

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití betonového recyklátu v cementem stmelěných podkladních vrstvách
pozemních komunikací

Bc. Jakub Fořt

Diplomová práce

2017

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Fořt**
Osobní číslo: **D15361**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Využití betonového recyklátu v cementem stmelených
podkladních vrstvách pozemních komunikací**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Vypracování řešerše stávající míry poznání vlastností a použití betonového recyklátu v ČR a zahraničí.

Dále provedení analýzy získaných informací včetně následného použití takto získaných údajů. Realizování vlastního měření na zkušebních vzorcích s cílem verifikování nebo zpřesnění dostupných metod či postupů a sestavení doporučení pro jejich další používání.

Výstupy:

- 1) Úvod
- 2) Analýzy současného stavu poznání
- 3) Vlastní měření na zkušebních vzorcích
- 4) Vyhodnocení měření
- 5) Doporučení pro další použití
- 6) Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSN 73 6124-1 Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivky - Část 1: Provádění a kontrola shody

ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivky - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Lopour, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce:

30. listopadu 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

20. ledna 2017

Ing. Michaela Ledvinová, Ph.D.
proděkanka pověřená řízením fakulty

L.S.

doc. Ing. Vladimír Dolžek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. listopadu 2016

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Trojovicích dne 20. 1. 2017

Bc. Jakub Fořt

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Lopourovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a poskytnuté materiály, které mi pomohly při tvorbě diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ústavu stavebního zkušebnictví s.r.o., sídlem Pardubice, za zapůjčené laboratorní pomůcky a zvláště jejímu zaměstnanci panu Jiřímu Kudrnovi za cenné rady a poskytnuté materiály, firmě CEMEX Czech Republic s.r.o. – Cementárna, sídlem Prachovice, za poskytnutí portlandského struskového cementu pro tvorbu experimentální části a firmě Pneuservis GÁBA, sídlem Čankovice, za poskytnutí použitých vzdušnic pneumatik z automobilů.

V neposlední řadě také děkuji své rodině za podporu během studia.

V Trojovicích dne 20. 1. 2017

Bc. Jakub Fořt

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá využitím betonového recyklátu v cementem stmelených podkladních vrstvách pozemních komunikací. V teoretické části jsou popsány poznatky o podkladních vrstvách pozemních komunikací a recyklovaných materiálech se zaměřením na betonový recyklát. Dále pak zahraničními zkušenostmi se zpracováním betonového recyklátu. V experimentální části jsou popsány zkoušky betonového recyklátu a kameniva včetně výroby zkušebních těles a na nich provedených zkoušek, které jsou vyhodnoceny. V závěru jsou shrnuty a porovnány vyhodnocené výsledky experimentálních zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Betonový recyklát; podkladní vrstva pozemní komunikace; stmelená směs cementem; pevnost v prostém tlaku

TITLE

The use of recycled concrete in a cement-bound sub-base layers of roads

ANNOTATION

Master thesis deals with the use of recycled concrete in a cement-bound sub-base layers of roads. In the theoretical part describes the findings of underlayer of roads and recycled materials with the focus on recycled concrete. Furthermore, foreign experience with the processing of recycled concrete. In the experimental part describes tests of recycled concrete and aggregates including the production of test specimens and tests carried out on them, which are evaluated. In conclusion there are summarized and compared evaluation results of the experiments.

KEYWORDS

Recycled concrete; underlayer of road; cemented mixture by cement; unconfined compressive strength

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Užití směsí stmelených hydraulickými pojivy ve vozovce	21
Tabulka 2 – Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva	24
Tabulka 3 - Doporučené užití recyklovaných materiálů podle zastoupeného základního materiálu	25
Tabulka 4 - Souhrn vybraných požadavků na vlastnosti recyklovaného kameniva v jednotlivých státech	39
Tabulka 5 – Návrh složení receptury SC 0/22; C _{8/10} ; ČSN 73 6124-1	42
Tabulka 6 – Počty vytvořených zkušebních těles všech tří směsí	47
Tabulka 7 – Výsledné počty vytvořených zkušebních těles všech tří směsí	48
Tabulka 8 – Obor zrnitosti pro směsi z kameniva stmelené cementem typ 1	51
Tabulka 9 - Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva	53
Tabulka 10 – Hmotnost nejméně 1 000 částic	53
Tabulka 11 – Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva	55
Tabulka 12 – Kategorie pro maximální hodnoty tvarového indexu	58
Tabulka 13 – Kategorie pro maximální hodnoty odolnosti proti zmrazování a rozmrazování	61
Tabulka 14 – Rozměry moždířů	62
Tabulka 15 – Hlavní požadavky na pěchy	62
Tabulka 16 – Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování	65
Tabulka 17 – Součinitelé odolnosti	70
Tabulka 18 – Stanovení vlhkosti použitých materiálů	71
Tabulka 19 – Sítový rozbor betonového recyklátu REC 1, frakce 8/32	72
Tabulka 20 - Sítový rozbor betonového recyklátu REC 2, frakce 8/32	73
Tabulka 21 – Klasifikace složek betonového recyklátu REC 1	75
Tabulka 22 – Klasifikace složek betonového recyklátu REC 2	76
Tabulka 23 – Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REF	77
Tabulka 24 - Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REC 1	78
Tabulka 25 – Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REC 2	79
Tabulka 26 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REF	80
Tabulka 27 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REC 1	81
Tabulka 28 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REC 2	82
Tabulka 29 – Výsledky zkoušky odolnosti kameniva proti působení zmrazování a rozmrazování – REF	83

Tabulka 30 - <i>Výsledky zkoušky odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC1</i>	84
Tabulka 31 - <i>Výsledky zkoušky odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC 2</i>	85
Tabulka 32 – <i>Proctorova zkouška směsi REF</i>	86
Tabulka 33 – <i>Proctorova zkouška směsi REC 1</i>	87
Tabulka 34 – <i>Proctorova zkouška směsi REC 2</i>	88
Tabulka 35 – <i>Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem REF</i>	90
Tabulka 36 – <i>Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem REC 1</i>	91
Tabulka 37 – <i>Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem REC 2</i>	92
Tabulka 38 – <i>Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REF</i>	93
Tabulka 39 – <i>Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REC 1</i>	94
Tabulka 40 – <i>Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REC 2</i>	95
Tabulka 41 – <i>Zkouška odolnosti směsí stmelených cementem proti mrazu a vodě</i>	96
Tabulka 42 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REF ve stáří 28 dní</i>	97
Tabulka 43 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 1 ve stáří 28 dní</i>	98
Tabulka 44 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 2 ve stáří 28 dní</i>	99
Tabulka 45 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REF po zkoušce odolnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě</i>	100
Tabulka 46 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 1 po zkoušce odolnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě</i>	101
Tabulka 47 – <i>Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 2 po zkoušce odolnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě</i>	102
Tabulka 48 – <i>Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REF</i>	103
Tabulka 49 – <i>Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REC 1</i>	104

Tabulka 50 – <i>Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REC 2</i>	105
Tabulka 51 – <i>Porovnání cen drceného kameniva a recyklovaných materiálů</i>	107
Tabulka 52 – <i>Klasifikace fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonových recyklátů</i>	111
Tabulka 53 – <i>Výsledky zkoušek stmelěných směsí cementem na zkušebních tělesech</i>	113

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Vrstvy v konstrukci vozovky.....	18
Obrázek 2 – Blokové schéma výroby recyklátů	27
Obrázek 3 – Řez čelistovým drtičem	28
Obrázek 4 – Čelistový drtič v činnosti – betonový recyklát frakce 0/80	29
Obrázek 5 – Řez kuželovým drtičem	29
Obrázek 6 – Řez odrazovým drtičem	30
Obrázek 7 – Betonový recyklát frakce 0/16	32
Obrázek 8 – Betonový recyklát frakce 16/32	33
Obrázek 9 – Betonový recyklát frakce 32/80	33
Obrázek 10 – Frakce 8/16 a 16/22 použitých betonových recyklátů; REC (vlevo), REC (vpravo)	41
Obrázek 11 – Vyrobenaá stmelená směs cementem	42
Obrázek 12 – Michačka MSH 70	44
Obrázek 13 – Široké Proctorovy moždíře	44
Obrázek 14 – Hutnící pěkch (B)	45
Obrázek 15 – Ruční hutnění stmelené směsi cementem pomocí hutnícího pěkchu (B)	45
Obrázek 16 – Vyrobenaá zkušební tělesa ve formách zakrytá igelitovými sáčky	46
Obrázek 17 – Zabalená zkušební tělesa ve folii během zrání (vlevo), vyhotovené zkušební těleso při odformování (vpravo)	47
Obrázek 18 – Laboratorní sušárna Venticell 111	49
Obrázek 19 – Prosévací přístroj s připravenými sítý	50
Obrázek 20 - Automatický hutnící stroj Controls pro Proctorovu zkoušku.....	63
Obrázek 21 – Zkušební lis Matest s řídicí jednotkou Servotronic	66
Obrázek 22 – Tavící kotlík CONTROLS pro koncování sirnou maltou (vlevo), podstavec s držákem válcového zkušebního tělesa (vpravo)	67
Obrázek 23 – Automatické cyklovací zařízení KD 20.3.....	68
Obrázek 24 – Chemoprénové lepidlo, vzdušnice pneumatiky, odlamovací nůž	69
Obrázek 25 – Zachycená zrna betonového recyklátu na sítě velikosti 8 mm	72
Obrázek 26 – Křivky zrnitosti použitých betonových recyklátů REC 1 a REC 2 frakcí 0/22 ...	74
Obrázek 27 – Zkouška nasákavosti, betonový recyklát REC 1 (vlevo), betonový recyklát REC 2 (vpravo)	80
Obrázek 28 – Zkušební navážka frakce 16/22 drceného kameniva s posuvným měřítkem.....	81

Obrázek 29 – Kubická zrna (vlevo), nekubická zrna (vpravo).....	82
Obrázek 30 – Zkušební vzorky při zkoušce odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC 1 (vlevo), REF (uprostřed), REC 2 (vpravo)	85
Obrázek 31 – Proctorova zkouška	89
Obrázek 32 – Zkušební tělesa při zkoušce odolnosti proti působení mrazu a vodě – vlevo fáze mražení, vpravo fáze oteplování	96
Obrázek 33 – Zkušební tělesa po zkoušce pevnosti v prostém tlaku; REC 2 (vlevo), REC 1 (vpravo)	100
Obrázek 34 – Vysušené hmotnostní odpady směsí (REF, REC 1, REC 2) po 25. cyklu	106
Obrázek 35 – Detail rozdrčení zrna betonového recyklátu při hutnění	114
Obrázek 36 – Detail betonového recyklátu REC 2	121
Obrázek 37 – Připravená zkušební tělesa pro zkoušku odolnosti povrchu proti působení vody a CHRL v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3	124
Obrázek 38 – Ukázky povrchu zkušebních těles vzniklého řezem kotoučové pily; směs REC 1 (vlevo), směs REC 2 (uprostřed), směs REF (vpravo).....	124

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – <i>Proctorův graf směsi REF</i>	87
Graf 2 – <i>Proctorův graf směsi REC 1</i>	88
Graf 3 – <i>Proctorův graf směsi REC 2</i>	89
Graf 4 – <i>Odpad po 25 cyklech směsi REF</i>	104
Graf 5 – <i>Odpad po 25 cyklech směsi REC 1</i>	105
Graf 6 – <i>Odpad po 25 cyklech směsi REC 2</i>	106
Graf 7 – <i>Průměrné hodnoty odpadu po 25 cyklech na zkušebních vzorcích všech tří vyrobených stmelných směsí</i>	113
Graf 8 – <i>Část průběhu teplot při zkoušce odolnosti proti působení mrazu a vodě v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3</i>	122
Graf 9 – <i>Část průběhu teplot při zkoušce odolnosti povrchu proti působení vody a CHRL v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3</i>	123

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AB – vrstva asfaltobetonu

AS 1141 – Australian Standard; předpis australské standardy

BS 8500-2:2006 – British Standard; norma britský standard, Specifikace pro materiály a beton

C – Concrete – beton

CB – vrstva cementobetonu

CBR – California Bearing Ratio – Kalifornský poměr únosnosti

DAfStb – Deutschen Ausschuss für Stahlbeton; směrnice Německý výbor pro železobeton

d/D – velikost dolního síta/velikost horního síta frakce

DIN – Deutsche Industrie-Norm; německá národní norma

EU – Evropská unie

CHRL – Chemické rozmrazovací látky

MZK – Mechanicky zpevněné kamenivo

MZZ – Mechanicky zpevněná zemina

OA – Osobní automobily

OT 70085 – Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and ...; směrnice Recyklovaná kameniva v betonu: Použití průmyslu, stavebnictví a ..., Švýcarsko

PK – Pozemní komunikace

RSM – Recyklační stavební materiály

SC – směs stmelená cementem

SDO – Stavební a demoliční odpad

SH – směs stmelená hydraulickými silničními pojivy

SP – směs stmelená popílkem

SS – směs stmelená struskou

ŠD – vrstva ze štěrkodrti

ŠP – vrstva ze štěrkopísku

TP – Technické podmínky

TKP – Technické kvalitativní podmínky

TR A006 (2000) – Concrete using recycled aggregate; japonská směrnice: Beton s využitím
recyklovaného kameniva

VŠ – vrstva z vibrovaného štěrku

WTCB – Vědecko technické středisko pro stavebnictví, Belgie

OBSAH

0	ÚVOD	17
1	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	18
1.1	Vozovky pozemních komunikací.....	18
1.2	Podkladní vrstvy vozovek pozemních komunikací.....	18
1.2.1	Nestmelené podkladní vrstvy vozovek PK.....	19
1.2.2	Stmelené podkladní vrstvy vozovek PK.....	20
1.3	Stavební a demoliční odpad (SDO), betonový recyklát.....	22
1.3.1	Dělení recyklovaných stavebních materiálů	23
1.3.2	Užití recyklátu ve vrstvách vozovek PK.....	25
1.3.3	Betonový recyklát	25
1.3.4	Výroba a skladování betonového recyklátu.....	26
1.3.5	Druhy betonového recyklátu.....	32
1.3.6	Zahraníční zkušenosti s využitím betonového recyklátu ve vrstvách vozovek PK.....	34
1.4	Shrnutí současného stavu	38
2	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	40
3	METODY MĚŘENÍ VLASTNÍHO EXPERIMENTU	41
3.1	Použité směsi a jejich výroba	41
3.2	Výroba zkušebních těles	44
3.3	Provedené zkoušky experimentu.....	48
3.3.1	Zkoušky betonového recyklátu a kameniva.....	48
3.3.2	Zkoušky čerstvé stmelené směsi cementem	61
3.3.3	Zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem.....	64
4	VÝSLEDKY PROVEDENÉHO EXPERIMENTU.....	71
4.1	Výsledky zkoušek betonového recyklátu a kameniva	71
4.2	Výsledky zkoušek čerstvé stmelené směsi.....	86

4.3	Výsledky zkoušek ztvrdlé stmelené směsi.....	90
4.4	Finanční analýza.....	107
5	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	109
5.1	Zhodnocení vlastního měření.....	109
5.2	Doporučení a poznatky experimentu.....	114
6	ZÁVĚR.....	116
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	118
8	PŘÍLOHY.....	121
8.1	Přílohy spojené s experimentem.....	121
8.2	Doklady.....	125

0 ÚVOD

Recyklace se stává novým environmentálním oborem, protože objem odpadů všeho druhu se každoročně zvyšuje a stává se tak jedním z hlavních problémů ochrany životního prostředí a je nutné této problematice věnovat velkou pozornost. Značný podíl v objemech odpadů představuje stavební a demoliční odpad, jedná se přibližně o jednu polovinu celkové produkce odpadů v České republice. Výhodou je velká možnost zpětného využití stavebních odpadů na výrobu druhotných surovin vhodných pro opětovné použití při výstavbě nových objektů, což má pozitivní vliv nejen na životní prostředí, ale také vede k poměrně velkým ekonomickým úsporám.

