: zdánlivá hmotnost nasyceného zkušební vzorku ve vodě [g]

$$SSD = \frac{B}{(B - C)} * 1000$$

Kde:

SSD: nasycené povrchově suché kamenivo [kg/m^3]

B: hmotnost nasyceného povrchu suchého zkušební vzorku na vzduchu [g]

C: zdánlivá hmotnost nasyceného zkušební vzorku ve vodě [g]

$$ASG = \frac{A}{(A - C)} * 1000$$

Kde:

ASG: zdánlivá měrná hmotnost [kg/m^3]

A: hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně na vzduchu [g]

C: zdánlivá hmotnost nasyceného zkušební vzorku ve vodě [g]

Pro výpočet nasákavosti je použit následující vzorec:

$$\text{Nasákavost [\%]} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

Kde:

A: hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně na vzduchu [g]

B: hmotnost nasyceného povrchu suchého zkušební vzorku na vzduchu [g]

3.4.1.3 Index prodloužení

Index prodloužení byl zkoušen na vzorcích přírodního kameniva dle BS 812: 1990 P105 S105.2. Principem této zkoušky je stanovení indexu prodloužení hrubé směsi kameniva. Kamenivo je klasifikováno jako protáhlé, pokud má největší rozměr (délku) větší jak 1,8násobek průměrné velikosti síta. Index prodloužení se zjišťuje oddělením protáhlých částic přes síto a vyjádřením jejich hmotnosti jako procenta hmotnosti testovaného vzorku. Test se provádí na materiálu, který je větší jak 6,3 mm nebo zůstane na sítu této velikosti. Maximální povolené procento pro index prodloužení je 15 %. [42]

$$\text{Index prodloužení [\%]} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

Kde:

M2: celková hmotnost testovaného vzorku [g]

M3: celková hmotnost zadržena na délkové měřící šabloně [g]

Tabulka č. 21 – Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm) [42]

Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm)
50,0 mm
37,5 mm
28,0 mm
20,0 mm
14,0 mm
10,0 mm
6,3 mm

3.4.1.4 Index štěpnosti

Index štěpnosti byl zkoušen na vzorcích přírodního kameniva, dle normy ASTM D4791. Cílem této zkoušky je poskytnutí stanovení indexu štěpnosti. Příměs je klasifikována jako štěpná,

pokud nejmenší rozměr vzorku (tloušťka) je <0,6 svého průměru. Index štěpnosti vzorku příměsi se zjišťuje oddělením štěpných částic a vyjádřením jejich hmotnosti, jako procenta hmotnosti testovaného vzorku. Ten se provádí na materiálu, který neprojde sítím <6,3 mm nebo zůstane na sítu, ale jejich průměr je 63 mm. Maximální povolené procento indexu štěpnosti je 25 %. [43]

$$\text{Index štěpnosti [\%]} = \frac{M_3}{M_2} \times 100$$

Kde:

M2: celková hmotnost testovaného vzorku [g]

M3: celková hmotnost zadržena na délkové měřicí šabloně [g]

Tabulka č. 22 – Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm) [43]

Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm)
63,0 mm
50,0 mm
37,5 mm
28,0 mm
20,0 mm
14,0 mm
10,0 mm
6,3 mm

3.4.1.5 Obsah částic <75 μm

Množství materiálu menšího než 75 μm bylo stanoveno na vzorcích přírodního kameniva, dle ASTM C 117. Principem této zkoušky je stanovení množství materiálu, procházejícího sítím o velikosti 75 μm a stanovením výsledné ztráty hmotnosti, jako procento původní hmotnosti vzorku. Výpočet je vypočten na základě vzorce:

$$< 75 \mu\text{m} [\%] = \frac{A - B}{A} * 100$$

Kde:

A: počáteční hmotnost vzorku v suchém stavu [g]

B: suchá hmotnost vzorku po propláchnutí [g]

3.4.2 Zkoušky na čerstvém betonu

3.4.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena pro beton s přírodním kamenivem, a pro beton s náhradou přírodního kameniva recyklátem, dle BS EN 12350-6. Principem metody je zhutnění čerstvého betonu na vibračním stole v nádobě o známém objemu. Nejprve je zvážena prázdná nádoba (m_1), která se následně umístí na vibrační stůl a plní se čerstvým betonem v tolika vrstvách, kolik je potřeba, aby bylo dosaženo úplného zhutnění. Jakmile je dokončeno hutnění, povrch betonu je zarovnan a naplněná nádoba je umístěna na váhu, kde se zváží (m_2). Objemová hmotnost čerstvého betonu je vypočtena dle následujícího vztahu: [44]

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Kde:

D: objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]

m_1 : hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 : hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem [kg]

V: objem nádoby [m^3]

3.4.2.2 Konzistence čerstvého betonu

Konzistence čerstvého betonu byla stanovena na betonu s přírodním kamenivem a betonu s náhradou přírodního kameniva recyklátem, dle BS EN 12350-2, byla použita zkouška sednutím kužele. Pro tuto metodu je využit tzv. Abramsův kužel, který má výšku 300 mm, průměr hrdla 100 mm a průměr základy 200 mm. Další pomůcky jsou podkladní deska, propichovací tyč, násypka a lopatka.

Kužel je položen na podkladní desku a přišlápnut. Plnění probíhá ve třech vrstvách výšky 1/3 výšky kužele. Vrstvy jsou hutněny 25 vpichy pomocí tyče. Následně je odstraněn přebytečný beton jak z kužele, tak z podkladní desky. Poté se forma zvedne ve vertikálním směru a ihned se změří sednutí (h). Klasifikace konzistence sednutí kužele je uvedena v tabulce č. 23 níže. [45]

Tabulka č. 23 – Klasifikace konzistence sednutí kužele dle ČSN EN 206+A2[17]

Stupeň	Zkouška sednutím [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	> 220

3.4.3 Zkoušky na ztvrdlém betonu

3.4.3.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se stanovuje dle ČSN EN 12390-7. Principem této zkoušky je zjištění objemu a hmotnosti zkušební tělesa. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se vypočte dle následujícího vztahu: [46]

$$D = \frac{m}{V}$$

Kde:

D: objemová hmotnost [kg/m³]

m: hmotnost zkušební tělesa [kg]

V: objem zkušební tělesa [V]

3.4.3.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se stanovuje dle ČSN EN 12390-3 na zkušebních krychlích o délce hrany 150 mm. Principem této zkoušky je rovnoměrné zatěžování zkušební tělesa uloženého kolmo na směr hutnění ve zkušebním lisu do meze porušení, což je maximální zjištěná hodnota síly (F) při porušení tělesa. Pevnost v tlaku se vypočte dle následujícího vztahu: [47]

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Kde:

f_c: pevnost v tlaku [MPa]

F: síla při porušení zkušební tělesa [N]

A: tlačná plocha zkušební tělesa [mm²]

3.4.3.3 Statický modul pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti betonu se stanovuje dle ČSN ISO 1920-10. Principem metody je stanovení pevnosti v tlaku f_c srovnávacích těles, která slouží pro výpočet horní zatěžovací meze σ_a . Následně je na těleso osazeno snímací zařízení a poté je vloženo se do hydraulického lisu. Na těleso je vyvozeno základní napětí σ_b o velikosti 0,5 MPa, následně se na snímačích odečtou zobrazené hodnoty. Napětí je zvyšováno až do hodnoty σ_a , kde se po dosažení požadované hodnoty napětí udržuje po dobu 60 sekund, poté se opět odečtou hodnoty na snímačích. Zatěžovací cyklus je opakován minimálně dvakrát. Po skončení posledního zatěžovacího cyklu je napětí udržováno po dobu 60 sekund na hodnotě σ_b . Poté jsou zaznamenány hodnoty poměrného přetvoření ε_b . Zkušební těleso je znovu zatíženo předepsanou rychlostí na σ_a po dobu 60 sekund, poté je zaznamenáno poměrné přetvoření ε_a . Statický modul pružnosti v tlaku se vypočítá dle vztahu: [48]

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Kde:

E_c : statický modul pružnosti v tlaku [MPa]

σ_a : horní zatěžovací napětí [MPa] ($\sigma_a = f_c/3$)

σ_b : základní napětí [MPa]

ε_a : průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

ε_b : průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí

3.5 ETAPA PRVNÍ

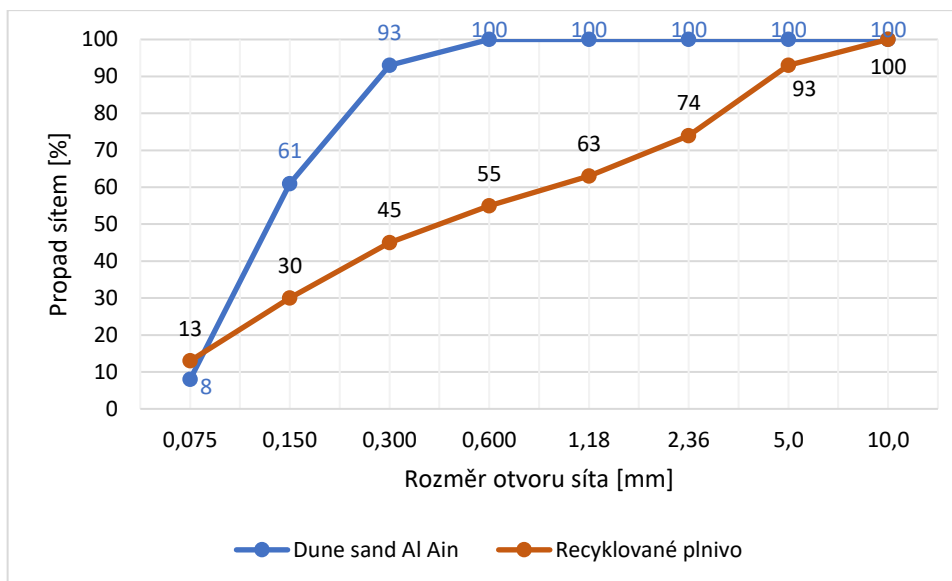
Tato etapa se věnuje stanovení fyzikálně – mechanických vlastností přírodních a betonových recyklátů. Na kamenivech byly provedeny zkoušky zrnitosti kameniva, stanovení objemové hmotnosti zrn kameniva, nasákavost zrn kameniva, index prodloužení, index štěpnosti a obsah částic <75 µm.

3.5.1 Stanovení zrnitosti kameniva – Sítový rozbor

Zrnitost kameniva byla stanovena na přírodním jemném kamenivu DK Dune sand Al Ain 0/0,6 mm a dále na přírodních kamenivech DK Riddhi Siddhi 0/5 mm, DK Al Amara 5/10 mm a Al Amara 10/20 mm. Dále byla zrnitost kameniva stanovena na betonovém recyklovaném jemném kamenivu 0/5 mm a na betonových recyklátech frakce 0/5 mm a 5/10 mm. Sítové rozborů jednotlivých kameniv jsou uvedeny v tabulkách č. 24 až č. 28.

Tabulka č.24 – Sítový rozbor Dune sand Al Ain

Dune sand Al Ain 0/0,6 mm				Recyklované plnivo 0/5 mm			
Celková hmotnost suché navážky M ₁ [g]		103		Celková hmotnost suché navážky M ₁ [g]		211	
Suchá hmotnost po praní M ₂ [g]		97		Suchá hmotnost po praní M ₂ [g]		184	
Velikost otvorů sítá [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na sítě [%]	Velikost otvorů sítá [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na sítě [%]
10,0	0	0	0	10,0	0	0	100
5,0	0	0	0	5,0	15	7,1	93
2,36	0	0	0	2,36	41	19,4	74
1,18	0	0	0	1,18	23	10,9	63
0,600	0	0,0	100	0,600	17	8,1	55
0,300	7,0	6,8	93	0,300	21,0	10,0	45
0,150	33,0	32,0	61	0,150	30,0	14,2	30
0,075	55,0	53,4	8	0,075	36,0	17,1	13
P	2,0	-	-	P	1,0	-	-
Obsah jemných částic [%]		7,8		Obsah jemných částic [%]		13,3	

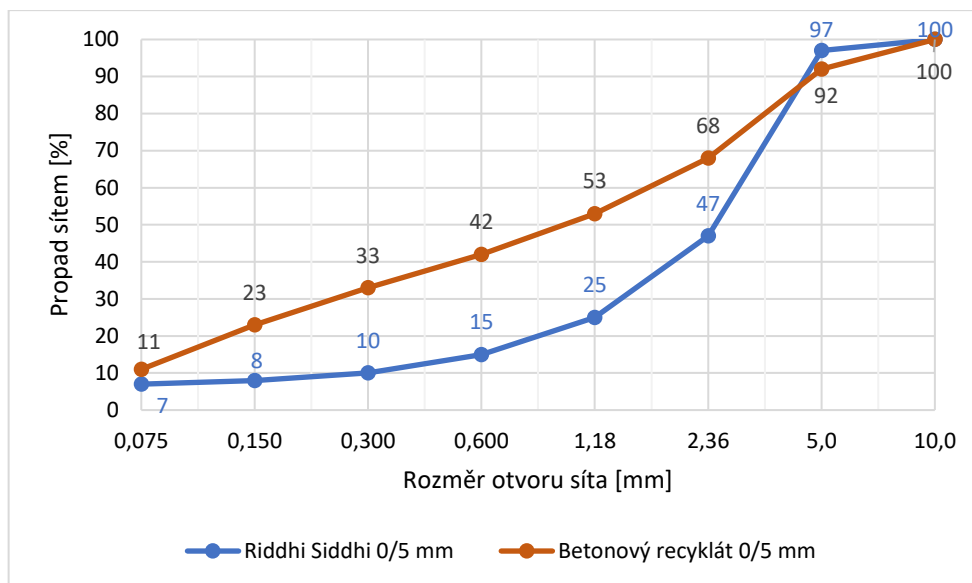


Graf č. 1 – Křivka zrnitosti Dune sand Al Ain a recyklované plnivo

Při porovnání těchto dvou křivek zrnitosti si můžeme povšimnout, že přírodní jemné kamenivo Dune sand obsahuje 7,8 % drobné frakce, zatímco recyklované jemné kamenivo obsahuje 13,3 % drobné frakce. Rozdíl v síťovém rozboru mezi přírodním a recyklovaným jemným kamenivem je způsobem tím, že recyklát obsahuje větší podíl různých velikostí frakcí než přírodní jemné kamenivo.

Tabulka č. 25 – Síťový rozbor DK Riddhi Siddhi 0/5 mm a betonového recyklátu 0/5 mm

Riddhi Siddhi 0/5 mm				Betonový recyklát 0/5 mm			
Celková hmotnost suché navážky M_1 [g]		215,0		Celková hmotnost suché navážky M_1 [g]		261,0	
Suchá hmotnost po praní M_2 [g]		200,0		Suchá hmotnost po praní M_2 [g]		233,0	
Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na síť [%]	Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na síť [%]
10,0	0	0,0	100	10,0	0	0,0	100
5,0	6	2,8	97	5,0	22,0	8,4	92
2,36	108	50,2	47	2,36	61,0	23,4	68
1,18	48	22,3	25	1,18	39,0	14,9	53
0,600	22	10,2	15	0,600	29,0	11,1	42
0,300	10	4,7	10	0,300	24,0	9,2	33
0,150	3	1,4	8	0,150	26,0	10,0	23
0,075	3	1,4	7	0,075	31,0	11,9	11
P	0	-	-	P	1	-	-
Obsah jemných částic [%]		7,0		Obsah jemných částic [%]		11,1	

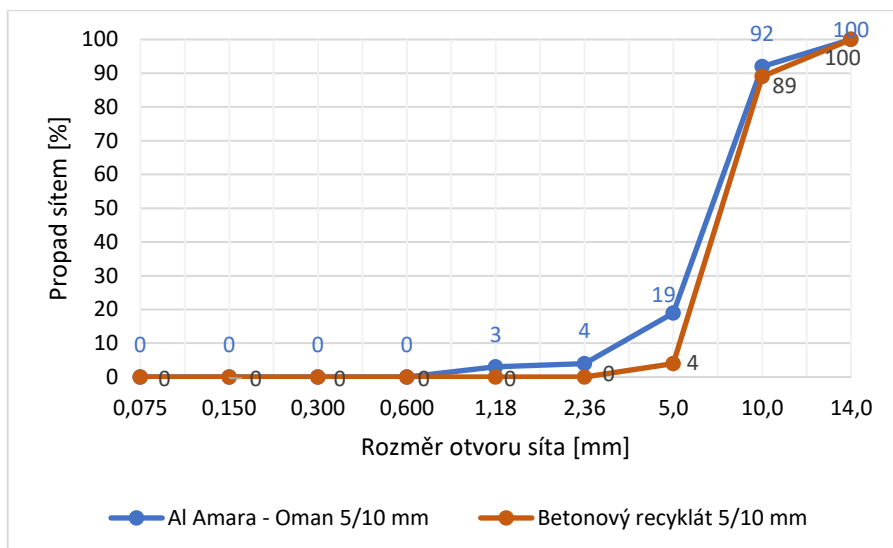


Graf č. 2 -Křivky zrnitosti DK Riddhi Siddhi 0/5 mm a betonového recyklátu 0/5 mm

Při porovnání těchto dvou křivek zrnitosti si můžeme povšimnout, že přírodní kamenivo Riddhi Siddhi obsahuje 7 % drobné frakce, zatímco betonový recyklát 0/5 mm obsahuje 11,1 % drobné frakce.