Tato skutečnost se také pozitivně odrazila i v nedávno přijatém Plánu odpadového hospodářství v České republice pro období 2015 – 2024, ve kterém je stanoven cíl pro stavební a demoliční odpady: Zvýšit do roku 2020 nejméně na 70 % hmotnosti míru přípravy k opětovnému použití a míru recyklace stavebních a demoličních odpadů a jiných druhů jejich materiálového využití, včetně zásypů, při nichž jsou materiály nahrazeny v souladu s platnou legislativou stavebním a demoličním odpadem kategorie ostatní s výjimkou v přírodě se vyskytujících materiálů uvedených v Katalogu odpadů pod katalogovým číslem 17 05 04 (zemina a kamení). Cíl vychází ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech. S úmyslem zabezpečit přednostní využívání stavebních a demoličních odpadů byl vydán „Metodický návod odboru odpadů pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi“. [1]

Při projednávání stavebního díla patří cena mezi nejdiskutovanější položky. Tato práce je věnována druhotným surovinám, především betonovému recyklátu, který patří mezi nejrozšířenější recyklovaný materiál. Recyklační směs získaná drcením a tříděním betonu musí obsahovat min. 90 % betonu, max. 6 % směsi pálených zdících prvků a přírodního kamene, max. 1 % skla a max. 3 % ostatních cizorodých částic.

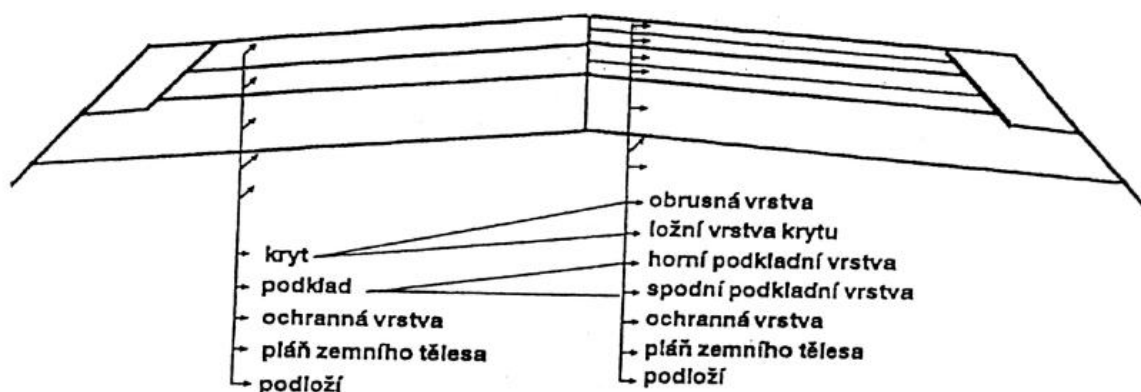
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V této části diplomové práce je popsán současný stav podkladních vrstev, jejich členění a složení. Následně je v této práci popsán stavební a demoliční odpad se zaměřením na betonový recyklát včetně jeho výroby. Dále pak je popsán způsob zpracování a zkušenosti s betonovým recyklátem v zahraničí.

1.1 Vozovky pozemních komunikací

Základním požadavkem na pozemní komunikace je zajistit bezpečný, hospodárný a pohodlný provoz silničních vozidel s omezením vlivu na životní prostředí (hluk silničních vozidel). Tyto požadavky jsou zajištěny rovností v podélném a příčném směru, protismykovými vlastnostmi povrchu vozovky a minimalizací poruch krytových vrstev vozovek. Stanovení požadavků závisí na dopravním významu (mezinárodní, regionální a místní provoz) a na dopravním zatížení (počtu vozidel a jejich skladbě). Odhlédneme-li od požadavků na krytové vrstvy vozovek, pak podkladní vrstvy zajišťují únosnost vozovky a jsou vhodným podkladem pro položení cementobetonového krytu, asfaltových vrstev nebo dlažby. Musí obvykle umožnit staveništní dopravu, která je nesmí poškodit. [2]

Obrázek 1 – Vrstvy v konstrukci vozovky



Zdroj: [3]

1.2 Podkladní vrstvy vozovek pozemních komunikací

Podkladní vrstvy zajišťují únosnost pozemních komunikací a musí být vhodným podkladem pro položení cementobetonového krytu, asfaltových vrstev nebo dlažby. Dále musí obvykle umožnit staveništní dopravu, která ji nesmí porušit. Tyto vrstvy dělíme podle použití daného pojiva na vrstvy nestmelené a stmelené podkladní vrstvy pozemních komunikací. [4]

1.2.1 Nestmelené podkladní vrstvy vozovek PK

Nestmelené podkladní vrstvy vozovek pozemních komunikací jsou vytvořené ze zrnitého materiálu, kterým bývá vhodná zemina, kamenivo nebo jejich směsi bez použití pojiva. Nestmelené směsi se vyznačují složením kameniva s plynulou čarou zrnitosti od dolního síta $d = 0$ k dosažení minimálního množství mezer v kamenivu, zhutnitelností, splněním filtračních kritérií, nenamrzavostí a únosností. [4]

Požadavky na nestmelené podkladní vrstvy:

- **Dostatečná únosnost** – závislé i na únosnosti podloží
- **Trvanlivost** – neměnicí se vlastnosti s ohledem na klimatické vlivy (mráz, vysoké teploty, kolísající vlhkost)
- **Vyloučení přítomnosti jílovitých materiálů** – směs se hůře zpracovává a hutní
- **Nenamrzavou vrstev – Casagrandeho kritérium:** podíl částic $< 0,02 \text{ mm} < 3 \%$ [3]

Druhy nestmelených podkladních vrstev:

a) Mechanicky zpevněná zemina (MZZ)

Vrstva vozovky vzniklá rozprostřením a zhutněním nestmelené zeminy nebo náhradních materiálů SDO (materiál z demolic, betonový recyklát atd.) zrnitosti G_E splňující předepsané vlastnosti:

- ekvivalent písku min. 20,
- únosnost CBR (saturované) min. 20 %. [5]

b) Mechanicky zpevněné kamenivo (MZK)

Vrstva vozovky vyrobená z nestmelené směsi drceného kameniva s optimální vlhkostí, rozprostřená a zhutněná za podmínek zajišťujících maximální dosažitelnou únosnost. Jedná se o nejkvalitnější nestmelenou podkladní vrstvu s plynulou křivkou zrnitosti. Pokládka této vrstvy probíhá pomocí finišeru a je hutněna vibračními válci. Nestmelená směs této vrstvy se míchá s vodou na optimální vlhkost, která se určí pomocí Proctor – modifikovaný. [5]

c) Vrstva ze štěrkodrti (ŠD)

Vrstva vozovky vyrobená z nestmelené směsi z drceného kameniva zrnitosti G_E (ŠD_A) nebo G_N (ŠD_B), která se rozprostírá přímo na pláň pomocí grejgrů a je hutněna vibračními válci. Jedná se nejběžněji používanou nestmelenou podkladní vrstvu. [5]

d) Vrstva ze štěrkopísku (ŠP)

Vrstva vozovky vyrobená z nestmelené směsi z těžného kameniva zrnitosti G_E (ŠP_A) nebo G_N (ŠP_B), která se rozprostírá přímo na pláň pomocí grejgrů a hutní se statickými nebo vibračními válci. Jedná se o nejméně únosnou vrstvu z nestmelených materiálů, protože štěrkopísek se zaobleným zrny má nízké vnitřní tření mezi zrny. Používá se pouze do ochranné vrstvy určené pro ochranu vozovky před účinky promrzání. [5]

e) Vibrovaný štěrk (VŠ)

Vrstva vytvořená kostrou z hrubého drceného kameniva se zavibrovaným výplňovým kamenivem. Kostra je tvořena frakcí 32/63 a výplňové kamenivo do velikosti maximálního zrna 16 mm. Z toho vyplývá, že únosnost této vrstvy je postavena na únosnosti hrubého skeletu. Tato vrstva má vyšší únosnost než vrstvy štěrkodrti (ŠD) nebo štěrkopísku (ŠP), ale nelze ji klást přímo na podloží z důvodu nesplnění filtračního kritéria. [6]

1.2.2 Stmelené podkladní vrstvy vozovek PK

Směsi stmelené hydraulickým pojivem jsou podle ČSN EN 14227-1 definovány jako směsi obsahující kamenivo s řízenou zrnitostí a jedním či více hydraulickými pojivy, vyráběné způsobem, který zajišťuje homogenitu směsi. Tyto směsi tuhnou a tvrdnou hydraulickou reakcí a jejich klasifikace je založena na mechanických vlastnostech. [7]

Vlastnosti kameniva pro výrobu směsí stmelených hydraulickými pojivy jsou definovány výběrem hodnot z příslušných kategorií podle ČSN EN 13242 ed. 2.

Užití směsí stmelených hydraulickými pojivy ve vozovce je určeno podle typu konstrukční vrstvy a třídy dopravního zatížení.

Tabulka 1 – Užití směsí stmelených hydraulickými pojivy ve vozovce

Třída pevnosti v tlaku R_c^b	Doporučená třída dopravního zatížení ^a		
	Krytová vrstva ^c	Horní podkladní vrstva	Spodní podkladní vrstva
$< C_{1,5/2}^d$	-	-	-
$C_{1,5/2}$	-	III, IV, V a VI	bez omezení
$C_{3/4}$	-	bez omezení	bez omezení
$C_{5/6}$	V, VI	bez omezení	-
$C_{8/10}$	V, VI	bez omezení	-
$C_{12/16}$	V, VI	bez omezení	-
$C_{15/20}$ a vyšší ^d	-	-	-
a	Třída dopravního zatížení podle ČSN 73 6114.		
b	Třída pevnosti v tlaku podle 6.2.6 ČSN 73 6124-1.		
c	Pro místní obslužné komunikace se povrch vrstvy musí opatřit nátěrem nebo emulzí kalovou vrstvou. Pro účelové komunikace, zpevněné plochy a dočasné komunikace se provedení tohoto opatření na povrchu vrstvy doporučuje.		
d	Viz 6.2.6 ČSN 73 6124-1.		

Zdroj: [8]

Vrstvy ze stmelených směsí mají relativně vysoký modul pružnosti, ale zároveň jsou náchylné k trhlinám. Vrstva spolupůsobí s podkladem, ten omezuje její průhyb a vzniká velké napětí, při kterém dojde k porušení. Tyto trhliny se šíří až k asfaltovým vrstvám a dochází k poruchám krytů vozovek. Tyto jevy se eliminují použitím správné technologie, dodržením technologické kázně jako je pokládání, hutnění a ošetřování. [9]

Druhy stmelených směsí podle použitého pojiva:

- **Stmelené směsi kameniva do konstrukce vozovky:**
 - Stmelené směsi cementem (SC)
 - Stmelené směsi struskou (SS)
 - Stmelené směsi popílkem (SP)
 - Stmelené směsi hydraulickými silničními pojivy (SH)
- **Upravené zeminy do podloží:**
 - Zlepšené zeminy cementem
 - Zlepšené zeminy vápnem
 - Zlepšené zeminy struskou
 - Zlepšené zeminy hydraulickými silničními pojivy

- Zlepšené zeminy popílkiem [8]

Podle pevnosti v prostém tlaku se stmelené směsi dělí na:

- $C_{1,5/2}$, $C_{3/4}$, $C_{5/6}$, $C_{8/10}$, $C_{12/16}$
- Směsi nižší a vyšší třídy se nedoporučují používat do podkladních vrstev vozovek [8]

V technické dokumentaci se při označování uvede: značka technologie; zrnitost směsi; třída pevnosti v tlaku; tloušťka vrstvy v mm; číslo prováděcí normy. Například směs stmelená cementem (SC) frakce 0/32, třídy pevnosti $C_{3/4}$ v tloušťce 200 mm odpovídající prováděcí normě: SC 0/32; $C_{3/4}$; 200 mm; ČSN 73 6124-1. [8]

Celková tloušťka vrstvy je dána návrhem vozovky. Konstrukční vrstva může být pokládána po částech tak, že nejmenší tloušťka pokládané ztuhlé vrstvy je minimálně 2,5 násobkem velikosti horního síta směsi D , nejméně však 100 mm. [8]

Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy se provádějí dvěma způsoby. Buď se směs mísí v centru, převeze se na stavbu a zpracuje, nebo se směs mísí na místě. Optimální teplotní podmínky pro pokládku jsou při teplotě ovzduší +5 °C až +25 °C, při ostatních teplotách ovzduší je třeba provést zvláštní opatření. Při silném nebo dlouhotrvajícím dešti se nesmí provádět zpracování směsi. Pokud je vytvořená stmelená směs přepravována, nesmí dojít k jejímu znečištění a změně vlhkosti. Stmelená směs míchaná v centru se rozprostírá v jedné nebo více vrstvách pomocí finišerů nebo grejdrů. Po rozprostření a urovnání povrchu vrstvy je nutno začít ihned s jejím ztuhnutím. Pokud se pokládá více vrstev, musí se hutnit každá samostatně. Hutnění je nejlépe provádět pomocí vibračních tandemových válců s oběma hladkými běhouny a válci pneumatikovými. Vrstva ze směsi stmelené hydraulickým pojivem musí být po dobu minimálně 7 dní udržována vlhká a nesmí být zbytečně pojížděna. Po této době je možné provádět další vrstvu vozovky. [8]

1.3 Stavební a demoliční odpad (SDO), betonový recyklát

Ve smyslu vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu ve znění vyhlášky č. 61/2010 Sb., § 2, písmeno a) interní odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti a u něhož za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám.