Tabulka č. 26 – Sítový rozbor DK Al Amara 5/10 mm a betonového recyklátu 5/10 mm

Al Amara – Oman 5/10 mm				Betonový recyklát 5/10 mm			
Celková hmotnost suché navážky M ₁ [g]		876,0		Celková hmotnost suché navážky M ₁ [g]		726,0	
Suchá hmotnost po praní M ₂ [g]		851,0		Suchá hmotnost po praní M ₂ [g]		723,0	
Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na sítě [%]	Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na sítě [%]
14	0	0	100	14	0	0	100
10,0	68	7,8	92	10,0	81,0	11,2	89
5,0	641	73,2	19	5,0	614,0	84,6	4
2,36	135	15,4	4	2,36	28,0	3,9	0
1,18	7	0,8	3	1,18	0,0	0,0	0
0,600	0	0,0	0	0,600	0,0	0,0	0
0,300	0	0,0	0	0,300	0,0	0,0	0
0,150	0	0,0	0	0,150	0,0	0,0	0
0,075	0	0,0	0	0,075	0,0	0,0	0
P	0	-	-	P	0	-	-
Obsah jemných částic [%]		2,9		Obsah jemných částic [%]		0,4	

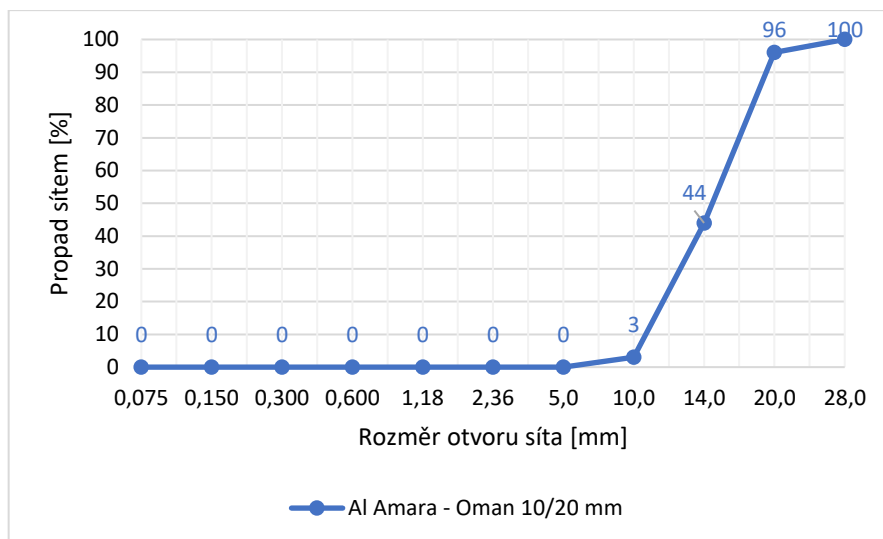


Graf č. 3 - Křivky zrnitosti DK Al Amara 5/10 mm a betonového recyklátu 5/10 mm

Při porovnání těchto dvou křivek zrnitosti si můžeme povšimnout, že přírodní kamenivo Al Amara obsahuje 2,9 % drobné frakce, zatímco betonový recyklát 5/10 mm obsahuje 0,4 % drobné frakce.

Tabulka č. 27 – Sítový rozbor DK Al Amara 10/20 mm

Al Amara – Oman 10/20 mm			
Celková hmotnost suché navážky M ₁ [g]			2156,0
Suchá hmotnost po praní M ₂ [g]			2147,0
Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu [g]	Zbytek na sítích [%]	Propad na síti [%]
28,0	0	0	100
20,0	91	4,2	96
14,0	1111	51,5	44
10,0	901	41,8	3
5,0	44	2,0	0
2,36	0	0,0	0
1,18	0	0,0	0
0,600	0	0,0	0
0,300	0	0,0	0
0,150	0	0,0	0
0,075	0	0,0	0
P	0	-	-
Obsah jemných částic [%]			0,4

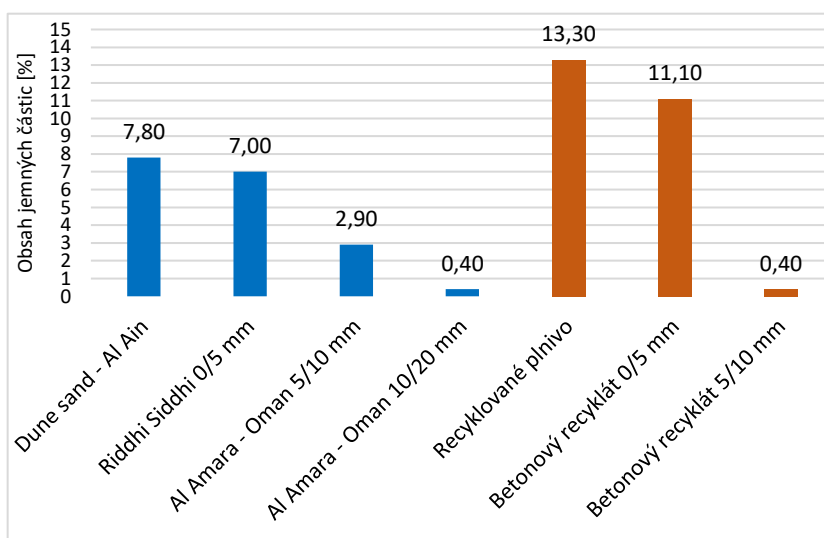


Graf č. 4 - Křivka zrnitosti DK Al Amara 10/20 mm

V grafu vidíme, že přírodní kamenivo Al Amara obsahuje 0,4 % drobné frakce.

Tabulka č. 28 – Obsah jemných částic v souboru kameniva

Kamenivo	Obsah jemných částic [%]	Kategorie f
Dune sand – Al Ain 0/0,6 mm	7,80	f ₁₀
Riddhi Siddhi 0/5 mm	7,00	f ₁₀
Al Amara – Oman 5/10 mm	2,90	f ₄
Al Amara – Oman 10/20 mm	0,40	f ₃
Recyklované plnivo	13,30	f _{deklarovaná}
Betonový recyklát 0/5 mm	11,10	f _{deklarovaná}
Betonový recyklát 5/10 mm	0,40	f ₃



Graf č. 5 – Obsah jemných částic v souboru kameniva

Dle ČSN EN 12620+A1 spadají do kategorie f₁₀ přírodní kameniva Dune sand – Al Ain 0/0,6 mm a Riddhi Siddhi 0/5 mm. Dále do kategorie f₄ spadá přírodní kamenivo Al Amara –

Oman 5/10 mm. Další kategorií je f_3 , kam spadá přírodní kamenivo Al Amara 10/20 mm a betonový recyklát 5/10 mm. Poslední kategorií je $f_{\text{deklarovaná}}$, kam spadá recyklované plnivo 0/5 mm a betonový recyklát 0/5 mm.

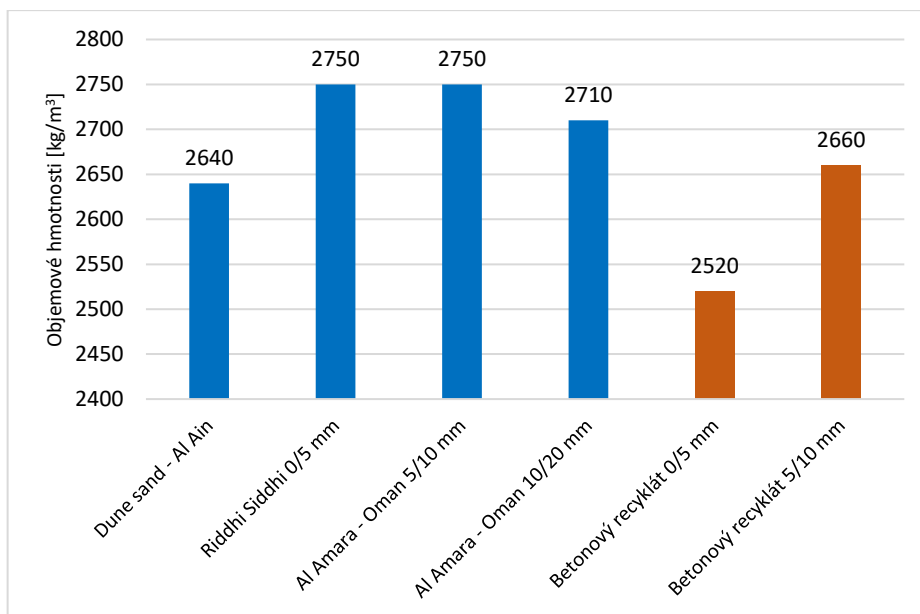
Nejnižší obsah jemných částic vykazuje betonový recyklát 5/10 mm a přírodní kamenivo Al Amara – Oman 10/20 mm a to 0,40 %. U betonového recyklátu můžeme pozorovat rostoucí trend s klesající velikostí frakce. Nejvyšších hodnot dosahuje recyklované plnivo, a to 13,30 %, z důvodu velkého množství jemného prachu obsaženého v recyklátu. Z tohoto důvodu byl tento recyklát vyřazen a dále na něm nebyly prováděny žádné zkoušky.

3.5.2 Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva

Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva bylo provedeno na přírodních kamenivech i betonových recyklátech, které jsou uvedeny v předešlé kapitole, dle ASTM C127. Výsledné hodnoty nasákavosti po 24 hodinách a objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce č. 29.

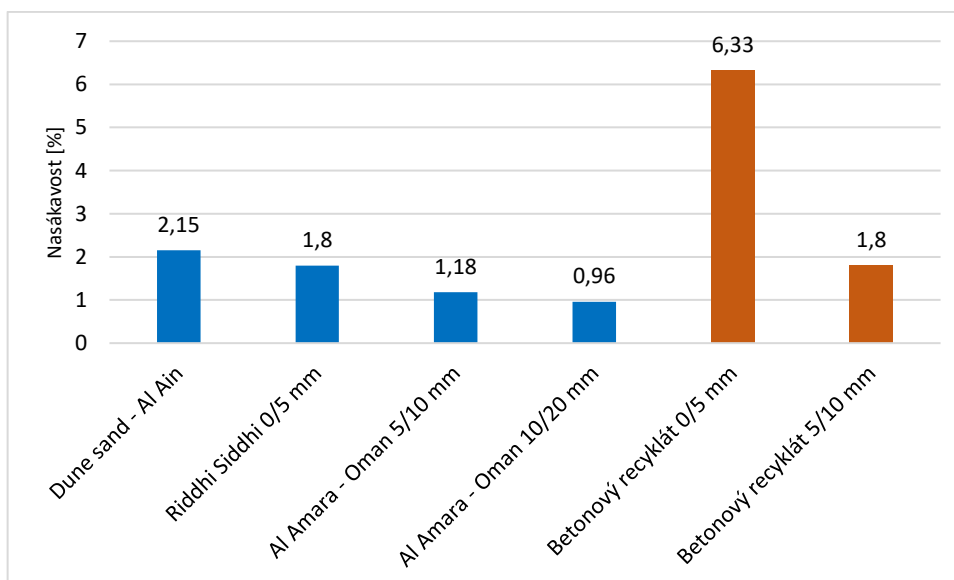
Tabulka č. 29 – Objemová hmotnost a nasákavost zrn kameniva

Frakce [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]
Dune sand – Al Ain	2640	2,15
Riddhi Siddhi 0/5 mm	2750	1,8
Al Amara – Oman 5/10 mm	2750	1,18
Al Amara – Oman 10/20 mm	2710	0,96
Betonový recyklát 0/5 mm	2520	6,33
Betonový recyklát 5/10 mm	2660	1,8



Graf č. 6 – Porovnání objemových hmotností zrn kameniva

Z grafu č.6, je patrné, že přírodní kameniva vykazují oproti betonovým recyklátům vyšší objemové hmotnosti. Při porovnání frakce přírodního kameniva Riddhi Siddhi 0/5 mm a betonového recyklátu 0/5 mm, můžeme vidět, že rozdíl objemových hmotností je přibližně 8 %. Rozdílu je dosaženo z důvodu obsahu cementového kamene, který se nachází na povrchu zrn betonového recyklátu.



Graf č. 7 – Nasákavost zrn kameniva po 24 hodinách

Nasákavost zrn kameniva po 24 hodinách dosahuje nejvyšších hodnot u betonového recyklátu 0/5 mm a to 6,33 %. To je způsobeno obsahem cementového kamene, který se nachází na povrchu původního kameniva a zvyšuje tak jeho nasákavost, kvůli jeho porozitě. Nejnižší

nasákavost má přírodní kamenivo Al Amara – Oman 10/20 mm a to 0,96 %. Betonový recyklát 5/10 mm a přírodní kamenivo Riddhi Siddhi 0/5 mm vykazují stejné procento nasákavosti a to 1,8 %.

3.5.3 Index prodloužení a štěpnosti

Index prodloužení a štěpnosti byl proveden na přírodních kamenivech Al Amara – Oman 10/20 mm, Al Amara – Oman 5/10 a betonovém recyklátu 5/10 mm.

Tabulka č. 30 – Index prodloužení a index štěpnosti přírodního kameniva Al Amara – Oman 10/20 mm

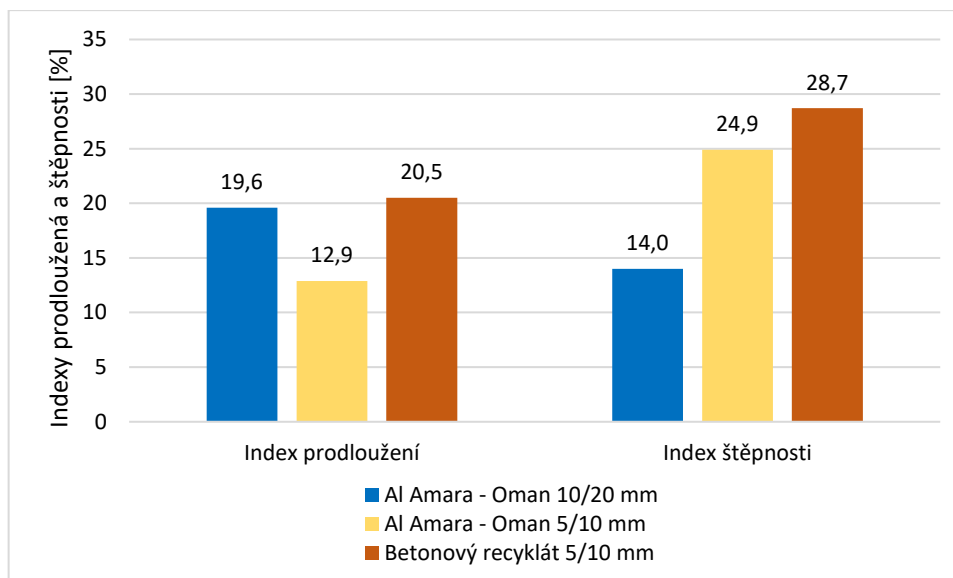
Al Amara – Oman 10/20 mm				
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadržného kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	64,0		0,0	
20.0–14.0	1135,0		195,0	
14.0–10.0	897,0		192,0	
10.0–6.3	51,0		34,0	
Suma	M2	2147,0	M3	421,0
Index prodloužení [%]		19,6		
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadržného kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	64,0		23,0	
20.0–14.0	1135,0		164,0	
14.0–10.0	897,0		113,0	
10.0–6.3	51,0		0,0	
Suma	M2	2147,0	M3	300,0
Index štěpnosti [%]		14,0		

Tabulka č. 31 – Index prodloužení a index štěpnosti přírodního kameniva Al Amara – Oman 5/10 mm

Al Amara – Oman 5/10 mm				
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadrženého kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	0,0		0,0	
20.0–14.0	0,0		0,0	
14.0–10.0	124,0		0,0	
10.0–6.3	643,0		99,0	
Suma	M2	767,0	M3	99,0
Index prodloužení [%]			12,9	
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadrženého kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	0,0		0,0	
20.0–14.0	0,0		0,0	
14.0–10.0	124,0		42,0	
10.0–6.3	643,0		149,0	
Suma	M2	767,0	M3	191,0
Index štěpnosti [%]			24,9	

Tabulka č. 32 – Index prodloužení a index štěpnosti betonového recyklátu 5/10 mm

Betonový recyklát 5/10 mm				
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadrženého kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	0,0		0,0	
20.0–14.0	0,0		0,0	
14.0–10.0	199,0		6,0	
10.0–6.3	406,0		118,0	
Suma	M2	606,0	M3	124,0
Index prodloužení [%]			20,5	
Velikost sít [mm]	Množství testovaného kameniva [g]		Množství zadrženého kameniva [g]	
50.0–37.5	0,0		0,0	
37.5–28.0	0,0		0,0	
28.0–20.0	0,0		0,0	
20.0–14.0	0,0		0,0	
14.0–10.0	199,0		91,0	
10.0–6.3	406,0		83,0	
Suma	M2	606,0	M3	174,0
Index štěpnosti [%]			28,7	



Graf č. 8 – Index prodloužení a index štěpnosti

V grafu č.8 vidíme porovnání indexu prodloužení a indexu štěpnosti na přírodním kamenivu a betonovém recyklátu. Maximální přípustná hodnota pro index prodloužení je 15 % z celkové testované navážky daného kameniva. Tento limit splnilo pouze přírodní kamenivo Al Amara – Oman 5/10, které dosáhlo hodnoty 12,9 %. U indexu štěpnosti je maximální přípustné procento 25 %, které nespůlnil pouze betonový recyklát, který dosáhl hodnoty 28,7 %.

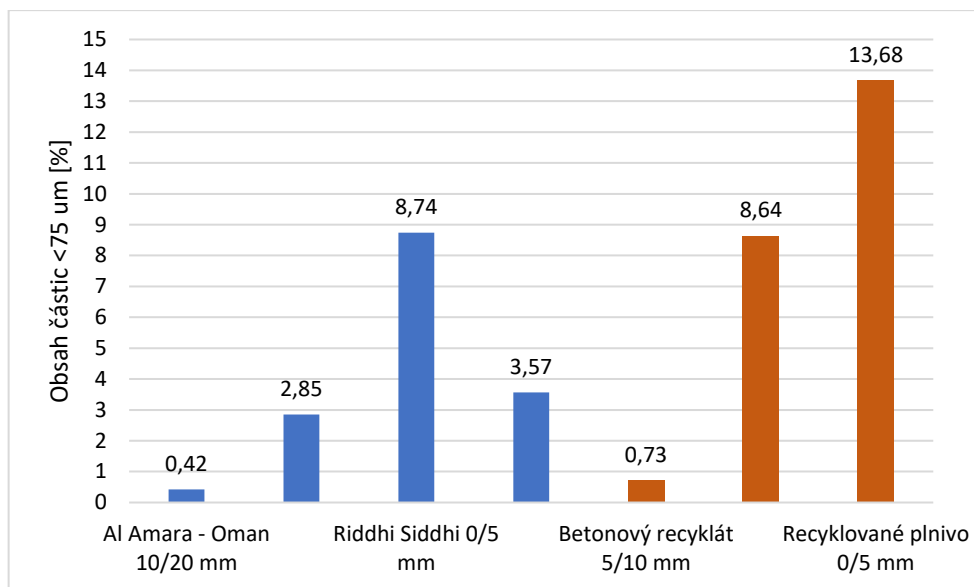
Index prodloužení může být ovlivněn faktem, že se u přírodního kameniva jedná o kamenivo drcené a u betonového recyklátu z důvodu různého tvaru betonového kameniva, které je ovlivněno cementových kamenem nacházejícím se na jejich povrchu. Index štěpnosti u betonového recyklátu je taktěž ovlivněn obsahem cementového kamene.

3.5.4 Obsah částic <75 μm

Obsah částic <75 μm byl stanoven dle ASTM C 117 na přírodních kamenivech Al Amara – Oman 10/20 mm, Al Amara – Oman 5/10, Riddhi Siddhi 0/5 mm, Dune sand 0/0,6 mm a betonovém recyklátu 5/10 mm, 0/5 mm a na recyklovaném plnivu 0/5 mm.

Tabulka č. 33 – Obsah částic <75 μm přírodního a recyklovaného kameniva

Kamenivo	Obsah částic <75 μm [%]
Al Amara – Oman 10/20 mm	0,42
Al Amara – Oman 5/10 mm	2,85
Riddhi Siddhi 0/5 mm	8,74
Dune sand 0/0,6	3,57
Betonový recyklát 5/10 mm	0,73
Betonový recyklát 0/5 mm	8,64
Recyklované plnivo 0/5 mm	13,68



Graf č. 9 - Obsah částic <75 µm přírodního a recyklovaného kameniva

V grafu č. 9 vidíme obsah částic <75 µm u přírodního kameniva a betonového recyklátu. Největšího obsahu těchto částic dosahovalo recyklované plnivo 0/5 mm a to 13,68 %. Tento obsah je způsoben vysokým obsahem prachových částic, obsažených v recyklátu. Nejmenší obsah částic <75 µm obsahovalo přírodní kamenivo Al Amara – Oman 10/20 mm, 0,42 %.

3.6 ETAPA DRUHÁ

Ve druhé etapě této diplomové práce, která vychází z poznatků z předchozí etapy I, se soustředíme na návrh jednotlivých receptur betonových směsí, provádění zkoušek na čerstvém betonu, výrobu zkušebních těles a zkouškám na ztvrdlém betonu.

3.6.1 Návrh receptur

Celkem bylo navrženo sedm receptur betonu, s ohledem na výsledky zkoušek provedených na kamenivu. Dvě receptury označené jako REF C30/20 a REF C40/20, obsahují pouze přírodní kamenivo, taktéž receptura REF C40/20 + DUNE SAND obsahuje přírodní kamenivo, ale je zde obsažen pouštní písek. Dále byly navrženy receptury s náhradou přírodního kameniva recyklovaným kamenivem. Recyklovaným kamenivem bylo nahrazeno pouze přírodní kamenivo frakce 0/5 mm a 5/10 mm. Receptury obsahující recyklát jsou označeny jako REC C30/20 a REC C40/20. Další receptury obsahující recyklát jsou REC C40/20+DUNE SAND a REC C40/20+MICRO. V těchto recepturách je obsažen dunový písek a v poslední receptuře REC C40/20 + MICRO navíc mikrosilika. Značení betonu v SAE se oproti ČR liší tak, že místo označení C30/37, je uvedeno značení C40/20. První číslo udává charakteristickou krychelnou

pevnost betonu v tlaku, stanovenou na krychli a druhé číslo udává velikost maximálního zrna obsaženého ve směsi.

Tabulka č. 34 – Náhrada přírodního kameniva betonovým recyklátem

Receptura	Náhrada hrubého kameniva [%]	Náhrada celkového množství kameniva [%]
REF C30/20	0	0
REC C30/20	100	66
REF C40/20	0	0
REC C40/20	100	65
REF C40/20 DUNE SAND	100	0
REC C40/20 + DUNE SAND	100	45
REC C40/20 + MICRO	100	45

Jednotlivé receptury obsahují různé množství cementu a superplastifikačních přísad. U poslední receptury je obsažena mikrosilika, která má vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu a výsledné vlastnosti ztvrdlého betonu. U posledních tří receptur byl přidán retardér tuhnutí, kvůli dosažení lepší zpracovatelnosti. U receptur byl vodní součinitel v průběhu upraven, kvůli kolísavosti vlhkosti betonových recyklátů. Ve všech recepturách byla použita superplastifikační přísada SikaPlast – 750, její obsah byl navržen podle obsahu jednotlivých kameniv. Všechny navržené receptury jsou uvedeny v tabulce č. 35.

Tabulka 35 – Jednotlivé receptury na 1 m³

RECEPTURA		REF C 30/20	REC C30/20	REF C40/20	REC C40/20	REF C40/20 DUNE SAND	REC C40/20 + DUNE SAND	REC C40/20 + MICRO
NÁZEV	JEDNOTKY							
OPC CEM I 42,5 N, Arkan	[kg/m ³]	290	340	400	380	400	380	360
Dune Sand – Al Ain 0/0,6 mm	[kg/m ³]	380	-	-	-	386,6	388	375
Riddhi Siddhi 0/5 mm	[kg/m ³]	510	-	1098	-	502	-	-
Al Amara – Oman 5/10 mm	[kg/m ³]	370	-	281	-	375	-	-
Al Amara – Oman 10/20 mm	[kg/m ³]	640	627	484	635	586	634	606
Betonový recyklát 0/5 mm	[kg/m ³]	-	857	-	835	-	335	324
Betonový recyklát 5/10 mm	[kg/m ³]	-	373	-	361	-	502	486
Voda	[kg/m ³]	175	156	210,4	152	160	152	175
Mikrosilika	[kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	20
SikaPlast 750	[l/m ³]	4,2	4,92	3,96	4,72	3,36	3,36	4
SikaPlast 1000 ES	[l/m ³]	-	-	-	1,2	-	1,5	2
w/c	[-]	0,60	0,46	0,53	0,40	0,40	0,40	0,49

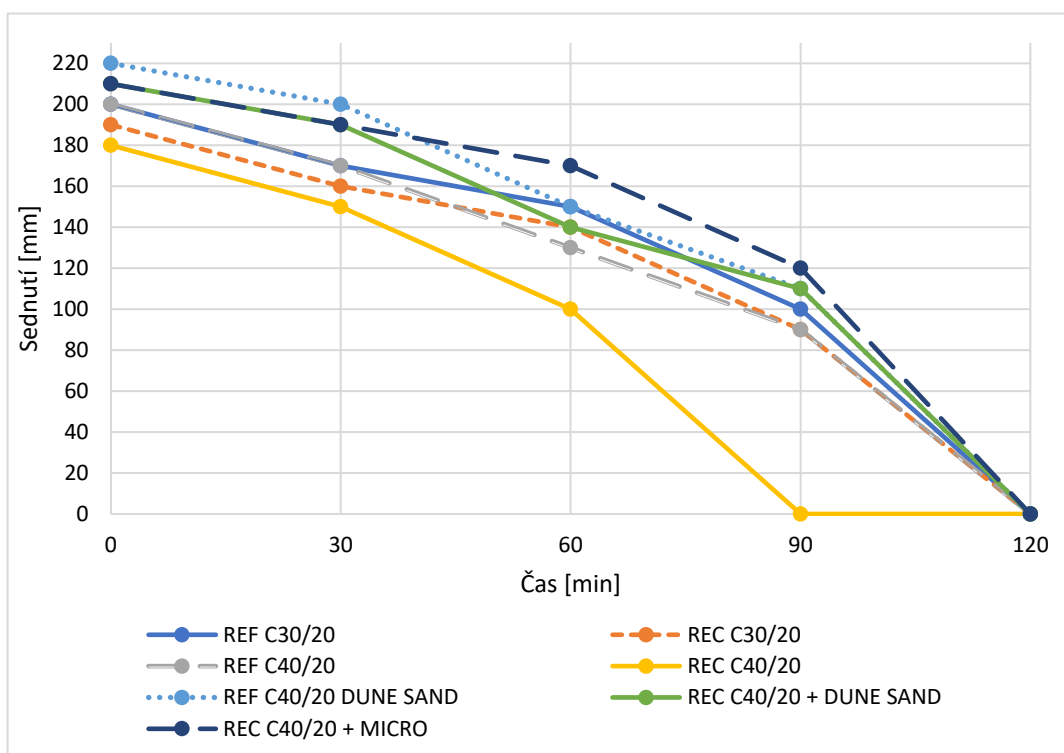
3.6.2 Vyhodnocení zkoušek na čerstvém betonu

3.6.2.1 Stanovení konzistence čerstvého betonu

Stanovení konzistence čerstvého betonu bylo prováděno ihned po zamíchání. Tato zkušební metoda byla použita k měření konzistence v časech 0, 30, 60, 90 a 120 minut od zamíchání. Vzorek byl uchován v míchačce, která byla přikryta plastovým přehozem, aby bylo sníženo odpařování vody ze směsi. Po uplynutí daných časových úseků od smíchání, byl vzorek znovu promíchán v míchačce a následně byla provedena zkouška sednutím. Celkové hodnoty sednutí jsou zaznamenány v tabulce č. 36.

Tabulka č. 36 – Stanovení konzistence čerstvého betonu zkouškou sednutím v čase do 120 minut

RECEPTURA	Hodnota sednutí [mm]					Klasifikace dle BS EN 12350-2
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	
REF C30/20	200	170	150	100	0	S4
REC C30/20	190	160	140	90	0	S4
REF C40/20	200	170	130	90	0	S4
REC C40/20	180	150	100	0	0	S4
REF C40/20 DUNE SAND	220	200	150	110	0	S5
REC C40/20 + DUNE SAND	210	190	140	110	0	S4
REC C40/20 + MICRO	210	190	170	120	0	S4



Graf č. 10 – Hodnoty jednotlivých receptur sednutí v čase do 120 minut

Všechny receptury spadají do kategorie S4, dle BS EN 12350–2. Konzistence v čase je ovlivněna zejména množstvím recyklovaného kameniva, jeho celkovou nasákavostí, ale i vodním

součinitelem. Největší pokles měla receptura REC C40/20, kde byla náhrada přírodního kameniva 65 % kamenivem recyklovaným, které má vyšší obsah jemných částic, tudíž vyšší nasákavost. U receptur REC C40/20 + DUNE SAND a REC C40/20 + MICRO, můžeme pozorovat podobné sednutí. U těchto receptur byla náhrada recyklátem 45 %. Nejvyšší hodnotu sednutí má receptura REF C40/20 DUNE SAND, ve které je obsaženo pouze přírodní kamenivo a není ovlivněno vyšší nasákavostí recyklovaných kameniv. Betonový recyklát má tendenci nasávat do své struktury vodu, což vede k nadměrnému odčerpávání vlhkosti z betonové směsi a následnému zhoršení její konzistence v průběhu času. Vliv na konzistenci betonu měl i postup míchání, který byl pro tyto receptury upraven. Do míchačky bylo nadávkováno kamenivo, které bylo lehce navlhčeno přidávanou vodou, poté byla přidána mikrosilika, která obalila jednotlivá zrna, cement, voda a superplastifikační přísada.