1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů

Recyklovaný stavební materiál RSM je materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě SDO, kategorie ostatní odpad a odpadů podobných SDO, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztržení na velikostní frakce v zařízeních tomu určených. Recyklovaný stavební materiál se člení na:

- **Recyklát z betonu** – je to recyklované kamenivo, které se získá drcením a tříděním betonu a betonových výrobků, jejichž obsah složky je:
 - $R_c \geq 90$ % hmotnosti;
 - obsah ($R_u + R_b$) ≤ 6 % hmotnosti;
 - maximální obsah složky $R_g \leq 1$ % hmotnosti;
 - maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic ($X + Y + FL$) = 3 % hmotnosti, přičemž FL se stanovuje objemově podle ČSN EN 933-11 a maximální množství $FL = 1$ % hmotnosti
- **Recyklát z vozovek** – je recyklované kamenivo, které se získá drcením a tříděním betonu, vrstev stmelovaných asfaltem nebo hydraulickým pojivem případně nestmelovaných vrstev a hrubozrnných zemin s celkovým obsahem složek je:
 - $(R_c + R_a + R_u) \geq 95$ % hmotnosti;
 - maximální obsah složky R_a je 30 % hmotnosti;
 - maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic ($X + Y + FL$) = 5 % hmotnosti
- **Recyklát ze zdiva** – je recyklované kamenivo, které se získá drcením a tříděním pálených a nepálených zdících prvků (cihly, obkladačky, vápenopískové prvky, pórobetonové tvárnice) a betonu s celkovým obsahem složek:
 - $(R_b + R_c + R_u) \geq 90$ % hmotnosti;
 - Složka jiných, ostatních a plovoucích částic ($X + Y + FL$) je minimálně 10 % hmotnosti
- **Recyklát směsný** – je recyklát, který se získává drcením a tříděním stavebního a demoličního odpadu, který není považován za kamenivo. Podíl hlavních složek není určen. Obsah jiných, ostatních a plovoucích částic:
 - $(X + Y + FL)$ je ≤ 10 % hmotnosti
- **R-materiál** – je asfaltová směs, která se znovu získává odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby

- $R_a > 95$ % hmotnosti;
- $(R_c + R_b + R_u + X + Y + FL) = 5$ % hmotnosti
- **Recyklát asfaltový** – je recyklát z vozovek, kde je podíl složky R_a :
 - 30 % < R_a < 95 % hmotnosti
- **Jiné částice (X)** – podle ČSN EN 933-11 se jedná o přilnavé částice (jemnozrnné jílovité zeminy a nečistoty), různorodé částice jako kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, stavební plasty a pryž, sádrová omítka apod.
- **Ostatní částice (Y)** – jedná se o částice nestavebního charakteru (papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály – humus rašelina), tyto částice se při zkoušce podle ČSN EN 933-11 přiřazují ke složce jiných částic (X)
- **Plovoucí částice (FL)** – tyto částice se stanovují v souladu s ČSN EN 933-11 a jedná se o částice, které plavou ve vodě (plovoucí dřevo, polystyrén, apod.) [10]

Tabulka 2 – Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva

Označení	Popis
R_c	Beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky
R_u	Nestmelené kamenivo, přírodní kámen, hydraulicky stmelené kamenivo
R_b	Pálené zdící prvky (cihly, tvárnice), vápenopískové zdící prvky, neplovoucí pórobeton
R_a	Asfaltové materiály
R_g	Sklo
X	Jiné: Přilnavé (jíl a nečistoty)
	Různorodé: kovy (železné a neželezné)
	neplovoucí dřevo, plasty a pryž
	sádrová omítka

Zdroj: [11]

1.3.2 Užití recyklátu ve vrstvách vozovek PK

Podle procentuálního zastoupení hlavní složky recyklátu lze orientačně rozdělit užití podle následující tabulky.

Tabulka 3 - Doporučené užití recyklovaných materiálů podle zastoupeného základního materiálu

Typ RSM	Konstrukční vrstvy vozovky pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso
	AB	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		Kostrá	Výplň	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+/0	+	0/-	+/0	+
Recyklát směsný	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+/0	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát asfaltový	+	-	+/0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Zdroj: [10]

1.3.3 Betonový recyklát

Betonový recyklát je recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu a betonových konstrukcí. Betonový recyklát patří mezi nejrozšířenější recyklovaný materiál a má také nejširší využití ve vozovkách, zejména díky svým fyzikálně-mechanickým vlastnostem, které se podobají přírodnímu kamenivu. Recyklační směs získaná drcením a tříděním betonu musí obsahovat min. 90 % betonu, max. 6 % směsi pálených zdících prvků a přírodního kamene, max. 1 % skla a max. 3 % ostatních cizorodých částic. Betonový recyklát se podle granulometrického složení dělí na jemný (frakce do 4 mm) a hrubý (frakce nad 4 mm) recyklát. Využívá se v podkladních vrstvách vozovek nestmelených a stmelených cementem, ochranných vrstvách silničních komunikací a pražcového podloží (jako mechanicky zpevněná zemina). Jako další možné využití betonového recyklátu

je do asfaltových směsí pro výstavbu a opravy chodníků, cyklistických stezek případně asfaltových vozovek pro nízká dopravní zatížení (místní, účelové komunikace, apod.) za předpokladu dodržení receptur a pracovních postupů předepsaných příslušnými normami (ČSN 73 6121 – „*Hutněné asfaltové vrstvy*“), kde je nutno dodržet předepsanou granulometrii s možným použitím do podkladních, ložních, obrusných vrstev. Hrubé frakce recyklovaného betonu (nad 22 mm) je možné použít do prolévaných vrstev. [12]

Na základě dosud provedených výzkumných prací a dosažených laboratorních a poloprovozních výsledků je možno konstatovat:

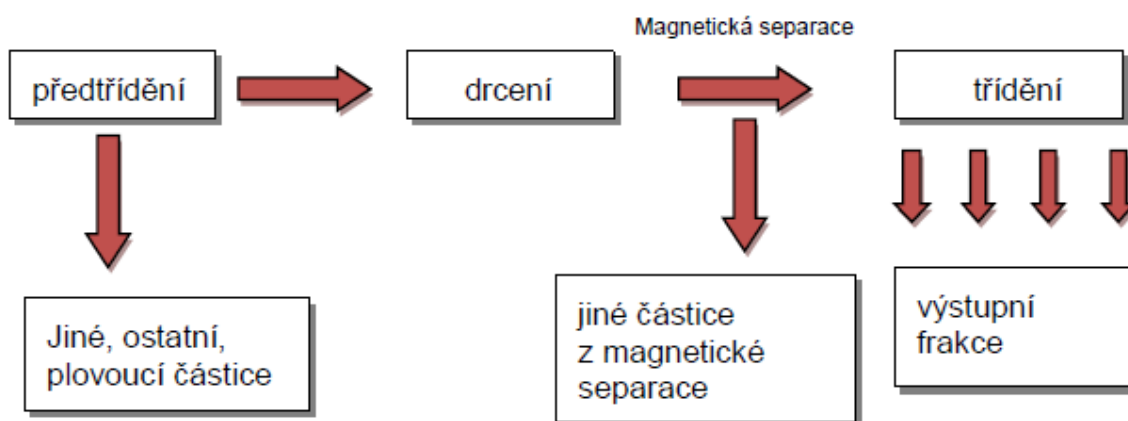
- obsah drceného betonu nepříznivě ovlivňuje konzistenci betonové směsi a pro zachování její potřebné konzistence je nutné zvýšit dávku záměsové vody (projeví se na pevnostech betonu).
- pevnosti betonu v tlaku jsou poněkud ovlivňovány oproti použití přírodního kameniva
- snižuje se objemová hmotnost zatvrdlého betonu
- pevnost v tlaku se snižuje o 10 – 15 %
- modul pružnosti je nižší o 15 – 20 %
- zvyšuje se součinitel dotvarování až o 50 %
- zvyšuje se smršťování a to o 20 – 40 %

Použití betonového recyklátu je dnes zakotveno i v některých normách a je poměrně rozšířené jako např. v podkladních vrstvách vozovek stmelovaných cementem, ochranných vrstev silničních komunikací a pražcového podloží (jako mechanicky zpevněná zemina) a hlavně jako náhrady přírodního kameniva do konstrukčních betonů nižších tříd za předcházejících předpokladů. [13]

1.3.4 Výroba a skladování betonového recyklátu

Způsob výroby recyklátů má zásadní vliv na kvalitu tohoto materiálu pro použití do pozemních komunikací. Při běžných demoličních pracích je zcela nezbytné (z hlediska dalšího využití vybouraného materiálu) provádět důsledné třídění. Kvalita recyklátu je ovlivněna nejenom samotnou technologií, ale i organizací práce a celkovým logistickým systémem chodu recyklačního zařízení, včetně skladového hospodářství, dopravních cest apod. Z hlediska získání kvalitního recyklátu se za poslední roky v domácích podmínkách ustálila všeobecně uznávaná a používaná konfigurace, orientačně naznačená blokovým schématem. [10]

Obrázek 2 – Blokové schéma výroby recyklátů



Zdroj: [10]

Ve skutečnosti existují a úspěšně provozují recyklační zařízení, které vybočuje z tohoto ustáleného schématu. Nicméně je zcela jednoznačné, že až na výjimečné případy není výroba kvalitních recyklovaných materiálů dosažena bez tří základních technologických operací:

- Předtřídění
- Drcení
- Následné třídění

V budoucnu by se k nim měla přidat i další technologická operace – separace lehkých a prachových částic, příp. praní. Tato činnost je zcela běžná v recyklačních zařízeních v zemích EU a s postupnou certifikací některých recyklovaných produktů u nás bude jejich přítomnost v řadě recyklačních linek nezbytná.

V současnosti existuje v oboru recyklací stavebních sutí řada firem, využívajících pouze část výše uvedeného základního řetězce. Jedná se jak o provozování nejrůznějších třídících zařízení bez drtiče, tak také naopak - provozování samotného drtiče (většinou menších rozměrů) bez předtřídění a následného třídění. Vede je k tomu takřka vždy snaha, snížit na minimum provozní náklady a tím i cenu výsledného recyklátu. [14]

V procesu recyklace stavební suti je možné použít velké množství strojů. Výběr mechanizace závisí především na objemech recyklovaných odpadů. Nejčastějšími technologickými zařízeními na výrobu recyklovaného kameniva jsou drtiče. Drcení probíhá zpravidla ve více stupních. Konkrétní podoba a počet stupňů drcení vychází z charakteru

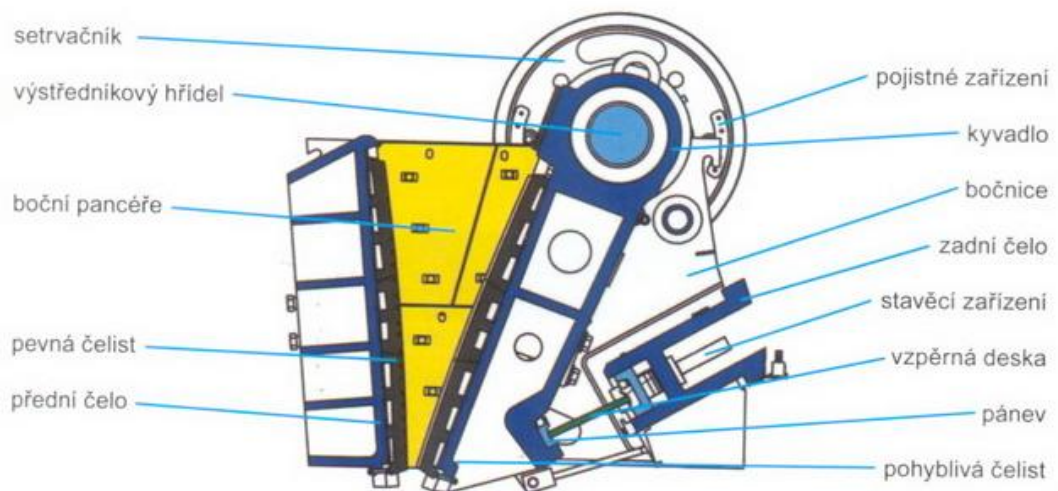
a vlastností zdrobňované suroviny a z požadavků na vlastnosti výsledného kamenivo. Pro první stupeň drcení se zpravidla používají čelistové drtiče. Pro vyšší stupně se zpravidla používají drtiče kuželové, kladivové či odrazové. [15]

Druhy drtících zařízení:

a) Čelistové drtiče

Slouží ke zpracování betonu, železobetonu a cihelné suti. Kusovitost vstupního materiálu se pohybuje mezi 50 a 100 cm. Mezi provozní vlastnosti těchto jednotek patří – vysoká provozní spolehlivost, nízké náklady na provoz a údržbu, příznivá spotřeba energie, snadná výměna opotřeбенých částí a vysoký výkon. Čelistové drtiče můžeme dále rozdělit na jedno-vzpěrné a dvou-vzpěrné. Jedno-vzpěrné mají vyšší stupeň zdrobňování a lepší tvarovou hodnotu zrn. Dvou-vzpěrné mají možnost drcení extrémně pevných materiálů. Dále můžeme rozlišovat jednotky na kolovém a pásovém podvozku. [15]

Obrázek 3 – Řez čelistovým drtičem



Zdroj: [16]

Obrázek 4 – Čelistový drtič v činnosti – betonový recyklát frakce 0/80

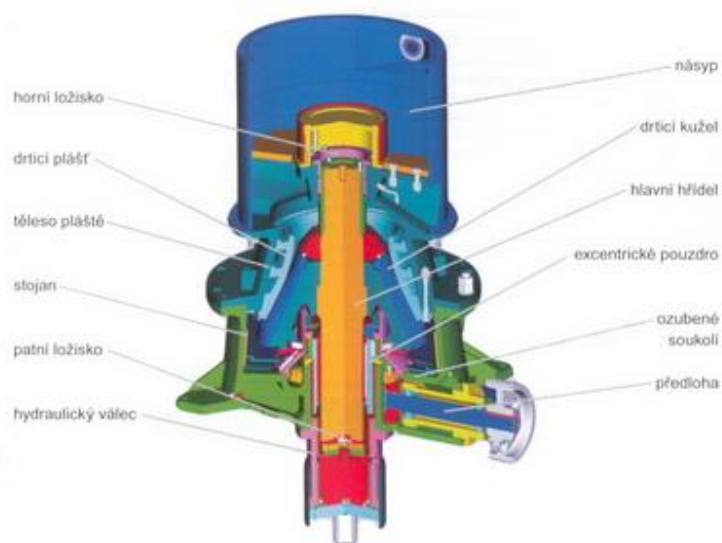


Zdroj: [vlastní]

b) Kuželové drtiče

Slouží ke zpracování přírodního kameniva (např. vápenec, pískovec, křemen či jiné podobné materiály). Kusovitost vstupního materiálu se pohybuje mezi 5 a 25 cm. Mezi výhody tohoto typu jednotek patří vysoká provozní spolehlivost a mobilita, nízké náklady na provoz a údržbu, vysoký stupeň zdrobnění, snadná údržba a jednoduchá obsluha, optimální geometrie drtícího prostoru a vysoká kvalita konečného produktu. [15]