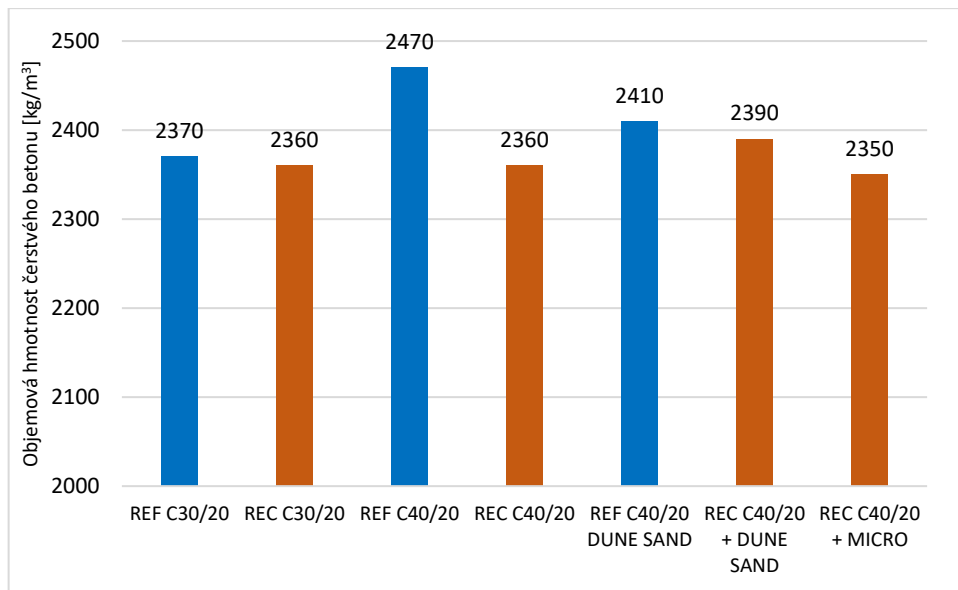
Hodnota sednutí v časových intervalech 90 minut by již nebyla přípustná pro čerpané betony a po 120 minutách byly jednotlivé receptury zcela beze změny sednutí. Důležitým měřítkem je pozorování, jak se receptury chovají v čase do 60 minut, protože při přepravě čerstvých betonů v SAE by autodomíchavače měly být na stavbu dopraveny do 45 minut, aniž by byla ovlivněna jejich konzistence.

3.6.2.2 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Objemová hmotnost byla stanovena na testovaných recepturách jednotlivých betonů. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 37.

Tabulka č. 37 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]

RECEPTURA	Objemová hmotnost $D_{\text{čB}}$ [kg/m ³]
REF C30/20	2370
REC C30/20	2360
REF C40/20	2470
REC C40/20	2360
REF C40/20 DUNE SAND	2410
REC C40/20 + DUNE SAND	2390
REC C40/20 + MICRO	2350



Graf č. 11 – Porovnání objemových hmotností všech receptur čerstvého betonu

Dle výsledků klesá objemová hmotnost čerstvého betonu obsahující betonový recyklát. Betonový recyklát, který byl použit do receptur má oproti přírodnímu kamenivu nižší objemové hmotnosti, s čímž se dalo počítat. Nejvyšší objemovou hmotnost má referenční receptura REF C40/20, 2470 kg/m³ a nejnižší hodnotu má REC C40/20 + MICRO a to 2350 kg/m³. Stejných hodnot dosáhly receptury REC C30/20 a REC C40/20.



Obrázek 17: Vzorky po zjištění objemových hmotností na čerstvém betonu

3.6.3 Vyhodnocení zkoušek na ztvrdlém betonu

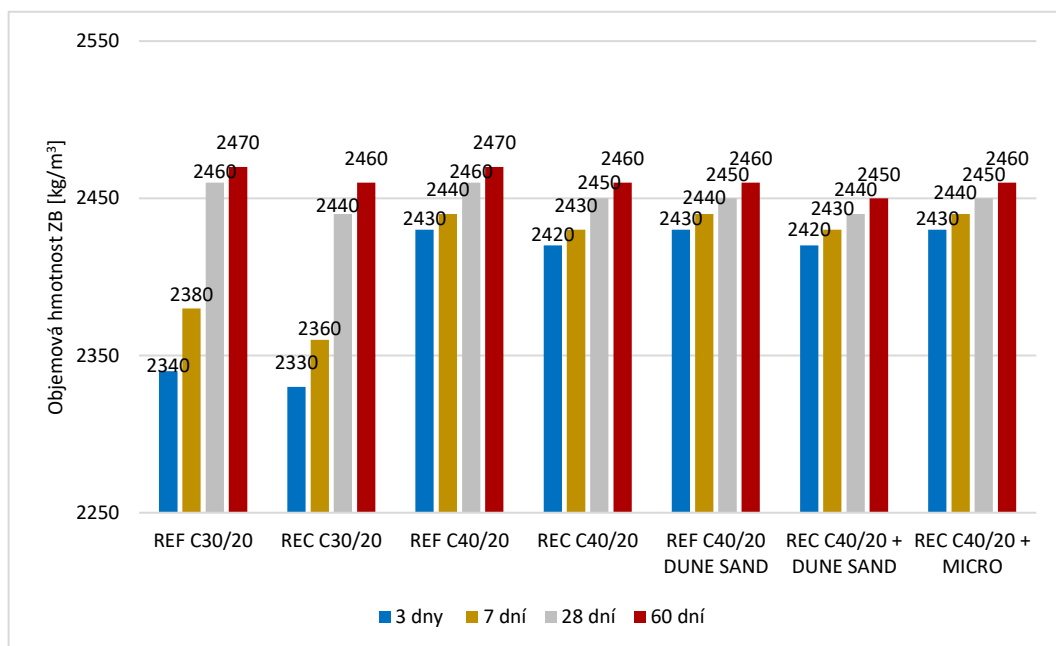
Ze všech receptur byly vytvořeny vzorky, které byly po dobu 24 hodin ponechány ve formách v laboratorním prostředí. Po této době byla testovací tělesa vyjmuta z forem a umístěna do vodního prostředí, kde zrála po dobu 3, 7, 28 a 60 dní. Po uplynutí doby zrání byla tělesa vyjmuta z vody a podrobena zkouškám na ztvrdlém betonu.

3.6.3.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Byla provedena analýza objemové hmotnosti ztvrdlého betonu jak u referenčních, tak recyklovaných betonů v intervalech 3, 7, 28 a 60 dní. Tento proces byl proveden podle normy ČSN EN 12390-7 a zahrnoval měření, vážení a výpočet objemové hmotnosti ve vodním prostředí. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 38.

Tabulka č.38 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]

RECEPTURA	Objemová hmotnost D [kg/m ³]			
	3 dny	7 dní	28 dní	60 dní
REF C30/20	2340	2380	2460	2470
REC C30/20	2330	2360	2440	2460
REF C40/20	2430	2440	2460	2470
REC C40/20	2420	2430	2450	2460
REF C40/20 DUNE SAND	2430	2440	2450	2460
REC C40/20 + DUNE SAND	2420	2430	2440	2450
REC C40/20 + MICRO	2430	2440	2450	2460



Graf č. 12 – Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 3, 7, 28 a 60 dnech

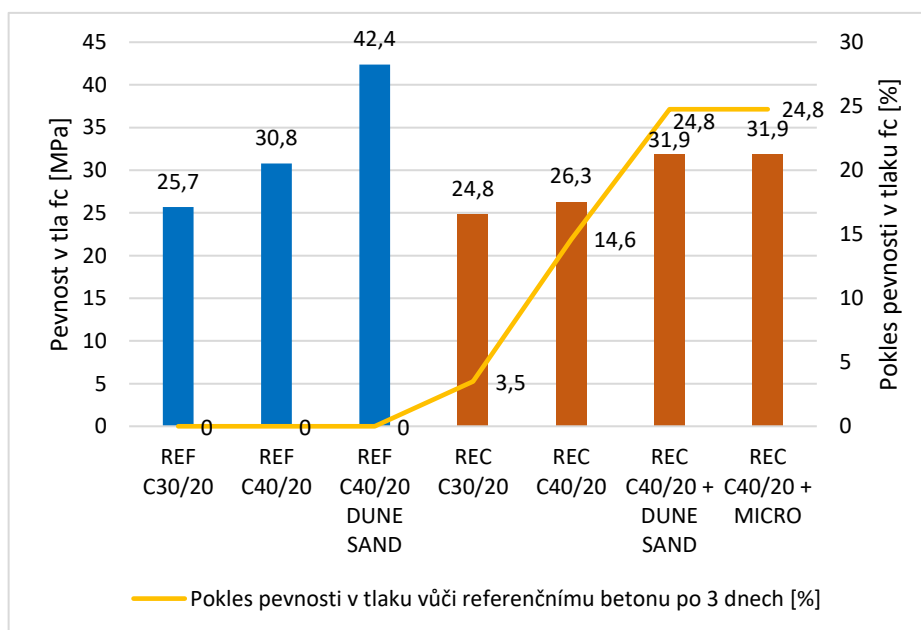
Z tabulky č. 38 a grafu č. 12 vidíme, že se objemové hmotnosti jednotlivých receptur zvyšují v závislosti na čase. Největší nárůst objemových hmotností nastává v počátku mezi 3 a 7 dnem, dále se objemová hmotnost zásadně neliší. U referenčních betonů je celkově vyšší než u receptur obsahujících recyklované kamenivo, právě kvůli jeho objemové hmotnosti. Nejvyšší objemové hmotnosti mají referenční betony a to 2470 kg/m³ po 60 dnech uložení ve vodním prostředí. Potvrzuje se tak vyšší nasákavost betonů s recyklátem.

3.6.3.2 Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Stanovení pevnosti betonu v tlaku bylo u referenčních a recyklovaných betonů bylo provedeno v časových intervalech 3, 7, 28 a 60 dní. Vzorky byly uloženy ve vodním prostředí a následně otestovány. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v jednotlivých tabulkách po časových intervalech.

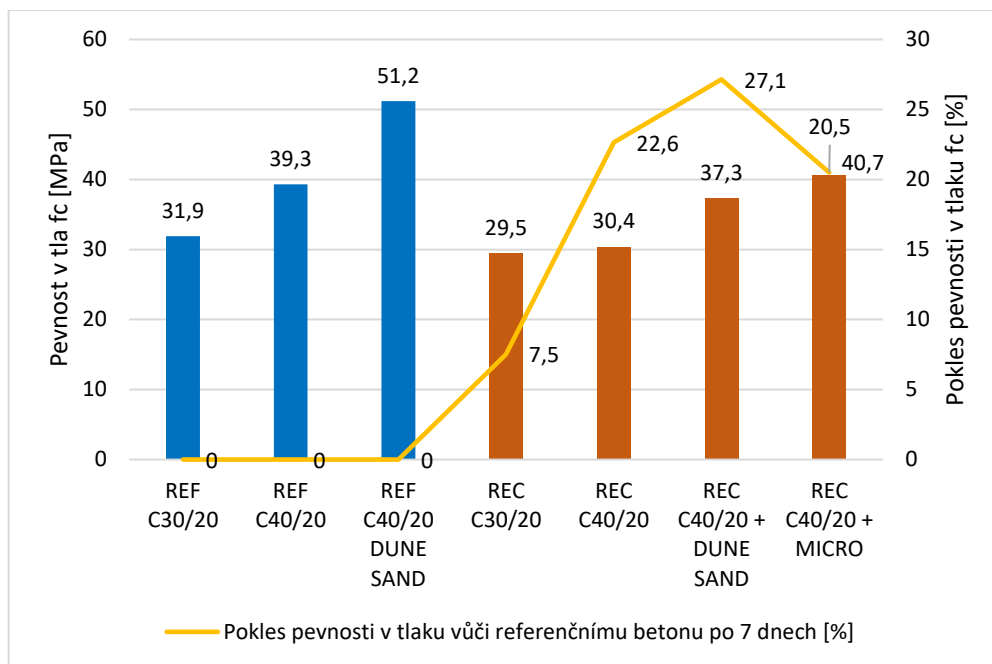
Tabulka č. 39 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]

RECEPTURA	Pevnost v tlaku [MPa]			
	3 dny	7 dní	28 dní	60 dní
REF C30/20	25,7	31,9	38,2	41,3
REF C40/20	30,8	39,3	49,8	58,8
REF C40/20 DUNE SAND	42,4	51,2	57,3	61,8
REC C30/20	24,8	29,5	35,2	37,9
REC C40/20	26,3	30,4	36	38,9
REC C40/20 + DUNE SAND	31,9	37,3	44,4	47,9
REC C40/20 + MICRO	31,9	40,7	49,3	53,3



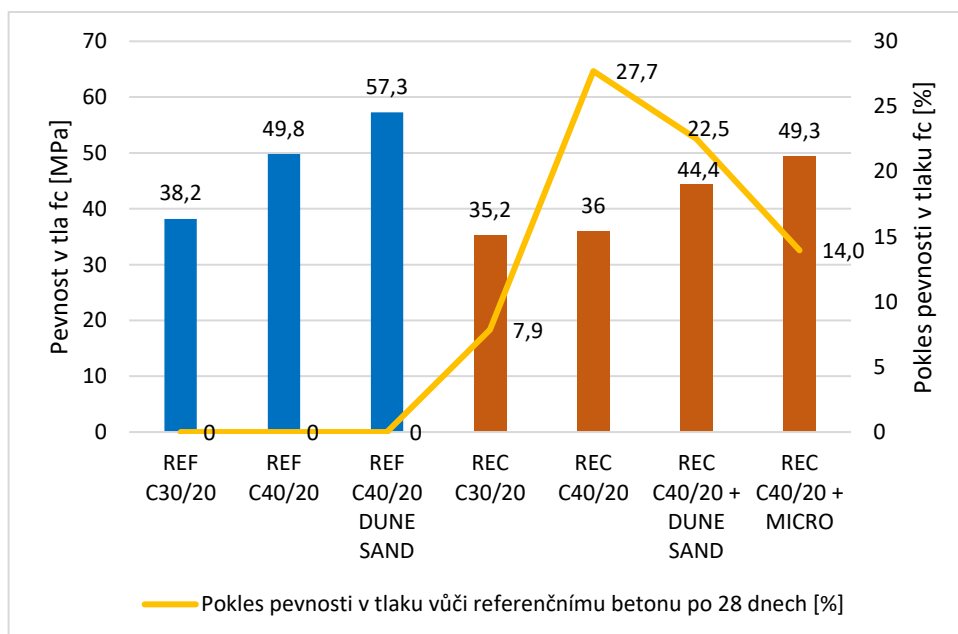
Graf č. 13 – Pevnost betonu v tlaku po 3 dnech

Z grafu č. 13 pozorujeme, že nejvyšších pevností v tlaku po 3 dnech dosahují referenční betony. Na objemové hmotnosti má vliv také vodní součinitel, který byl u každé receptury odlišný. Nejvyšší pevnost v tlaku vykazuje referenční beton REF C40/20 DUNE SAND, kde měl vodní součinitel hodnotu 0,40. Nejnižší pevnost betonu v tlaku měl recyklovaný beton REC 30/20 a to 24,8 MPa. Jeho vodní součinitel činí 0,46. Oproti referenčnímu betonu REF C30/20 se pevnost liší o 3,5 %. Například v porovnání REF C40/20 DUNE SAND a REC C40/20 + DUNE SAND je pokles pevnosti v tlaku rapidnější a to o 31,9 %.



Graf č. 14 - Pevnost betonu v tlaku po 7 dnech

Z grafu č. 14 nejvyšších hodnot dosahují opět referenční betony, jak můžeme vidět, všechny překonaly návrhovou pevnost. Betonové recykláty mají celkově nižší pevnosti v tlaku oproti referenčním betonům. U REC C40/20 + DUNE SAND a REC C40/20 + MICRO, pozorujeme o rozdílný nárůst pevností, který byl v grafu č.13 totožný. U poslední receptury můžeme očekávat rychlejší a vyšší nárůst pevností v tlaku, díky mikrosilice v jeho receptuře.



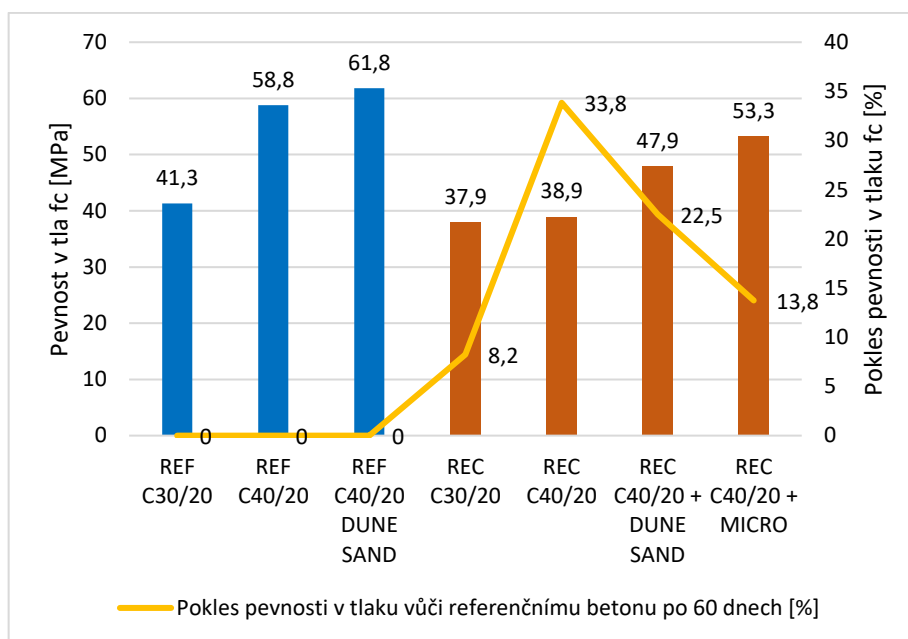
Graf č. 15 – Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech

Z grafu č. 15 pozorujeme, že betony s přírodním kamenivem, tak i betony s recyklovaným kamenivem překonaly návrhovou pevnost. Betony pevnostní třídy C30/20 můžeme zařadit do betonů pevnostní třídy C35/45. Betony pevnostní třídy C40/20, mimo REF C40/20 DUNE SAND můžeme zařadit do běžných betonů dosahujících pevnostní třídy C50/60. Referenční beton REF C40/20 DUNE SAND je zařazen do vysokopevnostních betonů (HSC) třídy C55/67, díky své vysoké pevnosti v tlaku. Vodní součinitel dosahoval hodnot mezi 0,40 až 0,60. Vyšší vodní součinitel je ovlivněn obsahem jemných částic v recyklovaném kamenivu. Avšak v kombinaci se superplastifikační přísadou je tento vliv pozitivně ovlivněn a díky tomu bylo dosaženo konzistence S4. Největší pokles pevnosti v tlaku je u recyklovaného betonu REC C40/20 27,7 %, což je zapříčiněno obsahem recyklovaného kameniva ve struktuře betonu. Pomalejší nárůst pevností může být způsoben přidáním retardéru SikaPlast 1000+ ES, který měl vliv na zpracovatelnost betonové směsi.

Můžeme vidět, že při nahrazení přírodního kameniva recyklovaného kameniva, je možné dosažení velmi podobných pevností jako u referenčních betonů.



Obrázek 18: Vzorky po stanovení pevnosti v tlaku



Graf č. 16 – Pevnost v tlaku po 60 dnech

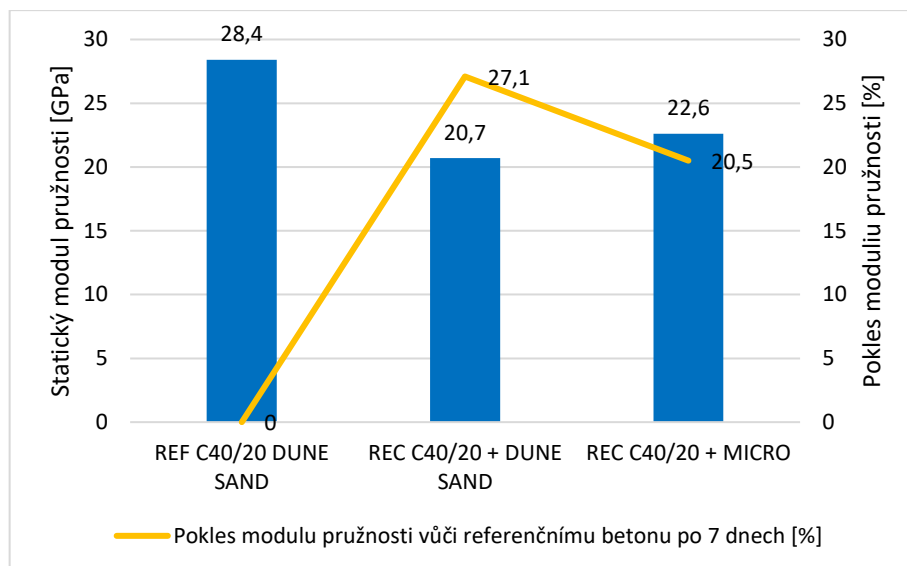
V grafu č. 16 vidíme nárůst pevností po 60 dnech. Lze si povšimnout, že nárůst pevnosti v tlaku u referenčního betonu REF C40/20 vzrostl ještě o zhruba 15 %, kdežto u zbylých receptur byl nárůst pevností v tlaku zvýšen o zhruba 8 %. Rozdíly poklesu pevností klesají, díky recyklovanému kamenivu, které je více nasákové a vyvolává proces samošetřování. Nejvyšší dosaženou pevnost měl referenční beton REF C4/20 DUNE SAND 61,8 MPa, který dosahoval nejvyšších pevností po celou dobu, což bylo způsobeno obsahem cementu a vodním součinitelem, který byl 0,4.

3.6.3.3 Stanovení statického modulu pružnosti

Modul pružnosti byl stanoven jen na třech vzorcích, a to na referenčním betonu REF C40/20 DUNE SAND a recyklovaném betonu REC C40/20 + DUNE SAND a REC C40/20 + MICRO. Modul pružnosti byl stanoven po 7, 28 a 60 dnech. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 40.

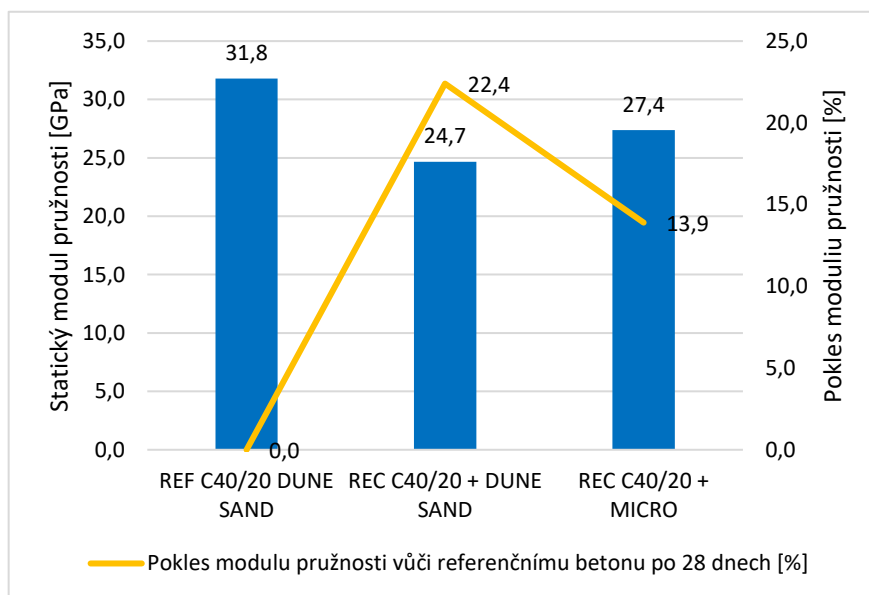
Tabulka č. 40 – Statický modul pružnosti po 7, 28 a 60 dnech

RECEPTURA	Statický modul pružnosti E_c [MPa]		
	7 dní	28 dní	60 dní
REF C40/20 DUNE SAND	28,4	31,8	34,3
REC C40/20 + DUNE SAND	20,7	24,7	26,6
REC C40/20 + MICRO	22,6	27,4	29,6



Graf č. 17 – Statický modul pružnosti v tlaku po 7 dnech

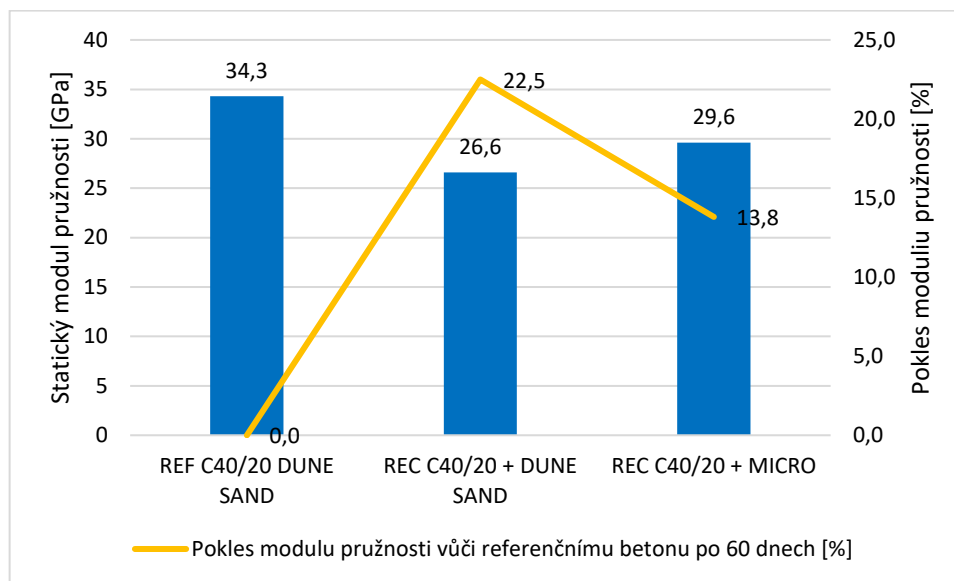
Statický modul pružnosti je po 7 dnech u referenčního betonu roven 28,4 GPa. Recyklované betony mají hodnotu modulu pružnosti téměř totožnou. Recyklovaný beton REC C40/20 + DUNE SAND má hodnotu 20,7 GPa a REC C40/20 + MICRO 22,6 GPa. U recyklovaných betonů lze pozorovat pokles modulu pružnosti oproti referenčnímu betonu. Nejvyšší pokles 27,1 % vykazuje REC C40/20 + DUNE SAND, REC C40/20 + MICRO vykazuje pokles o 20,5 %.



Graf č. 18 - Statický modul pružnosti v tlaku po 28 dnech

Po 28 dnech dosahuje referenční beton hodnoty statického modulu pružnosti 31,8 GPa. Recyklovaný beton REC C40/20 + DUNE SAND má nárůst zhruba o 16 % a REC C40/20 + MICRO

o 17,5 %. Pokles modulu pružnosti oproti referenčnímu betonu je lehce nižší, kvůli závislosti na narůstajícím modulu pružnosti.



Graf č. 19 - Statický modul pružnosti v tlaku po 60 dnech

Statický modul pružnosti se po 60 dnech zrání již výrazně nezměnily, avšak u recyklovaného betonu REC C40/20 + DUNE SAND můžeme vidět vyšší rozdíl oproti REF C40/20 + DUNE SAND. Rozdíl mezi referenčním a recyklovanými betony je způsoben obsahem recyklovaného kameniva v jejich struktuře. Také díky vyšší hydrataci recyklovaných betonů je způsoben vznik C-S-H gelů.

3.7 ETAPA TŘETÍ

Kapitola se věnuje porovnání výsledků této diplomové práce, která se věnovala přírodním i recyklovaným materiálům v SAE a výsledkům diplomové práce, která se zabývala přírodním a recyklovaným betonům v České republice.

3.7.1 Porovnání výsledků SAE vs. ČR

Porovnání diplomových prací bylo zvoleno na základě zjištění rozdílů chování, mezi zahraničními a tuzemskými materiály. Byly vybrány dvě receptury recyklovaných betonů, u kterých se porovnal zkoušky na čerstvém betonu, kterými jsou stanovení konzistence čerstvého betonu a stanovení objemové hmotnosti. Porovnání těchto receptur však nelze provést zcela přesně, kvůli použití materiálů s rozdílnými vlastnostmi, proto byly vybrány receptury, které se nejvíce podobaly obsahem cementu. Dále byly porovnány zkoušky na ztvrdlém betonu, jako stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, stanovení pevnosti v tlaku a statický modul

pružnosti. Vybranými recepturami byly receptura REC C40/20 + MICRO a receptura z druhé práce RECBET 11/22 C30/37. [53]

Tabulka č. 41 – Receptury SAE a ČR [53]

RECEPTURA SAE			RECEPTURA ČR		
NÁZEV	JEDNOTKY	REC C40/20 + MICRO	NÁZEV	JEDNOTKY	RECBET 11/22 C30/28
OPC CEM I 42,5 N, Arkan	[kg/m ³]	360	CEM I 42,5 R Mokrá	[kg/m ³]	356
Dune Sand – Al Ain 0/0,6 mm	[kg/m ³]	375	TK 0/4 mm Žabčice	[kg/m ³]	800
Riddhi Siddhi 0/5 mm	[kg/m ³]	-	DK 8/16 mm Olbramovice	[kg/m ³]	625
Al Amara – Oman 5/10 mm	[kg/m ³]	-	DK 11/22 mm Olbramovice	[kg/m ³]	-
Al Amara – Oman 10/20 mm	[kg/m ³]	606	Betonový recyklát 0/11 mm	[kg/m ³]	-
Betonový recyklát 0/5 mm	[kg/m ³]	324	Betonový recyklát 8/16 mm	[kg/m ³]	-
Betonový recyklát 5/10 mm	[kg/m ³]	486	Betonový recyklát 11/22 mm	[kg/m ³]	301
Voda	[kg/m ³]	175	Voda	[kg/m ³]	138,8
Mikrosilika	[kg/m ³]	20	STACHEMENT S 35 (0,9 % z mc)	[l/m ³]	3,2
SikaPlast 750	[l/m ³]	4			
SikaPlast 1000 ES	[l/m ³]	2	w/c	[-]	0,39
w/c	[-]	0,49			

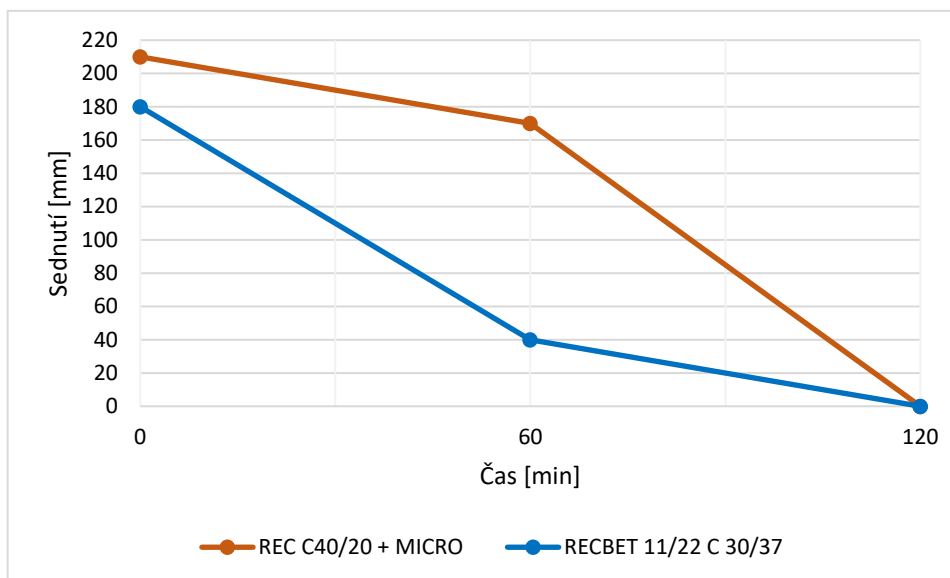
3.7.2 Porovnání zkoušek čerstvého betonu

3.7.2.1 Stanovení konzistence čerstvého betonu

Porovnání konzistence čerstvého betonu bylo na časových intervalech 0, 60 a 120 minut od zamíchání. Byly vynechány časy 30 a 90 minut od zamíchání, jelikož se tyto intervaly ve druhé diplomové práci netestovaly. Celkové hodnoty sednutí jsou zaznamenány v tabulce č. 42.