Obrázek 5 – Řez kuželovým drtičem

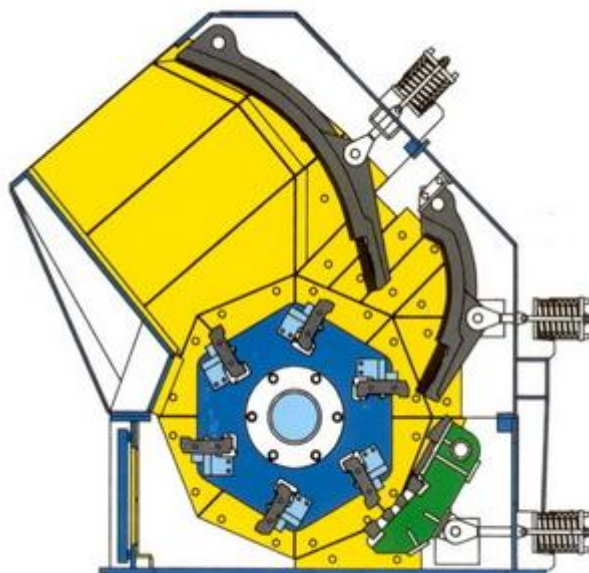


Zdroj: [16]

c) Odrazové drtiče

Tyto drtiče zpracovávají beton, železobeton, cihelnou suť, živičné kry a kamenivo se vstupními rozměry přibližně do 80 cm. Výhodami odrazových jednotek jsou vysoký výkon, velký stupeň zdrobnění, vynikající tvarový index a nenáročná údržba a obsluha. [15]

Obrázek 6 – Řez odrazovým drtičem



Zdroj: [16]

d) Válcové drtiče

Výhodou těchto drtičů je vysoký výkon, vysoká provozní spolehlivost, nízké náklady na provoz a údržbu a nenáročná obsluha. [15]

Třídící jednotky

Mobilní třídící jednotky můžeme rozdělit na mobilní a semimobilní neboli kontejnerové, dále potom na vibrační a rezonanční. Tyto stroje je možné použít pro třídění kameniva, šterků, písků, cihelné suti, drceného betonu, zeminy a dalších materiálů. Je možné tyto materiály třídit podle potřeby na několik frakcí. Mezi výhody patří vysoká provozní spolehlivost, nízké provozní náklady, vysoký výkon, velká sypná výška pásových dopravníků, možnost použití magnetického separátoru a váhy a možnost použití v širokém rozsahu okolních teplot. [15]

Pro roztřídění nadrcených materiálů slouží síta. Tyto síta se mohou dělit podle tvaru děr na čtvercová nebo harfová. U harfových sít nastává problém, že při třídění recyklovaného materiálu může dojít k propadu nekubických zrn (tj. zrna plochá nebo protažená, u kterých je podíl délky a tloušťky větší než 3).

Magnetické separátory

Užívají se k odstraňování kovových částic z recyklované stavební suti. [15]

Recyklační linky

Recyklační linky jsou složeny z výše uvedených částí, to znamená z drtičů, třídíčů, magnetických separátorů, případně dalších zařízení. Mohou být jak na kolovém, tak na pásovém podvozku a je možné je rozdělit následovně:

a) Mobilní recyklační linka

Mobilní recyklační linka se při práci stroje pohybuje. V náročném terénu, kde tyto stroje převážně pracují, se prosadil pouze pásový podvozek. [15]

b) Semimobilní recyklační linka

Semimobilní recyklační linka při práci stojí, ale je možné ji snadno a rychle přepravit. Polomobilní zařízení rozdělujeme na ližinové, kontejnerové nebo na kolovém podvozku. [15]

c) Stacionární recyklační linka

Stacionární recyklační linky dovolují vzhledem ke své velikosti a vybavení přípravu kvalitních recyklátů při vysokém výkonu. To je jejich největší přednost ve srovnání s mobilními a semimobilními úpravami. Avšak je nutno zajistit stálý přísun zpracovávaného materiálu a možnosti předzásobení na pozemku, což při vysokých cenách za dopravu snižuje ekonomickou efektivnost provozu. [15]

Skladování recyklovaných stavebních materiálů

Recyklované stavební materiály (RSM) musí být skladovány odděleně podle druhu a jakosti. Přitom je nutno zabránit znehodnocení materiálu (znečištění, smíchání, vyplavování, apod.). Velmi důležité je, při pravidelném využití recyklátu do pozemních komunikací,

důsledné sledování homogenity a stejnorodosti z hlediska úrovně kvality drcených recyklovaných materiálů. [10]

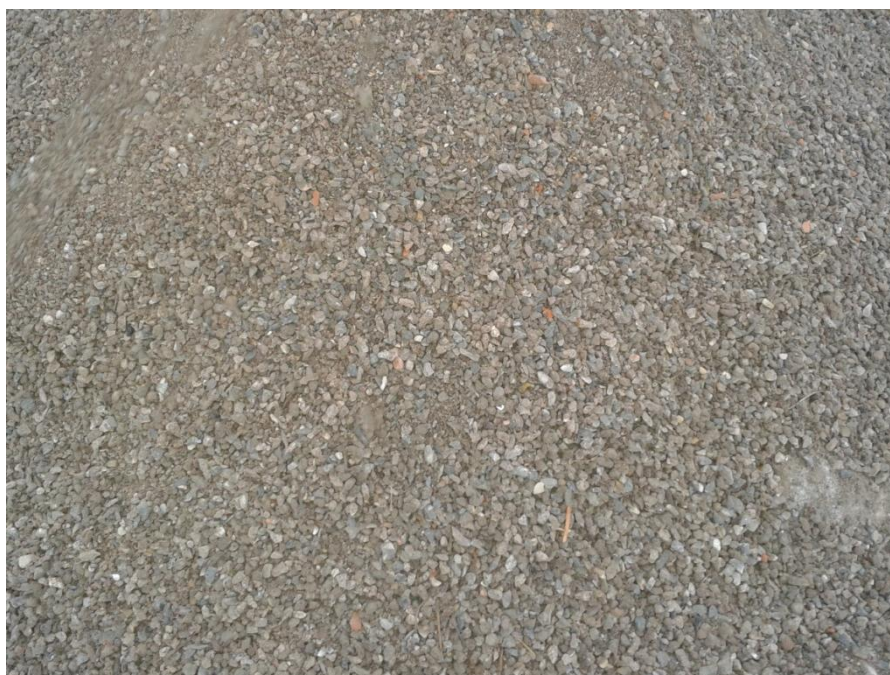
1.3.5 Druhy betonového recyklátu

Podle druhu použitého drtiče a sít ve třídící lince vznikají tyto druhy betonového recyklátu:

a) Betonový recyklát jemných frakcí (0/4, 0/8, 0/16) – podsítné frakce

Tento materiál je svými vlastnostmi, stejně jako směsný recyklát (ale dosahuje lepších hodnot únosnosti, nasákavosti a namrzavosti), velmi vhodný pro použití do náspů tělesa komunikace, k zásypům inženýrských sítí, obsypům kabelů, vodovodů, kanalizačních řadů. Materiál je dobře zhutnitelný na maximální objemové hmotnosti při vlhkosti blízké optimální vlhkosti. [17] [18]

Obrázek 7 – Betonový recyklát frakce 0/16



Zdroj: [vlastní]

b) Betonový recyklát středních frakcí (0/32, 16/32)

Střední frakce betonového recyklátu nacházejí své uplatnění jako náhrada štěrku při vytváření podkladových a podsypových vrstev, u nichž je vyžadována vyšší pevnost než pro standardní suťový recyklát. [17] [18]

Obrázek 8 – Betonový recyklát frakce 16/32



Zdroj: [vlastní]

c) Betonový recyklát velkých frakcí (0/63, 32/63, 0/80, 32/80)

Betonový recyklát velkých frakcí je možné použít jako umělé kamenivo při vytváření podkladových vrstev komunikací s větší zátěží než dovoluje recyklát vytvářený ze směsné stavební suti. [17] [18]

Obrázek 9 – Betonový recyklát frakce 32/80



Zdroj: [vlastní]

1.3.6 Zahraníční zkušenosti s využitím betonového recyklátu ve vrstvách vozovek PK

V následující části je zmíněno několik konkrétních států s popisem jejich předpisů, limitů a zkušeností v použití betonového recyklátu v silničním stavitelství.

Německo

V Německu je kladen velký důraz na ochranu spodních vod. Použití recyklovaných materiálů je zkoušeno pomocí vyluhovacích testů. Naměřené hodnoty nových recyklačních materiálů jsou hodnoceny na základě technických a ekologických vlastností, především na dopady na spodní vody. Základní požadavky na betonový recyklát při použití do betonu jsou uvedeny ve směrnici DAfStb. Podle ní je betonový recyklát klasifikován jako kamenivo s objemovou hmotností nižší než $2\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pevností v tlaku nižší než 100 MPa. Podle těchto kritérií je takové kamenivo příliš těžké, aby bylo klasifikováno jako umělé kamenivo do lehčených betonů a málo pevné, aby se dalo hodnotit podle platných norem DIN jako přírodní nebo drcené kamenivo.

V současné době se na území Německa nachází celá řada recyklačních stanic stabilních i mobilních, které snižují poměrně velké náklady na vyvážení stavebního odpadu na vzdálené skládky. Tyto recyklační stanice vrací zpět z téměř 90 % stavebního odpadu tříděný stavební materiál, který je zpětně využíván. [19]

Dánsko

Dánsko dělí recyklovaný materiál do tří kategorií a stanovilo si podmínky pro jeho použití. Každá kategorie recyklovaných materiálů má určeno, za jakých podmínek a na jakých místech může být použita. Tyto materiály jsou také posuzovány ve vztahu k umístění budoucí vozovky vzhledem k blízkosti vody (pitné, sladké či mořské). Materiály, které přesahují stanovené limity, musí být komplexně přezkoumány a následně se pak rozhodne o jejím použití. [19]

Rakousko

V Rakousku existují od roku 1990 velká recyklační pracoviště zaměřená na betonové silnice. V této zemi je povoleno nahrazení maximálně 20 % hrubého betonového recyklátu. Hlavním parametrem je výběr vstupních surovin a jejich následná úprava. Cílem je získat

směs s méně než 1 % nečistot. Příkladem použití betonového recyklátu může být z roku 1990 na 300 km úseku dálnice A1. [19]

Švýcarsko

Ve Švýcarsku existuje směrnice OT 70085, která definuje rozsah využití betonového recyklátu vzhledem k dané konstrukci. V této zemi je povoleno použít malé množství betonového recyklátu (okolo 20 %), aby nebyly značně změněny vlastnosti nové betonové směsi. Ale za předpokladu vhodného použití a provedených zkoušek nového betonu je zde povoleno až 100 % použití betonového recyklátu. [19]

Belgie

V Belgii mají významné zkušenosti s betonovými recykláty vzhledem k rozsáhlé a husté dálniční síti, především s využitím do základů a podkladních vrstev vozovek PK, protože použití betonového recyklátu není povoleno do horních cementobetonových vrstev vozovky. Od července roku 1977 probíhal v Belgii výzkumný program ve středisku WTCB (Vědecko – technické středisko pro stavebnictví), který se zabýval možnostmi využití betonového recyklátu do cementových betonů s minimální ztrátou pevnosti. Díky tomuto výzkumu se předpokládalo, že tyto výsledky a poznatky budou využity k vytvoření legislativy pro používání recyklátu ve stavebnictví. [19]

Velká Británie

Ve Velké Británii jsou možnosti využití betonového recyklátu definovány v normě BS 8500-2:2006. Podle typu betonové konstrukce je v Británii povoleno použití jakéhokoli množství betonového recyklátu. Použití 100 % betonového recyklátu je povoleno pouze do betonových obrubníků, garáží pro OA atd. Přípustné množství, kdy ještě nedochází k výrazným změnám v betonu, je stanoveno ve většině případů na 20 % až 30 % betonového recyklátu. Norma dále definuje 4 třídy použití betonového recyklátu (všechny do pevnostní třídy C 40/50) podle vlivu prostředí:

- X0 – pro konstrukce v prostředí s velmi nízkou vlhkostí vzduchu
- XC1-4 – pro všechny konstrukce, které jsou vystaveny působení karbonatace (v suchých, vlhkých i cyklických podmínkách)
- DC1 – pro konstrukce vystavené působení chloridů

- XF1 – pro vertikální konstrukce vystavené působení dešti a mrazu s mírnou vlhkostí a bez působení rozmrazovacích solí

Podle Britské normy BS EN 1338 pro cementobetonové kryty vozovek PK může kamenivo dosahovat maximálně 6 % nasákavosti vody. Aby tato podmínka byla splněna, může být nahrazeno pouze 55 % hrubého a 20 % jemného betonového recyklátu. [19]

Ve Velké Británii byl realizován projekt konsorciem pod vedením C4S při TRL a skládající se ze Scott Wilson Pavement Engineering a Tarmac Limited. Cílem projektu bylo vyvinout metody výkonnostních zkoušek hydraulicky stmelených směsí k usnadnění většího využití recyklovaného a druhotného kameniva a poskytnout návod na jejich použití. Na postavených zkušebních polygonech byly provedeny zkoušky mechanických vlastností materiálů a měření únosnosti pro ověření laboratorního výzkumu a zajištění větší důvěry k používání těchto kameniv. Místem vybraným pro tuto studii byla přístupová cesta do pískového a šterkového lomu Tarmac v Colchesteru. Cílem studie bylo porovnat chování hydraulicky stmelených spodních podkladních vrstev obsahující recyklované kamenivo (recycled aggregates RA) nebo recyklovaný asfalt (recycled asphalt plantings RAP) s konvenční podkladní vrstvou. Polygon se skládal ze čtyř různých hydraulicky stmelených spodních podkladních vrstev a jedné kontrolní. Vzhledem k poměrně velké tloušťce asfaltových vrstev byly vytvořeny ještě dvě hydraulicky stmelené vrstvy bez krytových vrstev v nepojížděné oblasti tak, aby umožnily lepší pochopení chování materiálu. [20]

Pokus prokázal, že hydraulicky stmelené vrstvy vyrobené z recyklovaného a druhotného kameniva mohou být úspěšně míchány a pokládány v praxi. Vrstvy byly položeny pomocí stejného finišeru jako asfaltové materiály a hutněny pomocí vibračních válců. Není tedy zapotřebí žádné specializované zařízení, což je nesporná výhoda pro dodavatele. Kromě toho, vrstvy byly pojížděny stavebním provozem bez jakéhokoliv zjevného poškození, i když je třeba poznamenat, že staveništní doprava byla malá ve srovnání s normální dopravou na stavbě. [20]

Spojené státy americké

Ve Spojených státech amerických je rozsáhlá dálniční síť a tím je zde prostor pro testování a aplikaci různých příkladů použití betonových recyklátů v silničním stavitelství. Proto zde můžeme najít různorodé příklady použití i v nových cementobetonových krytech vozovek PK. Příkladem je silnice I-10 u Houstonu, která byla rekonstruovaná v roce 1995

a monitorována po dobu dalších deseti let. Během této doby nedošlo k výraznému poškození zapříčiněnému použitím betonového recyklátu náhradou za přírodní kamenivo. Po tomto úspěchu došlo k velkému rozvoji recyklační technologie na území Spojených států amerických. I když ostatní příklady už nebyli tak úspěšné (jedním z důvodů je patrně také zvýšené dopravní zatížení), recyklace stále patří mezi významnou součást silničního stavitelství v USA. Zároveň se zkušenostmi vznikají i příslušné předpisy na použití betonového recyklátu a s tím spojené i omezení jeho použití. Například v Texasu je povoleno nahradit maximálně 20% přírodního kameniva, aniž by byly výrazně změněny vlastnosti betonové směsi. [19]

Japonsko

V Japonsku existuje směrnice TR A006 (2000) – Concrete using recycled aggregate. Tento technický předpis je založen na klasifikaci betonového recyklátu vzhledem k množství použitého pojiva. Vyšší podíl pojiva zvyšuje nasákavost (absorpční koeficient) a tím snižuje kvalitu betonového recyklátu. Bylo ustanoveno, že nasákavost nesmí být víc než 7 % pro hrubé kamenivo a 10 % pro jemné kamenivo. Dále tato směrnice udává metodu a postup pro kontrolu kvality. V nových betonových směsích se může použít až 100 % hrubého betonového recyklátu a 50 % směsi hrubého a jemného betonového recyklátu za předpokladu, že je vyloučené působení mrazu na takovouto betonovou směs. Maximální množství betonového recyklátu, při kterém nejsou výrazně změněny vlastnosti betonové směsi, je méně než 30 %. [19]

Austrálie

V Austrálii existuje předpis AS 1141, který definuje betonový recyklát jako hrubé částice s objemovou hmotností vyšší než $2\,100\text{ kg/m}^3$ s maximálním obsahem 2 % cizích látek. Maximální obsah recyklovaného kameniva je 20 % (směrnice VBT 1995). Nejvyšší povolené množství je až 30 %, ale s omezenou použitelností např. jen v betonových obrubnicích a chodnicích. [19]

1.4 Shrnutí současného stavu

Současný vývoj lidstva a rozvoj průmyslu se vyznačuje zvýšeným množstvím odpadů. Ukládání odpadů na skládky znamená značný zábor půdy. Proto se rozvíjí technologie, které využívají recykláty. Tím dochází k značné úspoře primárních surovin.

Recykláty je možné využít v celé řadě činností spojených s výstavbou nebo rekonstrukcí, ale jejich plnohodnotné využití zatím není zajištěno. Hlavními důvody je stále nedůvěra spotřebitelů a v druhé řadě kvalita recyklátů, která se ovšem s dobou a nástupem nových technologií posunuje značně kupředu. Možné způsoby využití základních recyklátů jsou tyto:

- Recyklace z betonů – zásypové a násypové materiály, podkladní vrstvy pod základové konstrukce, podkladní materiál pod silnice či železnice, jako kamenivo do nových betonových směsí, jako kamenivo do živičných směsí, terénní úpravy
- Recyklace skla – skleněné obaly, tepelné izolace
- Recyklace keramických prvků – výroba cihlobetonu, plnivo do malt, výroba antuky, výroba drenážního betonu
- Asfalty – podkladní vrstvy pro méně zatěžované vrstvy

Podle původního odpadního materiálu existuje několik druhů recyklátů. Mezi nejrozšířenější recyklovaný materiál patří betonový recyklát. Recyklační směs získaná drcením a tříděním betonu musí obsahovat min. 90 % betonu, max. 6 % směsi pálených zdělicích prvků a přírodního kamene, max. 1 % skla a max. 3 % ostatních cizorodých částic. Díky svým fyzikálně-mechanickým vlastnostem, které se podobají přírodnímu kamenivu, se nabízí možnost jeho dalšího využití. Vhodným využitím betonových recyklátů jsou zejména dopravní stavby, kde jsou použitelné do jednotlivých vrstev komunikací a slouží k obnově, rekonstrukci, ale i pro stavbu nových vozovek, mostů, obrubníků apod. Tyto recykláty musí splňovat požadavky, které jsou kladeny na primární stavební hmoty používané při výstavbě komunikací. Pro jejich další použití je žádoucí znalost jejich aktuálních vlastností, které jsou zjišťovány pomocí laboratorních zkoušek. Největším problémem využití betonových recyklátů je ovšem:

- výskyt proměnných vlastností
- neznalost stáří

- neznalost složení
- neznalost vystavenému prostředí (chemické, mechanické)

Ve vybraných zemích můžeme pozorovat snahu o zpětné využití recyklovaných materiálů do jednotlivých vrstev pozemních komunikací, což je dokázáno zmíněním ve směrnících, normách či předpisech každé země. Ve většině zemí jsou ale specifikace betonového recyklátu velmi obecné a odlišné. V České republice je betonový recyklát uveden v TKP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací, které odkazují na další normy například ČSN 933-11 Zkoušení geometrických vlastností kameniva Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva nebo ČSN EN 1262+A1 Kamenivo do betonu. Bylo by však vhodné vytvořit konkrétní technické podmínky pro použití betonového recyklátu Rc s ohledem na místní klimatické podmínky a ostatní národní specifikace.

Tabulka 4 - Souhrn vybraných požadavků na vlastnosti recyklovaného kameniva v jednotlivých státech

Země	Vlastnosti			
	Složení [% hmotnosti]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]	Obsah jemných částic [%]
Belgie	≥ 95 % drceného betonu	≥ 2200	≤ 10 ± 2	1,5
Německo	≥ 90 % drceného betonu	≥ 2000	≤ 10	-
Nizozemsko	≥ 95 % drceného betonu	-	-	1
Portugalsko	≥ 90 % drceného betonu	≥ 2200	≤ 7	4
Česká republika	≥ 90 % drceného betonu	≥ 2000	≤ 10	-

Zdroj: [21]

2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Úkolem diplomové práce bylo shromáždění informací o podkladních vrstvách pozemních komunikací a recyklovaných materiálech, zvláště pak o betonovém recyklátu a jeho možném využití ve stmelených podkladních vrstvách.

Na základě analýzy současného stavu poznání bude provedeno zjišťování vlastností použitých recyklovaných materiálů (betonový recyklát) a vlastní měření na zkušebních vzorcích, které bude zaměřeno na zjištění mechanických a fyzikálních vlastností vyrobených směsí podkladních vrstev stmelených cementem (čerstvé i ztvrdlé směsi).

Hlavními cíly diplomové práce bude:

- Zjištění a klasifikace geometrických a fyzikálních vlastností použitých betonových recyklátů v porovnání s kamenivem (zrnitost – síťový rozbor, klasifikace složek betonových recyklátů, nasákavost, tvarový index, trvanlivost – stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování)
- Klasifikace ztvrdlých stmelených směsí cementem (objemová hmotnost, odolnost proti působení mrazu a vodě, pevnost v prostém tlaku)
- Ověření proveditelnosti zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi cementem při cyklickém střídání teplot za působení CHRL na odřezech z válců z důvodu výskytu lokálních poruch krytů vozovek PK
- Finanční analýza receptury stmelené směsi cementem při použití kameniva a betonového recyklátu

V závěru práce bude provedeno vyhodnocení vlastního měření na použitých betonových recyklátech a na vyrobených zkušebních vzorcích. Zjištěné vlastnosti budou následně vyhodnoceny a porovnány podle platných předpisů a norem. Na jejich základě bude určena vhodnost použití tohoto druhotného materiálu pro liniovou stavbu a další doporučení pro další vědecké práce.

3 METODY MĚŘENÍ VLASTNÍHO EXPERIMENTU

V této části diplomové práce je popsáno složení použité receptury, podle které byly vyrobeny tři stmelené směsi hydraulickým pojivem. Hydraulickým pojivem je zvolen a použit Portlandský struskový cement CEM II/A-S - 42,5 R z cementárny CEMEX Prachovice. Podle receptury je plnivem první směsi použito standardně drcené kamenivo a vyrobená směs je nazvána jako referenční - REF. V druhé a třetí směsi je drcené kamenivo nahrazeno betonovým recyklátem, který pochází z odlišných skládek stavebního a demoličního materiálu. Takto vyrobené směsi jsou označeny jako REC 1 a REC 2. Na použitém drceném kamenivu a betonových recyklátech jsou provedeny zkoušky pro zjištění jejich vlastností (stanovení vlhkosti, stanovení zrnitosti, stanovení nasákavosti a objemové hmotnosti, stanovení tvaru zrn a stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování).

Obrázek 10 – *Frakce 8/16 a 16/22 použitých betonových recyklátů; REC 2 (obr. vlevo), REC 1 (obr. vpravo)*



Zdroj: [vlastní]

Dále je popsána příprava použité receptury včetně výroby zkušebních těles. Následně po vytvrnutí zkušebních těles jsou popsány provedené zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem (objemová hmotnost, odolnost směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě, pevnost v prostém tlaku a odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek).

3.1 Použité směsi a jejich výroba

Pro možnost porovnání vyrobených zkušebních těles byla vybrána jedna společná receptura stmelené směsi hydraulickým pojivem s označením SC 0/22; C_{8/10}; ČSN 73 6124-1. Tato receptura byla získána od akreditované laboratoře Ústavu stavebního zkušebnictví s.r.o.,

sídlem Pardubice. Stmelená směs podle receptury obsahovala hydraulické pojivo, plnivo a vodu. Hydraulickým pojivem byl zvolen a použit Portlandský struskový cement CEM II/A-S - 42,5 R z cementárny CEMEX Prachovice. Plnivem bylo použito přírodní drcené kamenivo v referenční směsi a dva různé betonové recykláty náhradou za frakce drceného kameniva z referenční směsi. Betonové recykláty byly získány ze dvou různých recyklačních středisek stavebního a demoličního odpadu. Ani v jedné stmelené směsi nebyly použity chemické přísady a příměsi. Podle získané receptury byly vyrobeny tři směsi.

Tabulka 5 – Návrh složení receptury SC 0/22; C_{8/10}; ČSN 73 6124-1

Návrh složení směsi		
Pevnostní třída R _{ck}	[N/mm ²]	C _{8/10}
Pevnost v tlaku	[N/mm ²]	10
Návrhová pevnost v tlaku	[N/mm ²]	11,5
		Zastoupení [%]
Frakce [mm]	0/4	50,00
	8/16	22,00
	16/22	28,00
Cement	Cem 42,5 R	5,10
Vodní součinitel	w _v	0,95

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 11 – Vyrobená stmelená směs cementem



Zdroj: [vlastní]

Referenční stmelená směs cementem - REF

Plnivem referenční stmelené směsi cementem bylo použito standardní přírodní drcené kamenivo, které bylo zakoupeno v betonárně CEMEX PARDUBICE - Semtín. Toto kamenivo bylo ve třech frakcích 0/4, 8/16 a 16/22 podle použité receptury. Frakce 0/4 pocházela ze štěrkovny Čeperka. Frakce 8/16 pocházela z lomu Žumberk. Frakce 16/22 pocházela z kamenolomu Zdechovice.

Stmelená směs cementem I. s využitím betonového recyklátu – REC 1

Plnivem této stmelené směsi cementem byl použit betonový recyklát ze skládky stavebního a demoličního odpadu. Tento betonový recyklát byl použit jako náhrada za standardní drcené přírodní kamenivo. Původní betonový recyklát byl získán ve frakci 0/32. Pro použití do experimentu musel být tento betonový recyklát vytríděn na dvě frakce 8/16 a 16/22, které byly následně použity na výrobu stmelené směsi cementem. Frakce 0/4 pocházela ze štěrkovny Čeperka.

Stmelená směs cementem I. s využitím betonového recyklátu – REC 2

Plnivem této stmelené směsi cementem byl použit betonový recyklát ze skládky stavebního a demoličního odpadu. Tento betonový recyklát byl použit jako náhrada za standardní drcené přírodní kamenivo. Původní betonový recyklát byl získán ve frakci 8/32. Pro použití do experimentu musel být tento betonový recyklát vytríděn na dvě frakce 8/16 a 16/22, které byly následně použity na výrobu stmelené směsi cementem. Frakce 0/4 pocházela ze štěrkovny Čeperka.

Výroba stmelených směsí cementem

Pro namíchání stmelených směsí cementem v laboratoři byla použita míchačka MSH 70 s nuceným oběhem. K navážení jednotlivých složek směsí byly použity laboratorní váhy Matest s přesností 0,1 g. Po navážení jednotlivých složek směsi, byly suché složky jako kamenivo, betonový recyklát a cement nasypány do míchačky a promíchány. Po důkladném promíchání suchých složek byla do míchačky přidána připravená voda. Doba na promíchání všech složek čerstvé směsi byla přibližně 5 minut.

Obrázek 12 – Míchačka MSH 70



Zdroj: [vlastní]

3.2 Výroba zkušebních těles

Po namíchání stmelěných směsí v míchačce MSH 70 s nuceným oběhem byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byly po vytvrdnutí zjišťovány vlastnosti použitých směsí. Namíchané stmelené směsi cementem byly ukládány do předem vyčištěných a vymazaných forem. Norma ČSN EN 13286-50 udává metodu hutnění a k ní odpovídající formy pro výrobu zkušebních těles. Pro výrobu zkušebních těles tvaru válce byly použity jako formy široké Proctorovy moždíře (B) o průměru $150,0 \pm 1,0$ mm a výšce $120,0 \pm 1,0$ mm.

Obrázek 13 – Široké Proctorovy moždíře



Zdroj: [vlastní]

Kvůli malému počtu forem Proctorových moždířů (B) byly použity i formy tvaru válce o stejném průměru 150 mm, ale o výšce 300 mm. Z těchto válců byly po 28 dnech tvrdnutí nařezány válce o stejné výšce, jako válce z normových forem. Další zkušební tělesa, která byla vytvořena, byla tělesa tvaru krychle o délkách hran 150 mm.

Hutnící práce vyrobených stmelěných směsí cementem ve formách odpovídala hutnění Proctor modifikovaný (B). Vyrobená stmelěná směs cementem byla ve formách hutněna pěsthem. Hutnící pěst (B) byl použit podle Tabulka 15 – *Hlavní požadavky na pěsthy* (str. 62).

Obrázek 14 – Hutnící pěst (B)



Zdroj: [vlastní]

Před výrobou zkušebních těles stmelěné směsi cementem bylo nutné zjistit optimální vlhkost, při které bude směs maximálně zhutněná. K tomu účelu byla použita Proctorova zkouška, pomocí které byla zjištěna optimální vlhkost každé směsi. Postup této zkoušky je blíže popsán v části Zkoušení čerstvé stmelěné směsi cementem. Na základě výsledků této zkoušky byla namíchána stmelěná směs cementem a z ní vyhotovena zkušební tělesa.