Tabulka č.42 – Stanovení konzistence betonu zkouškou sednutí v čase do 120 min, SAE vs. ČR [53]

RECEPTURA	Hodnota sednutí [mm]			Klasifikace dle ČS EN 206+A2
	0 min	60 min	120 min	
REC C40/20 + MICRO	210	170	0	S4
RECBET 11/22 C 30/37	180	40	0	S4



Graf č. 20 – Vývoj hodnot sednutí v čase do 120 minut, SAE vs. ČR

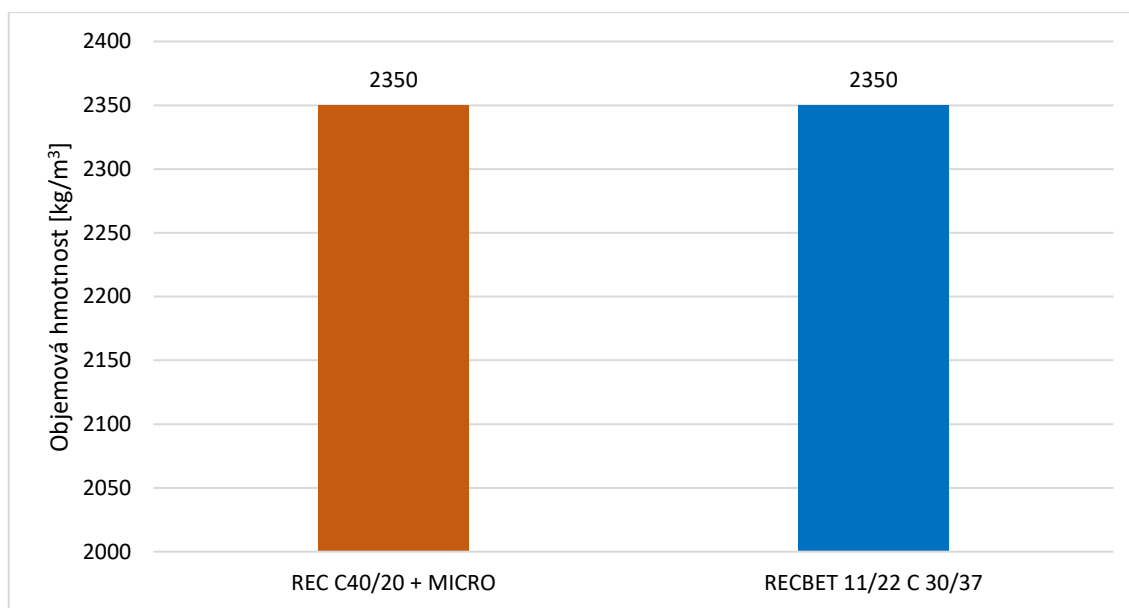
Z grafu č. 20 vidíme, že stanovení konzistence čerstvého betonu je u každé receptury jiné. Počáteční sednutí u zahraniční receptury REC C40/20 + MICRO dosahovalo hodnoty 210 mm, receptura RECBET 11/22 C 30/37 měla počáteční hodnotu 180 mm. Po uplynutí 60 minut, pozorujeme velmi rozdílnou hodnotu sednutí, což může být ovlivněno obsahem plastifikační přísady, mikrosiliky a obsahem jednotlivých frakcí kameniva, náhrada kameniva recyklátem zde činila 45 %. U české receptury může mít vliv na sednutí množství přidaného recyklátu, který obsahoval pouhých 17 %. Pro přesnější porovnání stanovení konzistence sednutí, by bylo vhodné, aby byly testovány častější intervaly, například již po 30 minutách, které se v této práci testovaly. Hodnota sednutí po 30 minutách činila u receptury REC C40/20 + MICRO 190 mm. Dle požadavků v SAE je nutné dodání beton na stavbu do 45 až 60 minut, kvůli teplotnímu prostředí tudíž delší časy sednutí již nejsou relevantní. [53]

3.7.2.2 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Objemové hmotnosti čerstvého betonu byly porovnány v grafu č.21.

Tabulka č. 43 – Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu [kg/m³], SAE vs. ČR [53]

RECEPTURA	Objemová hmotnost $D_{\text{čB}}$ [kg/m ³]
REC C40/20 + MICRO	2350
RECBET 11/22 C 30/37	2350



Graf č. 21 – Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu, SAE vs. ČR

Objemová hmotnost čerstvého betonu dosahuje u obou receptur stejných hodnot 2350 kg/m³. Vlastnosti recyklovaných betonů jsou ovlivněny recyklovaným kamenivem, které celkově snižuje objemové hmotnosti recyklátů oproti referenčním betonům, obsahujícím přírodní kamenivo. [53]

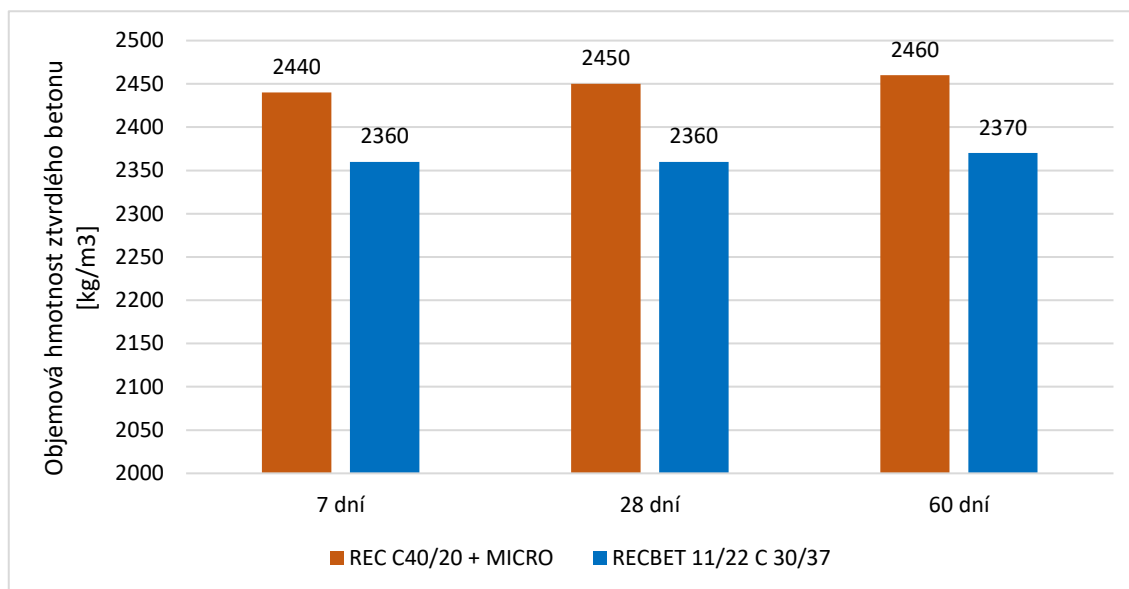
3.7.3 Porovnání zkoušek ztvrdlého betonu

3.7.3.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Objemové hmotnosti ztvrdlého betonu byly porovnány v grafu č. 22. Porovnávaly se objemové hmotnosti po 7, 28 a 60 dnech. Objemové hmotnosti po 3 dnech, které byly zkoušeny v této diplomové práci byly vynechány.

Tabulka č. 44 – Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu [kg/m³], SAE vs. ČR [53]

RECEPTURA	Objemová hmotnost D [kg/m ³]		
	7 dní	28 dní	60 dní
REC C40/20 + MICRO	2440	2450	2460
RECBET 11/22 C 30/37	2360	2360	2370



Graf č. 22 - Porovnání objemových hmotností ztvrdlého betonu po 7, 28 a 60 dnech, SAE vs. ČR

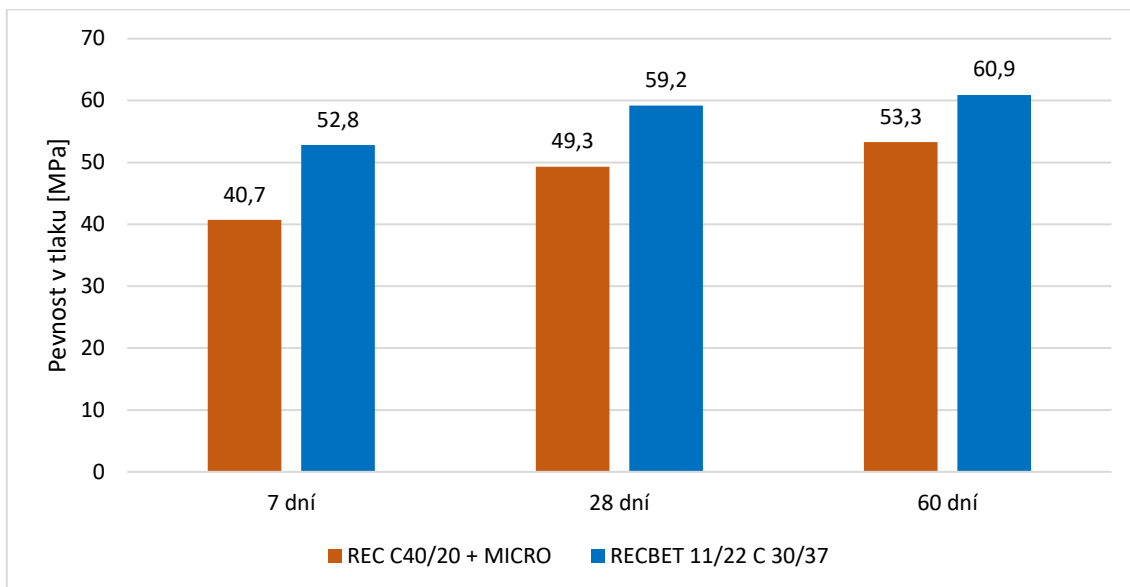
Objemové hmotnosti ztvrdlých betonů jsou porovnány v grafu č. 22. Jak můžeme vidět receptura z této diplomové práce REC C40/20 + MICRO dosahuje celkově vyšších hodnot ztvrdlého betonu, oproti české receptuře. Vyšších objemových hmotností je dosaženo z důvodu rozdílných vlastností agregátů používaných v zahraničí, které mají vyšší objemové hmotnosti díky obsahu jemných částic v recyklovaném kamenivu ze SAE.

3.7.3.2 Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu

Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu obou receptur je uvedena v tabulce č. 45 a porovnávána v grafu č. 23. Porovnány byly pevnosti po 7, 28 a 60 dnech. Pevnosti v tlaku po 3 dnech byly vynechány.

Tabulka č. 45 – Stanovení pevnosti v tlaku [MPa], SAE vs. ČR [53]

RECEPTURA	Pevnost v tlaku [MPa]		
	7 dní	28 dní	60 dní
REC C40/20 + MICRO	40,7	49,3	53,3
RECBET 11/22 C 30/37	52,8	59,2	60,9



Graf č. 23 – Porovnání pevností betonu v tlaku [MPa], SAE vs. ČR

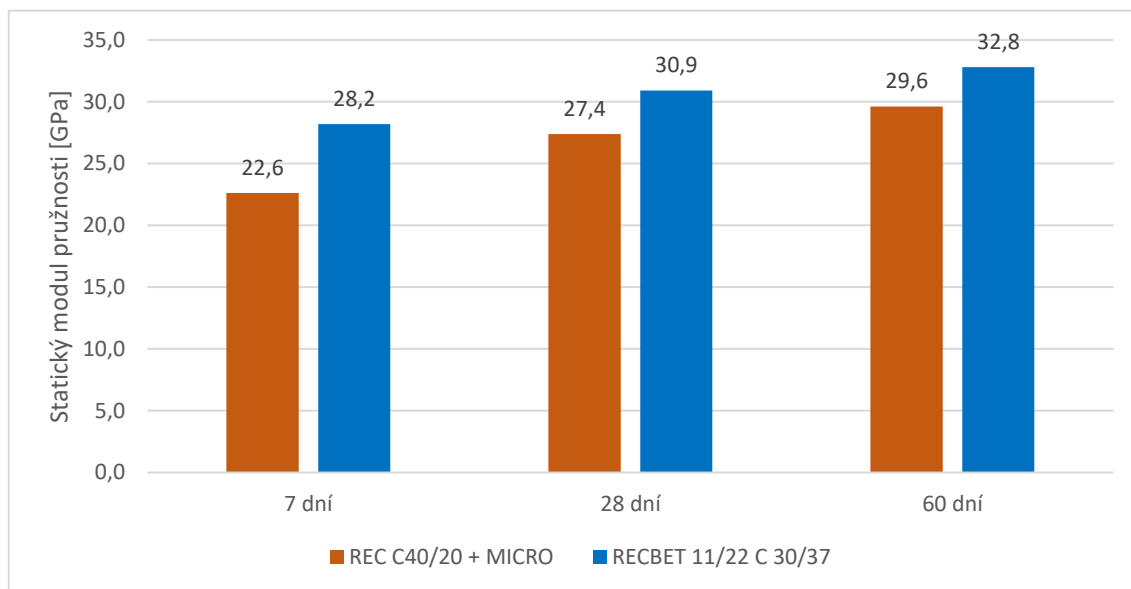
V grafu č. 23 jsou porovnány pevnosti v tlaku ztvrdlých betonů po 7, 28 a 60 dnech. Celkově měly vzorky RECBET 11/22 C30/37 vyšší pevnosti v tlaku, což řadí tuto recepturu mezi vysokopevnostní betony. Rozdíl pevností je způsoben procentuálním nahrazením přírodního kameniva.

3.7.3.3 Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti byl porovnán po 7, 28 a 60 dnech. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 46.

Tabulka č.46 – Stanovení pevnosti v tlaku [MPa], SAE vs. ČR [53]

RECEPTURA	Statický modul pružnosti [MPa]		
	7 dní	28 dní	60 dní
REC C40/20 + MICRO	22,6	27,4	29,6
RECBET 11/22 C 30/37	28,2	30,9	32,8



Graf č. 24 – Porovnání statického modulu pružnosti po 7, 28 a 60 dnech

Z grafu č. 24 pozorujeme, že receptura z porovnávané diplomové práce RECBET 11/27 C30/37 dosahuje vyšších statických modulů pružnosti než receptura REC C40/20 + MICRO, což bylo očekáváno již dle výsledků pevností v tlaku.

3.8 ETAPA ČTVRTÁ

Čtvrtá etapa se zabývá ekonomickými důsledky, konkrétně stanovením ceny za 1 m³ betonu. Zásadním faktorem je druh a objem použitého kameniva. Ceny jsou převzaty od výrobců jednotlivých surovin podle ceníků platných v roce 2023. Betonový recyklát byl dodán firmou Alas Emirates Ready Mix, která nabízela betonový recyklát frakcí 0/5 mm a 5/10 mm. Jednotlivé ceny byly poskytnuty taktéž firmou, ve které byl celý experiment prováděn. Ceny jednotlivých receptur byly vypočteny ve měně používané v SAE, kde se platí Dirhamem [AED] a následně byly přepočteny na Českou korunu [Kč].

Betonový recyklát byl vyráběn přímo ve firmě, tudíž náklady na jeho dopravu nebylo nutné počítat. Náklady na výrobu betonového recyklátu frakce 0/5 a 0/10 mm vychází zhruba

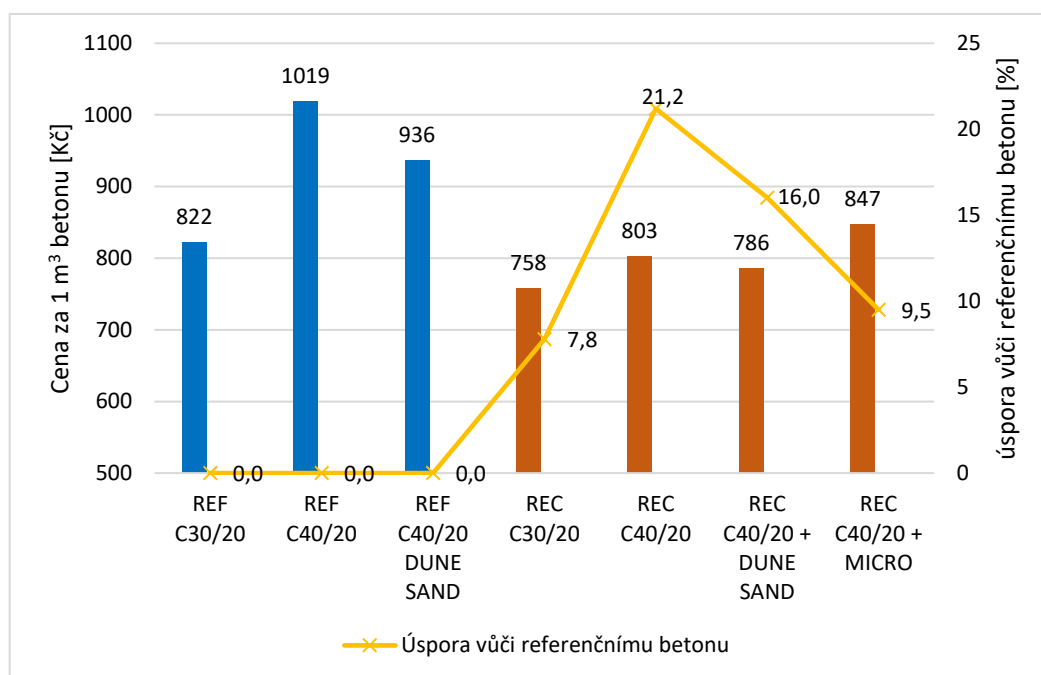
na 12 AED, což je v přepočtu 74 Kč/t. Ceny za recyklované kamenivo frakce 0/5 mm a 5/10 mm činí 134 Kč/t. Cena za dopravu pro přírodní kamenivo se liší v závislosti na vzdálenosti, odkud je kamenivo dováženo, avšak průměrná cena za náklady zahrnující dopravu a jiné úřední dokumenty se pohybuje kolem 250 Kč/t, tato cena se však neuvažuje. Cena přírodního jemného kameniva Dune Sand činí zhruba 79 Kč/t, pro hrubé přírodní kamenivo Riddhi Sisshi 0/5 mm je cena 287 Kč/t, Al Amara – Oman 5/10 mm činí 293 Kč/t a pro Al Amara – Oman 5/10 mm je cena 299 Kč/t. Cena vody používaná ve stavebnictví je v dané oblasti zhruba 6 Kč/m³. Cena mikrosiliky je velmi vysoká a pro výpočet se uvažuje 4880 Kč/t, pro plastifikační přísadu – SikaPlast 750 je cena 27,5 Kč/l a pro retardér SikaPlast 1000 ES je 7,6 Kč/l. Pro plastifikační přísadu a retardér nebylo možné dohledání ceny na webových stránkách, tudíž cenu poskytla laboratoř, která je odebírá. Veškeré uvedené ceny jsou uvedeny bez DPH, které se v SAE neplatí. Všechny uvedené ceny jsou přehledně sumarizovány v tabulce č. 47. V tabulce č. 48 jsou vypočteny ceny za jednotlivé receptury referenčních i recyklovaných betonů.

Tabulka č.47 – Cena jednotlivých surovin

SUROVINA	MJ	Cena v SAE	MJ	Cena přepočtena na Kč bez DPH
OPC CEM I 42,5 N, Arkan	[AED/t]	195	[Kč/t]	1190
Dune Sand – Al Ain 0/0,6 mm	[AED /t]	13	[Kč/t]	79
Riddhi Siddhi 0/5 mm	[AED /t]	47	[Kč/t]	287
Al Amara – Oman 5/10 mm	[AED /t]	48	[Kč/t]	293
Al Amara – Oman 10/20 mm	[AED /t]	49	[Kč/t]	299
Betonový recyklát 0/5 mm	[AED /t]	22	[Kč/t]	134
Betonový recyklát 5/10 mm	[AED /t]	22	[Kč/t]	134
Voda	[AED /m ³]	1	[Kč/m ³]	6,1
Mikrosilika	[AED /t]	800	[Kč/t]	4880
SikaPlast 750	[AED /l]	4,5	[Kč/l]	27,5
SikaPlast 1000 ES	[AED /l]	1,25	[Kč/l]	7,6

Tabulka č.48 – Cena pro jednotlivé receptury

RECEPTURA	Cena [Aed]	Cena bez DPH [Kč/m ³]
REF C30/20	135	822
REF C40/20	167	1019
REF C40/20 DUNE SAND	154	936
REC C30/20	124	758
REC C40/20	132	803
REC C40/20 + DUNE SAND	129	786
REC C40/20 + MICRO	139	847



Graf č. 25 – Ceny jednotlivých receptur za 1 m³ s porovnáním cenové úspory oproti referenčním betonům

Z grafu č. 25 pozorujeme, že ceny recyklovaných betonů na 1 m³ jsou levnější oproti referenčním betonům. Na cenu má zásadní vliv cena cementu, která je oproti České republice výrazně levnější. Důvodem vysoké ceny je zavedení tzv. Green Dealu v Evropě, dále cenu ovlivňují přírodní kameniva, která jsou zhruba 2x dražší než recyklované kamenivo. U recyklovaného betonu tuto cenu navíc ovlivňuje přidaná mikrosilika přidaná v receptuře REC C40/20 + MICRO. Cena cementu v SAE je oproti České republice zatím mnohem levnější.

Nejdražším betonem je referenční beton REF C40/20 s cenou 1019 Kč/m³, při porovnání s recyklovaným betonem REC C40/20, který vyšel na 803 Kč/m³. Náhrada přírodního kameniva zde činila 65 % a tento beton je o 21,2 % úspornější oproti referenčnímu. Jako druhý nejdražší beton vychází referenční REF C40/20 DUNE SAND s cenou 936 Kč/m³. Tato receptura byla

porovnána s dvěma dalšími a to, REC C40/20 + DUNE SAND, kde náhrada přírodního kameniva činila 45 %, úspora oproti referenčnímu betonu vychází na 16 %. Recyklovaný beton REC C40/20 + MICRO vyšel jako nejdražší ze všech recyklovaných betonů, a to za cenu 847 Kč/m³. Důvodem je obsah mikrosiliky, která je nejdražší surovinou, ze všech zmíněných. Náhrada recyklovaným kamenivem zde byla 45 % a úspora oproti referenčnímu betonu vychází o pouhých 9,5 %.

Poslední porovnávanou pevnostní třídou jsou betony C30/20 a to REF C30/20 a REC C30/20, kde byla náhrada recyklátem 66 %, celková úspora zde činí 7,8 %.

4. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se věnovala stanovení klíčových technologických vlastností betonových recyklátů, zejména recyklovanému kamenivu, dle standardů v SAE a ČR. V teoretické části byla zpracována rešerše, která se zabývala problematikou z oblasti betonových recyklátů, jejich přípravy a výroby. Byly popsány legislativní požadavky jak pro SAE, Českou republiku i svět. Dále byly popsány vlivy recyklovaného kameniva na čerstvý a zatvrdlý beton.

Využívání recyklovaného kameniva se jeví jako dobrá volba pro splnění cíle udržitelnosti ve stavebnictví, jelikož dostupnost přírodního kameniva bude s postupem času klesat a je možné, že dojde k vyčerpání všech zásob přírodního kameniva. Produkce demoličního a stavebního odpadu tvoří v SAE až 75 % z celkové produkce veškerých odpadů, a tak je nutné, aby byl tento problém včas podchycen. Kritickým faktorem je třídění těchto demoličních odpadů, které zahrnují beton, ocel a betonové bloky. Tyto materiály jsou ve většině případů skladovány na speciálních skládkách, které jsou pro ně určeny. Využití recyklovaného kameniva je ekonomičtější než využívání přírodního kameniva, ale hlavní obavou při použití recyklátů jsou jeho nižší mechanické vlastnosti, jako je např. vysoká nasákavost, kterou způsobuje cementový kámen obsažený na povrchu původního kameniva. Přítomnost cementového kamene je v největším množství obsažena u jemnějších frakcí recyklovaného kameniva, díky čemuž dochází k vyšší nasákavosti, pórovitosti a nižší objemové hmotnosti recyklovaného kameniva. Nasákavost se u recyklovaného kameniva pohybuje okolo 3-9 %, v drobné frakci tato hodnota dosahuje až 13 %, pórovitost dosahuje hodnot mezi 11–15 %. Tyto vlastnosti se následně projevují při návrhu receptur recyklovaných betonů a je nutné s nimi dopředu uvažovat. Předcházení negativním vlastnostem způsobeným vysokým obsahem cementového kamene lze dosáhnout například aplikací kyselinového namáčení, zahříváním nebo optimalizací procesů drcení a mletí recyklovaného kameniva.

Experimentální část byla rozdělena do čtyř fází. První fáze spočívala v ověření základních fyzikálně–mechanických vlastností přírodních i recyklovaných kameniv. Na základě těchto poznatků se druhá etapa věnovala vytvoření receptur pevnostních tříd dle norem v SAE C30/20 a C40/20 pro referenční a recyklované betony s částečnou, či úplnou náhradou přírodních kameniv betonovým recyklátem. Značení betonu v SAE se oproti ČR odlišuje, kde místo označení C30/37, je uvedeno značení C40/20. První číslo udává charakteristickou krychelnou pevnost

betonu v tlaku, stanovenou na krychli a druhé číslo udává velikost maximálního zrna obsaženého ve směsi. Po vytvoření těchto receptur byly zkoušeny jejich vlastnosti, na čerstvém a zatvrdlém betonu v tamních klimatických podmínkách. Třetí etapa se věnovala porovnání dosažených výsledků s diplomovou prací z České republiky, která se taktéž zabývala používáním betonových recyklátů. V závěrečné fázi byla vypracována ekonomická rozvaha, během níž byla stanovena cena betonu na 1 m³.

Celkem bylo navrženo a namícháno 7 receptur. Dvě receptury pevnostní třídy C30/20 „REF C30/20“ a „REC C30/20“, dvě receptury pro pevnostní třídu C40/20 bez obsahu dunového písku „REF C40/20“ a „REC C40/20“. Poslední receptury byly též třídy C40/20, ale s obsahem dunového písku „REF C40/20 DUNE SAND“, „REC C40/20 + DUNE SAND“ a „REC C40/20 + MICRO“, kde byla do receptury přidána mikrosilika.

Na základě první etapy lze říci, že jemné recyklované kamenivo obsahuje 13,3 % jemných částic, což je o 5,5 % více, než u přírodního dunového písku „Dune Sand“, taktéž recyklované kamenivo 0/5 mm obsahuje 11,1 %, což je o 4,1 % více jemných částic oproti přírodnímu kamenivu Riddhi Siddhi 0/5 mm. Naopak u recyklovaného kameniva frakce 5/10 je obsah jemných částic pouhých 0,4 %, oproti přírodnímu kamenivu Al Amara 5/10 mm, které obsahuje 2,9 %. Křivka zrnitosti ukazuje, že recyklované kamenivo obsahuje větší podíl jemných částic než přírodní kamenivo. Tento fakt ovlivňuje nasákavost betonových recyklátů, která u frakce 0/5 mm dosahuje 6,33 % a u 5/10 dosahuje 1,8 %. Přírodní kameniva mají nasákavost mezi 0,9 – 2,2 %. Objemová hmotnost recyklovaného kameniva frakce 0,5 mm byla 2520 kg/m³, 5/10 mm 2660 kg/m³, u přírodních kameniv byly hodnoty mezi 2650–2750 kg/m³. Index prodloužení a štěpnosti, který nahrazuje tvarový index byl zkoušen pouze u recyklátu 5/10 mm, kde dosáhl hodnoty 20,5 % a 28,7 %. U přírodních kameniv Al Amara – Oman frakce 5/10 a 10/20 mm dosahoval index prodloužení hodnoty 12,9 % a 24,9 % a index štěpnosti 19,6 % a 14,0 %. V poslední řadě byl zkoušen obsah částic <75 μm, který byl nejvyšší u recyklovaného jemného kameniva (plniva) 0/5 mm 13,68 %, u recyklátů hrubé frakce 0/5 mm byla tato hodnota 8,64 % a u frakce 5/10 mm pouhých 0,73 %. Vysoký obsah je způsoben obsahem prachových částic v recyklovaném kamenivu nižších frakcí. Přírodní kamenivo dosahovalo hodnot mezi 0,4 – 8,8 %.

Na základě druhé etapy lze konstatovat, že stanovení konzistence sednutí, klesá v závislosti na čase a je ovlivněno celkovou nasákavostí recyklovaného kameniva. Dále je ovlivněna vodním součinitelem, který je u recyklovaných betonů vyšší než u referenčních betonů. Hodnota sednutí po 90 minutách u navržených receptur již nebyla přípustná pro tamní požadavky, kdy má být

docíleno transportování betonu na stavbu do 45–60 minut. Objemová hmotnost čerstvého betonu se snižuje s použitím betonového recyklátu. Objemová hmotnost se u zatvrdlého betonu zvyšuje s postupem času, ale dosahuje celkově nižších hodnot než referenční betony. Objemová hmotnost recyklovaných betonů dosahuje hodnot mezi 2420–2460 kg/m³. Stanovení pevnosti betonu v tlaku je ovlivněno množstvím přidaného cementu, recyklovaného kameniva a vodním součinitelem. Celkově jsou pevnosti betonu v tlaku nižší než u referenčních betonů, ale neliší se nijak markantně. Nižších pevností je dosaženo kvůli vyšší nasákavosti recyklovaného betonu. Statický modul pružnosti u recyklovaných betonů dosahuje taktéž nižších pevností, které jsou ovlivněny stejným způsobem jako pevnost v tlaku.

Třetí etapa porovnávala výsledné hodnoty recyklovaného betonu „REC C40/20 + MICRO“ a „RECBET 11/22 C 30/37“, který byl testován v jiné diplomové práci. Zkoušky byly hodnoceny na základě českých standardů. Byly vybrány dvě podobné receptury, které obě obsahovaly zhruba 360 kg/m³ cementu. Konzistence čerstvého betonu u obou receptur klesá v závislosti na čase, ale u porovnávané receptury dosahuje vyšších poklesů. Rozdíl je způsoben zejména obsahem recyklovaného kameniva, které je u porovnávané receptury 17 % a u této 45 %. Objemová hmotnost čerstvého betonu dosáhla stejných hodnot 2350 kg/m³. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla vyšší u receptury „REC C40/20 + MICRO“, která byla porovnána v této diplomové práci. Vyšší objemové hmotnosti je dosaženo díky rozdílným vlastnostem zahraničních agregátů. Stanovení pevnosti v tlaku dosáhlo vyšších hodnot v porovnávané práci, což bylo způsobeno procentuálním nahrazením přírodního kameniva, které bylo v receptuře výrazně nižší. Stejně je to u statického modulu pružnosti. Z výsledků je nutno konstatovat, že není možné zcela přesné porovnání, kvůli zahraničním materiálům, které jsou oproti českým rozdílné.

V poslední čtvrté etapě bylo zjištěno, že použití recyklovaného kameniva snižuje cenu betonu na 1 m³, oproti betonům obsahujícím pouze přírodní kamenivo. Při nahrazení přírodního kameniva recyklátem je možné ušetřit od 7,8 % až do 22 % z celkové ceny betonu.

V poslední řadě je nutno poznamenat, že všechny navržené receptury recyklovaných betonů splnily požadovanou pevnostní třídu C30/20 a C40/20. Pokud by betony byly porovnány podle českých standardů, odpovídaly by pevnostní třídě běžných betonů C35/45 a C55/67. Recyklované betony pevnostní třídy C35/45 jsou vhodné pro použití spíše do spodních, svrchních částí vozovek nebo pro odlehčené výplňové konstrukce. Avšak navržené recyklované betony

třídy C40/20 odpovídající třídě C55/67, jsou vhodné pro konstrukční betony, jako je podkladový beton, základové konstrukce, pozemní stavby konstrukce dopravních a inženýrských staveb.