Obrázek 15 – Ruční hutnění stmelěné směsi cementem pomocí hutnícího pěsthu (B)



Zdroj: [vlastní]

Výroba zkušebních těles stmelené směsi cementem tvaru válce v normových formách Proctorova moždíře (B) probíhala následujícím postupem. Moždír s nástavcem byl připevněn na základní desku a umístěn na rovný podklad. Po sestavení celé sestavy byl její vnitřek vymazán formovacím olejem. Do moždíře byla vkládána namíchaná stmelená směs cementem v takovém množství, aby po zhutnění zaplnila více než jednu pětinu výšky tělesa moždíře. Hutnění probíhalo 56 údery pěchu o hmotnosti 4,5 kg, který dopadal z výšky 457 mm nad povrchem směsi při řízení vodící tyčí. Jednotlivé údery byly rozděleny rovnoměrně po obvodu. Tento postup byl opakován ještě čtyřikrát, aby množství směsi naplnilo těleso moždíře a povrch směsi nebyl více než 10 mm nad horním okrajem tělesa moždíře. Následně byl sejmут nástavec, byla odstraněna přebytečná směs a povrch zhutněné směsi byl zarovnan s okrajem moždíře. Hrubé částice, které byly odstraněny během procesu zarovnání, byly nahrazeny jemnějšími částicemi, které byly snadno vtlačeny dovnitř. Následně byl na zarovnaný povrch přiložen igelitový sáček, aby nedocházelo k odpařování vody ze stmelené směsi cementem.

Obrázek 16 – Vyrobená zkušební tělesa ve formách zakrytá igelitovými sáčky



Zdroj: [vlastní]

Výroba zkušebních těles stmelené směsi cementem tvaru válce o výšce 300 mm byla prováděna ve snadno dostupných formách pro výrobu betonových válců. Vzhledem k jejich více jak dvojnásobné výšce než u normových forem, byla namíchaná stmelená směs cementem hutněna v deseti vrstvách obdobným způsobem, jako normové válcové formy Proctorových moždířů.

Výroba zkušebních těles stmelené směsi cementem tvaru krychle byla prováděna a hutněna obdobným způsobem, jako normové válcové formy Proctorových moždířů.

Tabulka 6 – Počty vytvořených zkušebních těles všech tří směsí

Tvary zkušebních těles	Referenční směs REF	Stmelená směs REC 1	Stmelená směs REC 2
Válec (120x150)	6	6	6
Válec (300x150)	5	5	5
Krychle (150x150)	3	3	3

Zdroj: [vlastní]

Takto vyhotovená zkušební tělesa byla ponechána na rovném podkladu po dobu 24 hodin. Po této době byla zkušební tělesa vyjmuta z použitých forem, zvážena na laboratorních váhách a zaznamenána jejich hmotnost. Následně byla vyhotovená zkušební tělesa připravena k procesu zrání. Příprava spočívala v nasycení vodou zkušebního tělesa ponořením do kbelíku s vodou a ponechání v něm po dobu přibližně 4 minut. Po uplynutí dané doby byla vyhotovená zkušební tělesa zabalena do smršťovací folie a ponechána ve vlhkém prostředí po dobu zrání (28 dní). Každých 7 dní z doby zrání byla tělesa vizuálně kontrolována, zda nedošlo ke snížení vlhkosti v jejich vlhkém prostředí. Když bylo zjištěno, že došlo ke snížení vlhkosti, byl otevřen obal zabalených zkušebních těles a na vzorek byla aplikována vodní mlha pomocí rozprašovače. Následně byla zkušební tělesa znovu zabalena smršťovací folií.

Obrázek 17 – Zabalená zkušební tělesa ve folii během zrání (vlevo), vyhotovené zkušební těleso při odformování (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Po uplynutí doby zrání bylo ze zkušebních těles tvaru válce o výšce 300 mm nařezáno po dvou válcích o výšce 120 mm pomocí okružní pily s diamantovým kotoučem. Takto připravená zkušební tělesa byla po uplynutí doby zrání připravena k dalšímu zkoušení. Zbylé odřezy válců o výšce přibližně 60 mm byly zkráceny na výšku 50 mm a dále připraveny pro zkoušku odolnosti povrchu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám, které je popsáno v popisu dané zkoušky.

Tabulka 7 – Výsledné počty vytvořených zkušebních těles všech tří směsí

Tvary zkušebních těles	Referenční směs REF	Stmelená směs REC 1	Stmelená směs REC 2
Válec (120 x 150) neřezané - normové	6	6	6
Válec (120 x 150) řezané	10	10	10
Krychle (150 x 150)	3	3	3
Odřezy (50 x 150)	3	3	3

Zdroj: [vlastní]

3.3 Provedené zkoušky experimentu

Provedené zkoušky experimentu byly rozděleny na zkoušky betonového recyklátu a kameniva, zkoušku čerstvé stmelené směsi cementem a zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem.

Zkoušky betonového recyklátu a kameniva byly provedeny před namícháním čerstvých stmelených směsí cementem za účelem zjištění vlastností použitého betonového recyklátu a kameniva. Zkouška čerstvé stmelené směsi cementem byla provedena po namíchání směsi a vyhodnocena před výrobou zkušebních těles. Tato zkouška sloužila ke zjištění optimálních vlhkostí při maximální míře zhutnění pro výsledné stmelené směsi cementem, podle kterých pak byla vyrobena zkušební tělesa. Zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem byly provedeny na zkušebních vzorcích po vytvrdnutí, kterými byly zjištěny rozměry zkušebních vzorků a vlastnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem.

3.3.1 Zkoušky betonového recyklátu a kameniva

V této části práce je popsáno zjištění a klasifikace vlastností použitých betonových recyklátů a kameniva (zrnitost – síťový rozbor, složky betonových recyklátů, nasákavost, tvarový index, trvanlivost – stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování).

Zkoušky betonového recyklátu a kameniva byly provedeny podle platných norem uvedených u popisu každé zkoušky.

a) Stanovení vlhkosti sušením v sušárně

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 1097-5: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně. Podstatou zkoušky sušením v sušárně umožňuje zjistit celkovou volnou vodu ve zkušební navážce betonového recyklátu a drceného kameniva, která může být z povrchu i z pórů. Obsah vlhkosti se stanoví jako rozdíl hmotností mezi vlhkým a suchým vzorkem a vyjádří se jako procento hmotnosti vysušené navážky.

Použité pomůcky:

Kbelík s víkem, zednická lžíce, laboratorní váhy, laboratorní misky, laboratorní sušárna Venticell 111

Obrázek 18 – Laboratorní sušárna Venticell 111



Zdroj: [vlastní]

Zkušební postup:

Zkušební navážka byla rozprostřena na vyčištěnou a vysušenou misku, která byla zvážena (M_2). Dále se zvážila miska s vlhkou zkušební navážkou a odečtením hmotnosti misek byla zjištěna hmotnost zkušební navážky (M_1). Misky byly vloženy do sušárny o teplotě $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ a byly v ní ponechány, dokud se jejich hmotnost neustálila (M_3).

Hodnota vlhkosti (w) byla vypočtena podle následujícího vztahu a zaokrouhlena na nejbližší 0,1 %:

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \cdot 100$$

W – vlhkost v [%]

M_1 – hmotnost zkušební navážky v [g]

M_3 – ustálená hmotnost vysušené zkušební navážky v [g], [22]

b) Stanovení zrnitosti - síťový rozbor

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. Podstatou této zkoušky je roztřídění a oddělení kameniva pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k počáteční hmotnosti vzorku.

Použité pomůcky:

Sada zkušebních sít, prosévací přístroj, laboratorní váhy, laboratorní sušárna Venticell 111, kbelík s vodou

Obrázek 19 – Prosévací přístroj s připravenými sítí



Zdroj: [vlastní]

Zkušební postup:

Příprava zkušebních navážek spočívala v navážení potřebné hmotnosti a vysušení při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Po vychladnutí na okolní teplotu byly zkušební navážky ihned zváženy a zaznamenaly se jejich hodnoty hmotnosti.

Dalším krokem bylo sestavení sady zkušebních sítí odpovídajících normové řadě vzestupně. Takto uspořádaný sloupec sítí obsahoval i dno a víko. Na takto připravený sloupec sítí byly zkušební navážky jednotlivě nasypány a mechanicky třeseno. Po setřesení byla jednotlivá síta postupně odebírána včetně posledního dna. Zachycený materiál byl vážen na laboratorních váhách a jejich hmotnosti byly zaznamenávány do tabulky k dalšímu vyjádření výsledků. Zachycená hmotnost na každém síti byla vypočítána jako procento k původní suché hmotnosti M_1 . Dále bylo vypočítáno souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k sítu 0,063 mm. Výsledek síťového rozboru byl vyjádřen graficky vynesemím do grafu zrnitosti. [23]

Použité betonové recykláty byly zkoušeny a vyhodnocovány podle Tabulka 8 – *Obor zrnitosti pro směsi z kameniva stmelené cementem typ 1*.

Tabulka 8 – Obor zrnitosti pro směsi z kameniva stmelené cementem typ 1

Síto [mm]	Propad zrn v % hmotnosti		
	Minimum	Maximum	Maximum
		kategorie G1	kategorie G2
31,50	100	100	100
20,00	85	100	100
10,00	55	83	88
6,30	42	70	77
4,00	32	61	69
2,00	23	48	58
0,50	11	28	36
0,25	8	21	29
0,063	3,5	11	18

Zdroj: [7]

c) Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 933-11: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva. Podstatou této zkoušky je ruční přebrání částic zkušební navážky hrubého

recyklovaného kameniva a zaznamenání do seznamu složek. Podíl každé složky ve zkušební navážce se stanoví a vyjádří jako procento hmotnosti, včetně podílu plovoucích částic.

Použité pomůcky:

Zkušební síta, laboratorní váhy, laboratorní misky, laboratorní sušárna Venticell 111, míchadlo, prosévací přístroj, suchý a savý hadr, odměrný válec, kbelík s víkem, píst do odměrného válce

Zkušební postup:

Příprava zkušební navážky spočívala v navážení potřebné hmotnosti a vysušení při teplotě $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti (M_0). Suchý vzorek byl prosypán na zkušebních sítích k úplnému oddělení částic větších než 4 mm. Zachycené částice na síti 63 mm byly zváženy a zaznamenala se jejich hmotnost M_{63} . Propadlé částice sítím 4 mm byly zváženy a zaznamenala se jejich hmotnost M_4 . Následně byly zachycené částice na sítích 63 mm a propadlé sítím 4 mm vyřazeny. Zachycené částice na síti 4 mm byly zváženy a zaznamenala se jejich hmotnost M_1 , která určovala hmotnost získané zkušební navážky pro další zkoušení.

Získaná zkušební navážka byla umístěna do vodotěsné nádoby (kbelík s víkem) naplněné vodou pro omytí částic a uvolnění plovoucích částic. Uvolněné plovoucí částice byly sesbírány a stanovil se jejich objem $V_{FL} [\text{cm}^3]$ vložním do odměrného válce naplněného známým objemem vody. Pomocí pístu bylo dosaženo úplného ponoření samotných částic.

Neplovoucí částice zkušební navážky byly vysušeny při teplotě $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Tyto vysušené částice byly následně rozprostřeny na rovném povrchu a rukou byly odděleny částice náležící do jednotlivých složek. Tyto složky byly umístěny do misky dohromady s nečistotami a jílem. Následně byla zjištěna hmotnost těchto částic a zaznamenána jako M_X .

Tabulka 9 - Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva

Označení	Popis
Rc	Beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky
Ru	Nestmelené kamenivo, přírodní kámen, hydraulicky stmelené kamenivo
Rb	Pálené zdící prvky (cihly, tvárnice), vápenopískové zdící prvky, neplovoucí pórobeton
Ra	Asfaltové materiály
Rg	Sklo
X	Jiné: Přilnavé (jíl a nečistoty)
	Různorodé: kovy (železné a neželezné)
	neplovoucí dřevo, plasty a pryž
	sádrová omítka

Zdroj: [11]

Zbylé neplovoucí částice byly zváženy a jejich hmotnost byla zaznamenána jako M_2 . Pro usnadnění rozřídění byl počet těchto částic redukován na nejméně 1 000 částic podle Tabulka 10 – *Hmotnost nejméně 1 000 částic* (str. 53).

Tabulka 10 – Hmotnost nejméně 1 000 částic

Velikost horního síta D	Minimální hmotnost
[mm]	[kg]
63	50
32	10
20	4
16	2
14	1
8	0,5

Zdroj: [11]

Dále byly zváženy neplovoucí částice zbylé k rozřídění a jejich hmotnost se zaznamenala jako M_3 . Tyto zbylé neplovoucí částice byly rozříděny na složky a jejich hmotnosti se zaznamenaly jako M_{Rc} , M_{Ru} , M_{Rb} , M_{Ra} a M_{Rg} .

Podíl jednotlivých složek byl vypočítán následujícím postupem a zaokrouhleny na jedno desetinné místo:

$$FL [\text{cm}^3/\text{kg}] = 1\,000 \times V_{\text{FL}} / M_1$$

$$X [\%] = 100 \times M_x / M_1$$

$$R_c [\%] = 100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{\text{Rc}} / M_3)$$

$$R_u [\%] = 100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{\text{Ru}} / M_3)$$

$$R_b [\%] = 100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{\text{Rb}} / M_3)$$

$$R_a [\%] = 100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{\text{Ra}} / M_3)$$

$$R_g [\%] = 100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{\text{Rg}} / M_3), [11]$$

Zkoumané betonové recykláty jsou klasifikovány podle *1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů* (TP 210) této práce a podle Tabulka 11 – *Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva* (ČSN EN 12620+A1) této práce.

Tabulka 11 – Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva

Složka	Obsah Procento hmotnosti	Kategorie
Rc	90	Rc ₉₀
	80	Rc ₈₀
	70	Rc ₇₀
	50	Rc ₅₀
	< 50	Rc deklarovaná
	bez požadavku	Rc _{NR}
Rc + Ru	90	Rcu ₉₀
	80	Rcu ₈₀
	70	Rcu ₇₀
	50	Rcu ₅₀
	< 50	Rcu deklarovaná
	bez požadavku	Rcu _{NR}
Rb	10	Rb ₁₀₋
	30	Rb ₃₀₋
	50	Rb ₅₀₋
	> 50	Rb deklarovaná
	bez požadavku	Rb _{NR}
Ra	1	Ra ₁₋
	5	Ra ₅₋
	10	Ra ₁₀₋
X + Rg		XRg _{0,5-}
		XRg ₁₋
		XRg ₂₋
	Obsah cm ³ /kg	
FL	0,2	FL _{0,2-}
	2	FL ₂₋
	5	FL ₅₋

Zdroj: [24]

d) Stanovení objemové vlhkosti a nasákavosti zrn kameniva a betonového recyklátu

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Podstatou této zkoušky je vypočítání objemové hmotnosti zrn z podílu hmotnosti a objemu. Hmotnost se stanoví zvážením vodou nasáklé povrchově osušené zkušební navážky a jejím opětovným zvážením po vysušení v sušárně. Objem se stanoví

z hmotnosti vytlačené vody. Norma popisuje dva způsoby, a to snížením hmotnosti metodou drátěným košem nebo vážením při pyknometrické metodě. Pro tuto zkoušku byla vybrána metoda pomocí drátěného koše.

Použité pomůcky:

Laboratorní váhy s možností vážení zavěšeného břemene (drátěný koš) ve vodě, drátěný koš, laboratorní sušárna Venticell 111, laboratorní teploměr, suché nasákové utěrky, kbelík s víkem, laboratorní misky

Zkušební postup:

Připravená zkušební navážka byla vložena do drátěného koše a byla ponořena do kbelíku s vodou tak, aby voda přesahovala horní okraj drátěného koše nejméně o 50 mm. Teplota vody byla zaznamenána u každé zkoušky. Ihned po ponoření byl odstraněn zachycený vzduch z připravené zkušební navážky tak, že byl jednou za sekundu drátěný koš zvednut zhruba 25 mm ode dna kbelíku a nechán klesnout. Toto bylo opakováno 25 krát. Následně byl ponechán zcela ponořený drátěný koš se zkušební navážkou ve vodě o teplotě $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ po dobu $(24 \pm 0,5)$ hod.

Po této době byl koš protřepán a zvážen ve vodě o teplotě $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$, která byla změřena a zaznamenána. Zvážená hmotnost byla zaznamenána a označena jako M_2 . Dále byl koš se zkušební navážkou vyndán z vody a ponechán několik minut okapat. Použitá zkušební navážka byla opatrně vysypána na suchou utěrku. Prázdný koš byl následně ponořen do vody, protřepán 25 krát a zvážen ve vodě. Zvážená hmotnost drátěného koše byla zaznamenána a označena jako M_3 . Povrch zkušební navážky byl osušen, dokud nezmizel viditelný vodní film, ale kamenivu zůstal mokrá vzhled. Následně byla zkušební navážka zvážena, její hmotnost zaznamenána a označena jako M_1 . Dále bylo toto kamenivo přesunuto do laboratorních misek, vloženo do laboratorní sušárny Venticell 111 a sušeno při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálení hmotnosti. Po dosažení ustálené hmotnosti byla zkušební navážka ponechána vychladnout na okolní teplotu a zvážena. Její hmotnost byla zaznamenána a označena jako M_4 .

Tímto postupem proběhlo zkoušení všech použitých zkušebních navážek kameniva a betonového recyklátu. Výpočet byl vyjádřen podle následujících vztahů:

- Objemová hmotnost zrn:
$$\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$
- Objemová hmotnost vysušených zrn v sušárně:
$$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$
- Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených:
$$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$
- Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě:
$$WA_{24} = \rho_w * \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4}$$

ρ_w – hustota vody při teplotě, která byla zaznamenána při stanovení M_2 v [Mg/m³]

M_1 – hmotnost vodou nasáklé a povrchově osušené zkušební navážky na vzduchu v [g]

M_2 – zdánlivá hmotnost koše s nasáklou zkušební navážkou ponořeného ve vodě v [g]

M_3 – zdánlivá hmotnost prázdného koše ve vodě v [g]

M_4 – hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky na vzduchu v [g]; [25]

Pro pevnostní třídu C_{8/10} stmelené směsi hydraulickými pojivy není stanovena hodnota nasákavosti. [24]

e) Stanovení tvaru zrn – tvarový index

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 933-4: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. Podstatou této zkoušky je rozřídění jednotlivých zrn ve vzorku na základě poměru jejich délky k tloušťce, pomocí dvou-čelistového posuvného měřítka. Tvarový index se následně vypočítá jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr rozměrů L/E je větší než 3 a vyjádří se jako procento k celkové hmotnosti zkoušených zrn ve zkušební navážce.

Použité pomůcky:

Posuvné měřítko, misky, laboratorní váhy, laboratorní sušárna Venticell 111

Zkušební postup:

Příprava zkušebních navážek pro tuto zkoušku spočívala v roztřídění vysušených zrn kameniva dostatečným protřepáním mezi síty 4 mm a 63 mm. Vysušení zkušebních navážek probíhalo v sušárně při teplotě $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$. Jiná zrna pro tuto zkoušku by nebyla vhodná.

Připravené jednotlivé zkušební navážky byly zváženy na laboratorních váhách a jejich hmotnosti zaznamenány jako M_1 . Následně byla pomocí posuvného měřítka posouzena délka L a tloušťka E každého zrna a zaznamenána do tabulky. Zrna, jejichž poměr rozměrů L/E byl větší než 3, byla oddělena do misky. Tato zrna byla označena jako nekubická. Tyto nekubická zrna byla následně zvážena na laboratorních vahách a jejich hmotnosti zaznamenány jako M_2 .

Výsledek této zkoušky, zaokrouhlený na celé číslo, byl vyjádřen pomocí tvarového indexu SI a vypočítán podle následujícího vztahu:

$$SI = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) * 100$$

SI – tvarový index

M_1 – hmotnost zkušební navážky v [g]

M_2 – hmotnost nekubických v [g], [26]

Pro pevnostní třídu $C_{8/10}$ stmelené směsi hydraulickými pojivy je hodnota tvarového indexu stanovena jako SI_{55} . [8]

Tabulka 12 – Kategorie pro maximální hodnoty tvarového indexu

Tvarový index	Kategorie SI
≤ 15	SI_{15}
≤ 20	SI_{20}
≤ 40	SI_{40}
≤ 55	SI_{55}
> 55	$SI_{\text{deklarovaná}}$
bez požadavku	SI_{NR}

Zdroj: [27]

f) Trvanlivost - Stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 1367-1: Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování. Podstatou této zkoušky je vystavení vodou nasáklé zkušební navážky 10 cyklům zmrazování a rozmrazování. Zkoumané kamenivo se přezkoumá po ukončení zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, zda nenastaly nějaké změny (výskyt trhlin, úbytek hmotnosti).

Použité pomůcky:

Automatické cyklovací zařízení KD 20.3 od firmy Elektro Komárek, laboratorní sušárna Venticell 111, váhy, kovové nádoby, zkušební síta

Kovové nádoby pro tuto zkoušku nebylo možné si zapůjčit, proto musely být vyrobeny podle platné normy z bezešvých trubek z nerezavějící oceli o tloušťce stěn cca 0,6 mm s vnitřním průměrem 130 mm a vnitřní výšce 180 mm.

Zkušební postup:

Pro tuto zkoušku se použily tři jednotlivé dílčí navážky s vhodnou frakcí 8/16 podle tabulky. Dílčí navážky se promyly a odebraly odplavitelné částice. Dále se vysušily v sušárně při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, nechaly se vychladnout na okolní teplotu a následně se zvažily s přesností $\pm 0,2 \text{ g}$ (M_1). Připravené dílčí navážky se nechaly nasakovat po dobu 24 hodin při teplotě $20 ^\circ\text{C}$ v destilované vodě v kovových nádobách, ve kterých byla hladina vody nejméně 10 mm nad dílčí navážkou.

Po uplynutí doby nasakování se zkontrolovala hladina vody v každé nádobě a nádoby byly přikryty poklicemi. Následně byly kovové nádoby s dílčími navážkami přesunuty do automatického cyklovacího zařízení KD 20.3 v laboratoři VVCD a zkontrolována jejich poloha a umístění vůči sobě a okolním stěnám (ne blíže než 50 mm). Uprostřed automatického cyklovacího zařízení byla umístěna jedna kovová forma s dílčí navážkou a do ní zavedeno jedno teplotní čidlo, které sledovalo teplotní křivku v tolerančních mezích.

V automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3 bylo nastaveno 10 sérií zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů postupem:

- 1) Teplota byla snížena z $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ na $(0 \text{ až } -1) \text{ }^\circ\text{C}$ během (150 ± 60) minut a udržovala se na teplotě $(0 \text{ až } -1) \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu (210 ± 90) minut.
- 2) Teplota byla snížena z $(0 \text{ až } -1) \text{ }^\circ\text{C}$ na $(-17,5 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$ během (180 ± 60) minut a udržovala se na teplotě $(-17,5 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu nejméně 240 minut.
- 3) Podmínka neklesnutí teploty vzduchu pod $-22 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 4) Po ukončení každého zmrazovacího cyklu byly kovové nádoby rozmrazovány pod vodou o teplotě přibližně $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Každé rozmrazování bylo ukončeno při dosažení teploty $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$.
- 5) Po ukončení každého rozmrazování mohly zůstat kovové nádoby ponořeny ve vodě o teplotě $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ nejdéle 10 hodin. Každý zmrazovací a rozmrazovací cyklus musí být ukončen během 24 hodin.

Po dokončení desátého cyklu se obsah každé kovové nádoby vložil na síto mající velikost otvorů poloviny velikosti otvorů dolního síta, které bylo použito pro přípravu dílčí navážky, v našem případě síto velikosti otvorů 4 mm. Následně byly dílčí navážky na tomto síti ručně promyty a prosypány. Zůstatek na tomto síti byl vložen do sušárny a vysušen při teplotě $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Po vychladnutí na okolní teplotu se ihned zvážil a zaznamenala se hodnota hmotnosti (M_2).

Vypočetla se hodnota podsítného sloučením zůstatků na sítích tří dílčích navážek, zvážila se a vyjádřila se hmotnost v procentech hmotností sloučených navážek. Výsledek zkoušky zmrazování a rozmrazování (F) se vypočte podle vztahu níže.

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100$$

F – procentní úbytek hmotností tří dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování

M_1 – počáteční vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek v [g]

M_2 – konečná vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, které zůstaly na specifikovaném síti v [g], [28]

Pro pevnostní třídu $C_{8/10}$ stmelené směsi hydraulickými pojivy je hodnota odolnosti proti zmrazování a rozmrazování stanovena jako F_4 . [8]

Tabulka 13 – Kategorie pro maximální hodnoty odolnosti proti zmrazování a rozmrazování

Zmrazování a rozmrazování Procenta ztráty hmotnosti	Kategorie F
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 4	F ₄
> 4	F _{deklarovaná}
bez požadavku	F _{NR}

Zdroj: [24]

3.3.2 Zkoušky čerstvé stmelené směsi cementem

V této části práce je popsána zkouška čerstvé stmelené směsi cementem za účelem zjištění optimálních vlhkostí, podle kterých byly vyrobeny stmelené směsi.

Tato zkouška byla provedena podle platné normy uvedené u popisu použité zkoušky.

a) Proctorova zkouška

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 13286-2: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Tato norma popisuje šest podobných zkoušek zhutnitelnosti. U standardní Proctorovy zkoušky se používá pěch o hmotnosti 2,5 kg a u modifikované Proctorovy zkoušky 4,5 kg nebo 15 kg. Podstatou této zkoušky je zjištění optimální vlhkosti stmelené směsi cementem při její maximální míře zhutnění.

Použité pomůcky:

Moždíř se základnou a nástavcem, automatický hutnicí stroj Controls, laboratorní váhy, ploché hladítko, laboratorní misky, laboratorní sušárna Venticell 111, zednická lžice

Zkušební postup:

Pro tuto zkoušku byla použita metoda modifikované Proctorovy zkoušky (B). Pro tuto metodu norma ČSN EN 13286-2 udává, který moždíř použít. Rozměry použitého širokého Procotorova moždíře (B) jsou uvedeny v **Tabulka 14 – Rozměry moždířů** (str. 62).

Tabulka 14 – Rozměry moždířů

Proctorův moždíř	Průměr d_1	Výška h_1	Tloušťka	
			Stěna t_w	Základní deska t
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A	$100,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$7,5 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,5$
B	$150,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$9,0 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$
C	$200,0 \pm 1,0$	$200,0 \pm 1,0$	$14,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$

Zdroj: [29]

Vybraný široký Proctorův moždíř byl nejdříve připevněn na základní desku a na něj umístěn nástavec. Celá sestava byla vyčištěna a vymazána, aby byla připravena pro vkládání čerstvé stmelené směsi cementem, která byla namíchána v míchačce MSH 70 s nuceným oběhem. Všechny použité směsi (REF, REC 1, REC 2) byly namíchány v pěti záměsích. Do jednotlivých záměsů bylo přidáváno různé množství vody. Důvodem bylo získání dostatečného počtu bodů pro určení optimální vlhkosti jednotlivé směsi.

Hutnicí práce vyrobených stmelných směsí cementem ve formách odpovídala hutnění Proctor modifikovaný (B). Vyrobená směs byla ve formách hutněna pěchem. Hutnicí pěch (B) byl použit podle **Tabulka 15 – Hlavní požadavky na pěchy** (str. 62).

Tabulka 15 – Hlavní požadavky na pěchy

Pěch	Hlavní požadavky		
	Hmotnost pěchu m_R	Průměr základu d_2	Výška dopadu h_2
	[kg]	[mm]	[mm]
A	$2,50 \pm 0,02$	$50,00 \pm 0,5$	305 ± 3
B	$4,50 \pm 0,04$	$50,00 \pm 0,5$	457 ± 3
C	$15,00 \pm 0,04$	$125,00 \pm 0,5$	600 ± 3

Zdroj: [29]

Pro tuto zkoušku bylo využito hutnění automatického zhutňovacího stroje Proctor. Proctorova zkouška probíhala následujícím postupem. Vymazaná sestava byla umístěna a připevněna do automatického zhutňovacího stroje. Do moždíře byla vkládána namíchaná stmelená směs cementem v takovém množství, aby po zhutnění zaplnila více než jednu pětinu výšky tělesa moždíře. Hutnění probíhalo 56 údery pěchu o hmotnosti 4,5 kg, který dopadal z výšky 457 mm nad povrchem směsi při řízení vodící tyčí. Jednotlivé údery byly rozděleny

rovnoměrně po obvodu. Tento postup byl opakován ještě čtyřikrát, aby množství směsi naplnilo těleso hmoždíře a povrch směsi nebyl více než 10 mm nad horním okrajem tělesa moždíře. Následně byl sejmут nástavec, byla odstraněna přebytečná směs a povrch zhutněné směsi byl zarovnan s okrajem moždíře. Hrubé částice, které byly odstraněny během procesu zarovnání, byly nahrazeny jemnějšími částicemi, které byly snadno vtlačeny dovnitř. Dále byl moždíř se základní deskou a spolu se zhutněnou směsí zvážen na laboratorních vahách. Zhutněná směs byla vyjmuta z moždíře. Z prostředku byl odebrán vzorek a vložen do laboratorní misky. Odebraný vzorek byl rozprostřen na vyčištěnou a vysušenou misku, která byla zvážena. Dále se zvážila miska s vlhkou zkušební navázkou a odečtením hmotnosti misek byla zjištěna hmotnost odebraného vzorku. Miska byla vložena do sušárny o teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a byla v ní ponechána do ustálení její hmotnosti. Po ustálení hmotnosti byla miska s vysušeným vzorkem zvážena a její hmotnost zaznamenána. [29]

Tímto způsobem byla zkouška zhutnitelnosti provedena pro všech pět záměsí všech tří směsí. Zjištěné vlhkosti byly vyneseny do grafu, ze kterého se odečetla optimální vlhkost (w_{opt}) při maximální objemové hmotnosti ($\rho_{\text{d max}}$). Podle zjištěných optimálních vlhkostí jednotlivých směsí byly namíchány jednotlivé výsledné směsi pro výrobu zkušebních těles.

Obrázek 20 - Automatický hutnicí stroj Controls pro Proctorovu zkoušku



Zdroj: [vlastní]

3.3.3 Zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem

V této části práce je popsána klasifikace ztvrdlých stmelených směsí cementem (objemová hmotnost, pevnost v prostém tlaku), zjištění odolnosti povrchu stmelené směsi cementem při cyklickém střídání teplot za působení CHRL na odřezech z válců a také finanční analýza receptury stmelené směsi cementem při použití kameniva a betonového recyklátu.