5. SEZNAM ZDROJŮ

- [1] ŠKOPÁN, M. Metodická příručka pro podporu využívání a recyklaci stavebních odpadů. Brno, ARSM – Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, 1999. 32 s.
- [2] ČESKO. Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 13. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [3] Stavební a demoliční odpady. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady
- [4] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2020. Český statistický úřad [online]. Praha: Český statistický úřad, 2021, 30.11.2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2020>
- [5] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Česko v roce 2022 vyprodukovalo 39 mil. tun odpadů. Online. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/cesko-v-roce-2022-vyprodukovalo-39-mil-tun-odpadu>. [cit. 2023-12-28].
- [6] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Produkce, využití a odstranění odpadů - 2021. Online. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-mgyqmwjyr8>. [cit. 2023-12-28].
- [7] [ŠKOPÁN, Miroslav. Recyklace stavebních a demoličních odpadů ve světle nových právních předpisů. Zprávy a informace ČKAIT [online]. 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <http://zpravy.ckait.cz/vydani/2022-01/recyklace-stavebnich-a-demolicnich-odpadu-ve-svetle-nove-legislativy/>
- [8] RIENESSL, Patrik Rienessl. Technologie recyklace stavebního a demoličního odpadu. Bakalářská práce. ČVUT Praha: ČVUT, Katedra technologie staveb, 2018.
- [9] ŠKOPÁN, Miroslav. Časopis stavebnictví. Online. <https://www.casopisstavebnictvi.cz>. 2018. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-recyklace-stavebnich-materialu-a-jejich-dalsi-vyuziti.html>. [cit. 2023-12-29].
- [10] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTĚZ a Petr TRÁVNÍČEK. *TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ I* [online]. 1. Brno, 2015 [cit. 2022-12-13]. ISBN 978-80-7509-207-6. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty/files/23/23-technika_pro_zpracovani_odpadu_1_junga_a.pdf
- [11] MAWED, Mahmoud; AL NUAIMI, Mohamed Samir a KASHAWNI, Ghanim. CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE MANAGEMENT IN THE UAE: APPLICATION AND OBSTACLES. Online. *International Journal of GEOMATE*. 2020, s. 235-245. ISSN

- 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan. Dostupné z: <https://doi.org/10.21660/2020.70.45101>. [cit. 2023-12-29].
- [12] Recyklované kamenivo. Online. 2018. Dostupné z: <http://www.recyklujmestavby.cz/category/vyrobky/stavebni-vyrobky-obsahujici-druhotne-suroviny-pouzitelne-v-pozemnich-stavbach/recyklovane-kamenivo/>. [cit. 2023-12-29].
- [13] HLAVSA, Zdeněk; COUFAL, Robert a VÍTEK, Jan L. POUŽITÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU. Online. MATERIÁLY A TECHNOLOGIE MATERIALS AND TECHNOLOGY. 1/2022n. l., s. 46-49. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2021-1-46.pdf>. [cit. 2023-12-29].
- [14] VESELÝ, Vladimír. SOUČASNOST A PERSPEKTIVY POUŽITÍ RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU – POZNÁMKY A KOMENTÁŘE Z POHLEDU LEGISLATIVY. Online. MATERIÁLY A TECHNOLOGIE. 1/2021n. l., roč. 2021, s. 38-40. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2021-1-38.pdf>. [cit. 2023-12-30].
- [15] PAVLŮ a kol., KATALOG VÝROBKŮ A MATERIÁLŮ S OBSAHEM DRUHOTNÝCH SUROVIN PRO POUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ. Online. 2018, roč. 1, č. 1. Praha: Česká agentura pro standardizaci, s.p.o. ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR, 2018. Dostupné z: <http://www.recyklujmestavby.cz/wp-content/uploads/2019/10/Recyklujme-stavby-katalog-3.08.pdf>. [cit. 2023-12-30].
- [16] ČSN EN 12620+A1: Kamenivo do betonu”
- [17] ČSN EN 206+A2 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [18] ČSN P 73 2404: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace
- [19] SALGADO, Fernanda de Andrade a SILVA, Flavio de Andrade. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. Online. Journal of Building Engineering. 2022, roč. 2022, č. 104452, s. 1-20. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>. [cit. 2023-12-30].
- [20] GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. a CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. Online. Materiales de Construcción. 2016, roč. 2016, č. 66, s. 1-18. ISSN 0465-2746. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/mc.2016.06415>. [cit. 2023-12-30].

- [21] KIM, Jeonghyun. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. Online. Science Direct. 2022, roč. 2022, č. vol.328, s. 1. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>. [cit. 2023-12-30].
- [22] GUO, Hui; SHI, Caijun; GUAN, Xuemao; ZHU, Jianping; DING, Yahong et al. Durability of recycled aggregate concrete - A review. Online. Science Direct. 2018, roč. 2018, č. vol.89, s. 251-259. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>. [cit. 2023-12-31].
- [23] Alkalicko-křemičitá reakce – ASR. Online. EBeton. Svaz výrobců betonu ČR, 2021 Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/alkalicko-kremicita-reakce-asr/>. [cit. 2023-12-31].
- [24] COLLEPARDI, Mario a Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, s. 323-330. ISBN 978-80-87093-75-7
- [25] HUDA, Sumaiya Binte. Mechanical and durability properties of recycled and repeated recycled coarse aggregate concrete. Online. UBC. Roč. 2014, č. 1, s. 1-137. Dostupné z: <https://doi.org/10.14288/1.0074326>. [cit. 2023-12-31].
- [26] KIM, Jeonghyun. Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design. Online. Construction and Building Materials. 2021, roč. 2021, č. 301, s. 1-12. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124091>. [cit. 2024-01-01].
- [27] SALGADO, Fernanda de Andrade a SILVA, Flávio de Andrade. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. Online. Journal of Building Engineering. 2022, roč. 2022, č. 52, s. 1-20. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>. [cit. 2024-01-02].
- [28] PORTLANDSKÝ CEMENT. Online. 2023, roč. 2023. Dostupné z: <https://www.beton.cz/o-nas/slovník-pojmu/portlandsky-cement.html>. [cit. 2024-01-02].
- [29] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu. Online. 2011, roč. 2011, s. 1-19. Dostupné

- z: https://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_prip_rava_HSC_a_UHSC.pdf. [cit. 2024-01-02].
- [30] Samozhutnitelný beton SCC. Online. In: . Dostupné z: <https://www.transbeton.cz/produkty-a-sluzby/cerstve-transportbetony/samozhutnitelny-beton-scc>. [cit. 2024-01-02].
- [31] ŠČUČKA, Jiří a MARTINEC, Petr. Stavební hmoty 1. Online. 1. 2013. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/podklady_vyuka/hmotyII/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf. [cit. 2024-01-02].
- [32] ČESKOMORAVSKÝ BETON. Transportbetony. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/beton-a-produkty/transportbetony.html>. [cit. 2024-01-02].
- [33] QUALITY CONTROL TEST PLAN – BIN FADEL READY MIX. Microsoft Excel. 2020.
- [34] European standards. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.en-standard.eu/bs-standards/>. [cit. 2024-01-03].
- [35] BFRM – Bin Fadel Ready Mix. Online. 2022. Dostupné z: <https://binfadel.ae/>. [cit. 2024-01-03].
- [36] Standard Specification for Concrete Aggregates. Online. 2023. 2023. Dostupné z: https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18. [cit. 2024-01-03].
- [37] AL MARTINI, Samer; SABOUNI, Reem; KHARTABIL, Ahmad; WAKJIRA, Tadesse G. a ALAM, M. Shahria. Development and strength prediction of sustainable concrete having binary and ternary cementitious blends and incorporating recycled aggregates from demolished UAE buildings: Experimental and machine learning-based studies. Online. Construction and Building Materials. 2023, roč. 2023, č. vol.380, s. 1-15. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131278>. [cit. 2024-01-03].
- [38] HELA, R. TECHNOLOGIE BETONU II: Studijní opora VUT Brno, Modul M01. Fakulta stavební v Brně, 2006.
- [39] SOUCHE, Jean-Claude; DEVILLERS, Philippe; SALGUES, Marie a DIAZ, Eric Garcia. Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete. Online. Cement and Concrete Composites. 2017, roč. 2017, č. vol.83, s. 394-404. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.002>. [cit. 2024-01-03].

- [40] LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T. a DHIR, R.K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Online. 2000, roč. 2000, č. 33, s. 574-580. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02480538>. [cit. 2024-01-03].
- [41] THOMAS, Job; THAICKAVIL, Nassif Nazeer a WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. Online. 2018, roč.
- [42] ASTM D4791 – Standard Test Method For Flat Particles, Elongation Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.
- [43] BS 812:1990 P105 S105.2 – Zkoušení a testování pro specifické vlastnosti stavebních materiálů – Index štěpnosti
- [44] BRITISH STANDARD. BS EN 12350-6 – Testing fresh concrete
- [45] BRITISH STANDARD. BS EN 12350-2 – Testing fresh concrete – Part 2: Slump test
- [46] ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
- [47] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [48] ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [49] SikaPlast - 750. Online. Sika GCC. I. Dostupné z: https://gcc.sika.com/dam/dms/gcc/7/sikaplast_-750.pdf. [cit. 2024-01-06].
- [50] SikaPlast - 1000 ES. Online. Sika India. I. Dostupné z: https://ind.sika.com/dam/dms/in01/y/sikaplast_-1000_es.pdf. [cit. 2024-01-06].
- [51] BRITISH STANDARD. BS 812-103.1:1985, Testing aggregates. Method for determination of particle size distribution - Sieve tests. 1985.
- [52] ASTM C127. ASTM C127-88, Standard test method for density, relative density (Specific Gravity), and absorption of coarse aggregate. 2001
- [53] VORÁČ, Jiří. Studium možností využití hrubých kameniv z betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

6. SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 – Podmínky složení a použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu podle norem [13]

Tabulka č. 2 – Podmínky složení a použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu podle norem [16]

Tabulka č. 3 – Kategorie pro vliv vodou rozpustných látek z recyklovaného kameniva na dobu tuhnutí cementové kaše [16]

Tabulka č. 4 – Minimální četnost zkoušek recyklovaného kameniva [15]

Tabulka č. 5 – Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva dle ČSN EN 12620+A1 [16]

Tabulka č. 6 – Vysvětlivky k tabulce č. 5 podle EN 933-11 [16]

Tabulka č. 7 – Maximální procentuální nahrazení hrubého kameniva recyklovaným kamenivem [16]

Tabulka č. 8 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [16]

Tabulka č. 9 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [18]

Tabulka č. 10 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 [18]

Tabulka č. 11 – Požadavky na recyklované kamenivo ve světě [19]

Tabulka č. 12 – Zkoušky a podmínky pro testování jemného a hrubého kameniva [33]

Tabulka č. 13 – Vliv různých parametrů na karbonataci recyklovaného betonu [22]

Tabulka č. 14 – Vliv různých parametrů na mrazuvzdornost recyklovaného betonu [22]

Tabulka č. 15 – Fyzikální a mechanické vlastnosti CEM I 42,5 N – Arkan, Al Ain

Tabulka č. 16 – Chemické vlastnosti CEM I 42,5 N – Arkan, Al Ain

Tabulka č. 17 – Vlastnosti SikaPlast – 750 [49]

Tabulka č. 18 – Vlastnosti SikaPlast – 1000 ES [50]

Tabulka č. 19 – Velikost používaných sít pro síťový rozbor [51]

Tabulka č. 20 – Minimální hmotnost vzorků pro síťový rozbor [51]

Tabulka č. 21 – Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm) [42]

Tabulka č. 22 – Normální velikost otvoru (čtvercová díra v perforované desce o průměru 450 mm nebo 300 mm) [43]

Tabulka č. 23 – Klasifikace konzistence sednutí kužele dle ČSN EN 206+A2 [17]

Tabulka č. 24 – Síťový rozbor Dune sand Al Ain

Tabulka č. 25 – Síťový rozbor DK Riddhi Siddhi 0/5 mm a betonového recyklátu 0/5 mm

Tabulka č. 26 – Síťový rozbor DK Al Amara 5/10 mm a betonového recyklátu 5/10 mm

Tabulka č. 27 – Sítový rozbor DK Al Amara 10/20 mm

Tabulka č. 28 – Obsah jemných částic v souboru kameniva

Tabulka č. 29 – Objemová hmotnost a nasákavost zrn kameniva

Tabulka č. 30 – Index prodloužení a index štěpnosti přírodního kameniva Al Amara – Oman 10/20 mm

Tabulka č. 31 – Index prodloužení a index štěpnosti přírodního kameniva Al Amara – Oman 5/10 mm

Tabulka č. 32 – Index prodloužení a index štěpnosti betonového recyklátu 5/10 mm

Tabulka č. 33 – Obsah částic <75 μm přírodního a recyklovaného kameniva maximálního zrna obsaženého ve směsi.

Tabulka č. 34 – Náhrada přírodního kameniva betonovým recyklátem

Tabulka č. 35 – Jednotlivé receptury na 1 m

Tabulka č. 36 – Stanovení konzistence čerstvého betonu zkouškou sednutím v čase do 120 minut

Tabulka č. 37 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]

Tabulka č. 38 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]

Tabulka č. 39 – Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]

Tabulka č. 40 – Statický modul pružnosti po 7, 28 a 60 dnech

Tabulka č. 41 – Receptury SAE a ČR [53]

Tabulka č. 42 – Stanovení konzistence betonu zkouškou sednutí v čase do 120 min, SAE vs. ČR [53]

Tabulka č. 43 – Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu [kg/m^3], SAE vs. ČR [53]

Tabulka č. 44 – Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu [kg/m^3], SAE vs. ČR [53]

Tabulka č. 45 – Stanovení pevnosti v tlaku [MPa], SAE vs. ČR [53]

Tabulka č. 46 – Stanovení pevnosti v tlaku [MPa], SAE vs. ČR [53]

7. SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 – Křivka zrnitosti Dune sand Al Ain a recyklované plnivo	60
Graf č. 2 -Křivky zrnitosti DK Riddhi Siddhi 0/5 mm a betonového recyklátu 0/5 mm	61
Graf č. 3 - Křivky zrnitosti DK Al Amara 5/10 mm a betonového recyklátu 5/10 mm	62
Graf č. 4 - Křivka zrnitosti DK Al Amara 10/20 mm	63
Graf č. 5 – Obsah jemných částic v souboru kameniva.....	63
Graf č. 6 – Porovnání objemových hmotností zrn kameniva	65
Graf č. 7 – Nasákavost zrn kameniva po 24 hodinách	65
Graf č. 8 – Index prodloužení a index štěpnosti.....	68
Graf č. 9 - Obsah částic <75 µm přírodního a recyklovaného kameniva.....	69
Graf č. 10 – Hodnoty jednotlivých receptur sednutí v čase do 120 minut	72
Graf č. 11 – Porovnání objemových hmotností všech receptur čerstvého betonu	74
Graf č. 12 – Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 3, 7, 28 a 60 dnech.....	75
Graf č. 13 – Pevnost betonu v tlaku po 3 dnech	76
Graf č. 14 - Pevnost betonu v tlaku po 7 dnech	77
Graf č. 15 – Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech	77
Graf č. 16 – Pevnost v tlaku po 60 dnech.....	79
Graf č. 17 – Statický modul pružnosti v tlaku po 7 dnech.....	80
Graf č. 18 - Statický modul pružnosti v tlaku po 28 dnech	80
Graf č. 19 - Statický modul pružnosti v tlaku po 60 dnech	81
Graf č. 20 – Vývoj hodnot sednutí v čase do 120 minut, SAE vs. ČR.....	83
Graf č. 21 – Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu, SAE vs. ČR	84
Graf č. 22 - Porovnání objemových hmotností ztvrdlého betonu po 7, 28 a 60 dnech, SAE vs. ČR	85
Graf č. 23 – Porovnání pevností betonu v tlaku [MPa], SAE vs. ČR	86
Graf č. 24 – Porovnání statického modulu pružnosti po 7, 28 a 60 dnech	87

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Nakládání s odpady v roce 2021 (ČSÚ) [6].....	13
Obrázek 2: Schéma recyklace sestupného typu [8]	14
Obrázek 3: Schéma recyklace vzestupného typu [8]	14
Obrázek 4: Příklad technologické návaznosti typického zařízení pro recyklaci SDO [10].....	16
Obrázek 5: Schéma technologického procesu linky pro recyklaci SDO	17
Obrázek 6: Koncepce čtyř R [11]	18
Obrázek 7: Druhy kameniva v závislosti na lepené maltě [21]	29
Obrázek 8: Proces vývoje recyklovaného betonu vyrobeného opakovanou recyklací [25]	31
Obrázek 9: Experimentální schéma pro zjištění obsahu cementového kamene v betonových recyklátech [26].....	33
Obrázek 10: Rozdíl mezi běžným /i) a dvoufázovým mícháním (ii) [27]	34
Obrázek 11: Tranzitní zóna mezi recyklovaným kamenivem a novou cementovou matricí [20]	40
Obrázek 12: Závislost pevnosti v tlaku na množství recyklovaného kameniva a vodním součiniteli [25].....	41
Obrázek 13: Závislost pevnosti v tlaku na náhradě přírodního kameniva betonovým recyklátem [25]	41
Obrázek 14: Závislost nasákavosti recyklovaného betonu (vlevo) a závislost kapilární nasákavosti recyklovaného betonu (vpravo) na množství hrubého kameniva [22]	43
Obrázek 15: vlevo Dune Sand, Al Ain – Municipality, vpravo Riddhi Siddhi – Limestone 0/5 mm	49
Obrázek 16: vlevo Al Amara 5/10 mm, vpravo Al Amara 10/20 mm.....	49
Obrázek 17: Vzorky po zjištění objemových hmotností na čerstvém betonu	74
Obrázek 18: Vzorky po stanovení pevnosti v tlaku	78