Zkoušky ztvrdlé stmelené směsi cementem byly provedeny podle platných norem uvedených u popisu každé zkoušky.

a) Objemová hmotnost ztvrdlé stmelené směsi cementem

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Podstatou této zkoušky je stanovení hmotnosti a objemu zkušebního tělesa a z následných údajů se stanoví výsledná objemová hmotnost ztvrdlé stmelené směsi cementem.

Tato zkouška byla provedena za účelem zjištění rozměrů a ověření hmotnosti vyrobených zkušebních těles stmelené směsi cementem, že rozdíl hmotností není o více než 2% hmotnosti při výrobě.

Použité pomůcky:

Laboratorní váhy, posuvné měřítko.

Zkušební postup:

Objemová hmotnost byla zjištěna metodou výpočtu ze změřených skutečných rozměrů zkušebního tělesa ztvrdlé stmelené směsi cementem. Pro tuto metodu výpočtu byl objem vypočítán z rozměrů změřených pomocí posuvného měřítka. Výsledná objemová hmotnost ztvrdlé stmelené směsi cementem byla zaokrouhlena na nejbližších 10 kg.m⁻³ a byla dána následujícím vztahem.

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

D – objemová hmotnost ztvrdlé stmelené směsi cementem v [kg.m⁻³]

V – objem stanovený změřených skutečných rozměrů zkušebního tělesa v [m³]

$D_{1,2,3}$ – rozměry krychle, válce v [mm]

H – výška válce v [mm]

m – hmotnost zkušební tělesa v podmínkách v době zkoušení v [kg], [30]

b) Odolnost směsí stmelých hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě

Tato zkouška byla provedena podle platné normy přílohy A - ČSN 73 6124-1: Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelých hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody.

Použité pomůcky:

Mrazicí skříň – mrazák GORENJE, laboratorní váhy, plstěná podložka

Zkušební postup:

Pro tuto zkoušku byla použita vyrobená zkušební tělesa tvaru válce o výšce 120 mm. Po skončení 28 denního zrání ve vlhkém prostředí byla zkušební tělesa umístěna na plstěnou podložku, aby nepřišly k přímému styku s vodou. Plstěná podložka byla částečně ponořena ve vodě a nechala se kapilárně nasytit do ustálené hmotnosti. Po nasycení vodou byla zkušební tělesa uložena do mrazicí skříně na dobu $(6 \pm 0,5)$ hodin při teplotě (-20 ± 2) °C. Po zmrazení byla zkušební tělesa vyjmuta z mrazicí skříně a uložena na dobu $(18 \pm 0,5)$ hodin zpět na plstěnou podložku částečně ponořenou ve vodě tak, aby docházelo k jejich dalšímu kapilárnímu nasycování vodou při teplotě (20 až 25) °C. Zkouška pokračovala dalším zmrazováním a následným rozmrazováním podle **Tabulka 16 – Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování** (str. 65). Počet cyklů zatěžování vyrobených zkušebních těles stmelé směsi cementem bylo provedeno 16 cyklů, tedy maximální počet. [31]

Tabulka 16 – Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování	Počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti		
		[°C x den]		
	[°C]	do 350	350 až 600	nad 600
horní podkladní vrstva	$- 20 \pm 2$	10	13	16
spodní podkladní vrstva	$- 15 \pm 2$	7	10	13

Zdroj: [31]

c) Pevnost v tlaku zkušebních těles

Tato zkouška byla provedena podle platné normy ČSN EN 13286-41: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsi stmelených hydraulickými pojivy. Zkušební tělesa tvaru krychle a válce byla zatěžována ve zkušebním lisu až do porušení. Z maximálního zatížení při rozdrčení zkušebních těles byly vypočteny pevnosti v tlaku stmelené směsi cementem.

Použité pomůcky:

Zkušební lis Matest s řídicí jednotkou Servotronic, tavicí kotlík Controls, laboratorní váhy

Obrázek 21 – Zkušební lis Matest s řídicí jednotkou Servotronic



Zdroj: [vlastní]

Zkušební postup:

Pro tuto zkoušku ztvrdlé stmelené směsi cementem byla vytvořena zkušební tělesa ve tvaru válce a krychle.

Zkušební tělesa byla zkoušena ve zkušebním lisu po 28 dnech tvrdnutí ve vlhkém prostředí. Zkušební tělesa tvaru válce byla nejdříve koncována sirnou maltou, která byla roztavena v tavicím kotlíku.

Obrázek 22 – Tavicí kotlík *CONTROLS* pro koncování sirnou maltou (vlevo), podstavec s držákem válcového zkušební tělesa (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Po vytvrnutí sirné malty byla zkušební tělesa vložena do lisu a vystředěna na spodní tlačené desce. Zkušební tělesa tvaru krychle byla zatěžována kolmo na směr ukládání a hutnění stmelené směsi. Po zkontrolování uložení každého tělesa byla nastavena konstantní rychlost zatěžování zkušebních těles hodnotou $0,4 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Po porušení zkušební tělesa byla zkouška ukončena a odečtena se hodnota maximálního zatížení. Následně bylo zkušební těleso vyjmuté ze zkušební lisu a bylo zkontrolováno, zda nedošlo k jeho nevyhovujícímu porušení.

Výsledná hodnota pevnosti v tlaku R_c [MPa] byla dopočítána z hodnoty zatížení při porušení zkušební tělesa podle vztahu:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

R_c – pevnost v tlaku v [MPa]

F – maximální zatížení při porušení v [N]

A_c – průřezová plocha zkušební tělesa v $[\text{mm}^2]$, na kterou působilo zatížení a která byla určena ze změřených rozměrů jednotlivých zkušebních těles

Výsledná pevnost v prostém tlaku byla přenásobena koeficientem zohledňující poměr výšky k průměru zkušební tělesa. [32]

Obdobným způsobem byla zkoušena zkušební tělesa tvaru válce po zkoušce odolnosti stmelené směsi proti působení mrazu a vodě. Kritériem u této zkoušky je, aby pevnost

v prostém tlaku po zkoušce odolnosti stmelené směsi proti působení mrazu a vodě nebyla menší než 85 % pevnosti po 28 dnech.

d) Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Tato zkouška byla provedena C. Metodou automatického cyklování II podle normy změny Z1 ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Podstatou této zkoušky je cyklické střídání záporných a kladných teplot povrchu betonu zatěžovaného působením chemických rozmrazovacích látek v zimním období.

Použité pomůcky:

Automatické cyklovací zařízení KD 20.3 od firmy Elektro Komárek, vzdušnice pneumatiky, laboratorní sušárna Venticell 111, chemoprénové lepidlo, laboratorní váhy Kern EW600, laboratorní stříčky a misky

Obrázek 23 – Automatické cyklovací zařízení KD 20.3



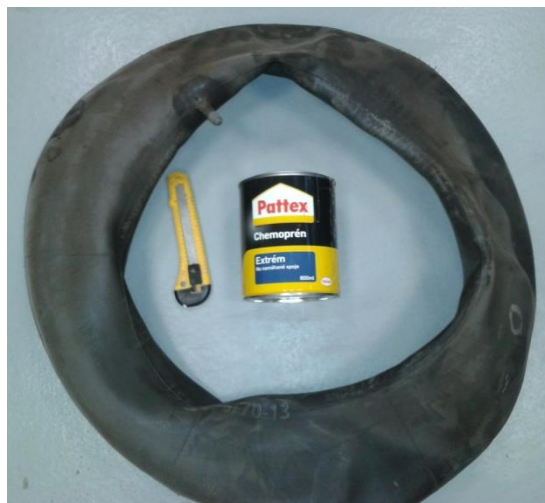
Zdroj: [vlastní]

Zkušební postup:

Pro tuto zkoušku byly použity jako zkušební tělesa odřezy o výšce 50 mm a průměru 150 mm z původních válců o výšce 300 mm a téhož průměru. Tyto odřezy byly nařezány pomocí okružní pily s diamantovým kotoučem a následně ponechány vyschnout. Takto bylo vytvořeno po třech zkušebních tělesech od každé ze tří směsí stmelých cementem.

Po vyschnutí bylo nutné připravit tyto tělesa pro zkoušku odolnosti proti působení vody a CHRL. Jednalo se o navlečení vzdušnice pneumatiky z automobilu, která byla přilepena na zkušební tělesa. Její účel spočíval k ohraničení zkušebního prostoru a v zabránění vytečení roztoku z vrchní plochy, na které byla provedena tato zkouška odolnosti. Nejdříve však byla vybrána, co se týče průměru, nejvhodnější vzdušnice, která by co nejlépe přilnula k tělesu. Dále z této vzdušnice byly nařezány pásy o výšce zhruba 60 mm a tím byly vytvořeny objímky. Protože se jednalo o použité vzdušnice, tak je bylo nutné z vnitřní strany zbavit nečistot proto, aby se dosáhlo co nejlepšího přilepení ke zkušebním vzorkům. Pro přilepení a zajištění vodotěsnosti bylo na těleso i pás vzdušnice nanášeno ve dvou vrstvách chemoprénové lepidlo značky Pattex. Vytvořená objímka převyšovala vrchní povrch hranolu zhruba o 10 – 20 mm.

Obrázek 24 – Chemoprénové lepidlo, vzdušnice pneumatiky, odlamovací nůž



Zdroj: [vlastní]

Následně byla nalita voda do připravených objímek, která sloužila k nasáknutí vzorku a kontroly vodotěsnosti objímek po dobu 2 dní. Po uplynutí této doby byla voda slita a zkušební povrch osušen.

Připravené zkušební vzorky byly vloženy do klimatizační komory cyklovacího zařízení KD 20.3 v laboratoři VVCD. Do připravených objímek byl nalit 3% roztok NaCl v tloušťce přibližně 5 mm. Po uložení připravených těles byla rozmístěna teplotní čidla, která snímala teplotu v klimatizační komoře automatického cyklovacího zařízení. Následně byl nastaven cyklický průběh teplot namáhání. Cyklus byl nastaven jako 3 hodinový ohřívací interval působení při teplotě +5 °C a 3 hodinový ochlazovací interval působení při teplotě -18 °C, přičemž první cyklus započal ochlazovacím intervalem a norma udává toleranci

± 1 °C. Délka jednoho cyklu trvala 6 hodin. Takto byla tělesa zatěžována střídáním teploty a působení roztoku NaCl po dobu 25 cyklů.

Po skončení 25. cyklu byly zkušební vzorky vyjmuty z klimatizační komory. Po slítí roztoku ze zatěžovaného povrchu každého vzorku byl následně zatěžovaný povrch nafocen. Povrch v objímce byl očištěn a pomocí stříčky byly volné částice slity do misek. Dále tyto částice byly přes filtrační papír přefiltrovány do keramických odpařovacích misek a uloženy do sušárny. V sušárně byla teplota nastavena na 105 °C. Po vysušení volných částic betonu byla zjištěna hmotnost po každých 25 cyklech a zapsána s přesností na 0,01 g a následně byla přepočtena na plochu povrchu vzorku o 1 m². Výsledný odpad byl stanoven v g.m⁻² a zaokrouhlen na celé desítky. Stejný postup byl aplikován na všech zkušebních vzorcích po každém 25. cyklu, přičemž vysušený odpad byl shromažďován do stejných misek, jednalo se tedy o součtovou hodnotu odpadu zkoušeného povrchu vzorku. Výsledné hodnoty byly vynášeny do grafu závislosti počtu cyklů na velikosti odpadu na 1 m². Pokud odpad dosáhl určené velikosti odpovídající součiniteli odolnosti, bude daný součinitel odolnosti vynesena na křivce v závislosti na počtu cyklů. Tato zkouška byla ukončena a vyhodnocena po 50 cyklech. [33]

Tabulka 17 – Součinitelé odolnosti

Součinitelé odolnosti	D1	D2	D3	D4	D5
Odpad betonu	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000

Zdroj: [33]

4 VÝSLEDKY PROVEDENÉHO EXPERIMENTU

V této části diplomové práce jsou uvedeny naměřené a vyhodnocené výsledky provedených zkoušek.

4.1 Výsledky zkoušek betonového recyklátu a kameniva

a) Stanovení vlhkosti sušením v sušárně

Tabulka 18 – Stanovení vlhkosti použitých materiálů

Název zkoušky		Stanovení vlhkosti		
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky		6. – 7. 10. 2016		
Odchylka od normované zkušební metody		-		
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt		
	frakce	m₁ [kg]	m₃ [kg]	w [%]
písek	0/4	4,211	4,211	0,00
drcené kamenivo	8/16	4,124	4,121	0,07
	16/22	4,177	4,174	0,07
betonový recyklát 1	8/16	4,102	4,096	0,15
	16/22	4,152	4,147	0,12
betonový recyklát 2	8/16	4,221	4,215	0,14
	16/22	4,169	4,164	0,12

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Plně vysušené kamenivo je takové, u kterého se nemění hmotnost navážky po jedné hodině v sušičce o více jak 0,1 %. Z výsledků této zkoušky vyplývá, že tuto skutečnost prokazovaly frakce drceného kameniva a písku oproti frakcím betonových recyklátů, u kterých došlo ke korekci množství vody při výrobě stmelovaných směsí.

b) Stanovení zrnitosti - síťový rozbor

Tabulka 19 – Síťový rozbor betonového recyklátu REC 1, frakce 8/32

Název zkoušky						Síťový rozbor		
Identifikace zkušební vzorku						REC 1		
Frakce						8/22		
Místo provedení zkoušky						Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky						6. 10. 2016		
Celková suchá hmotnost					[g]	3961,72		
Odchylka od normované zkušební metody						Bez praní		
Vypracoval						Bc. Jakub Fořt		
Velikost otvorů síta	Hmotnost zachyceného materiálu na sítu					Celková hmotnost zachyceného materiálu na sítu	Procento zbytku na sítěch	Součtové % propadu
	Měření I.	Měření II.	Měření III.	Měření IV.	Měření V.			
[mm]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
22,0	108,17	91,09	88,51	72,11	61,99	421,87	10,65	89,35
10,0	124,51	92,23	112,03	141,78	128,50	599,05	15,12	74,23
6,3	110,44	117,88	94,62	116,68	122,37	561,99	14,19	60,04
4,0	90,06	82,17	84,50	92,91	99,14	448,78	11,33	48,72
2,0	75,48	86,82	71,14	80,34	88,67	402,45	10,16	38,56
0,5	65,34	68,17	71,55	77,43	81,23	363,72	9,18	29,38
0,25	47,41	51,11	55,89	57,41	67,51	279,33	7,05	22,33
0,063	93,08	95,51	98,20	101,15	107,84	495,78	12,51	9,81
< 0,063	62,19	72,15	75,84	87,32	91,25	388,75	9,81	0,00
Celkem	776,68	757,13	752,28	827,13	848,50	3961,72	100,00	

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 25 – Zachycená zrna betonového recyklátu na síť velikosti 8 mm



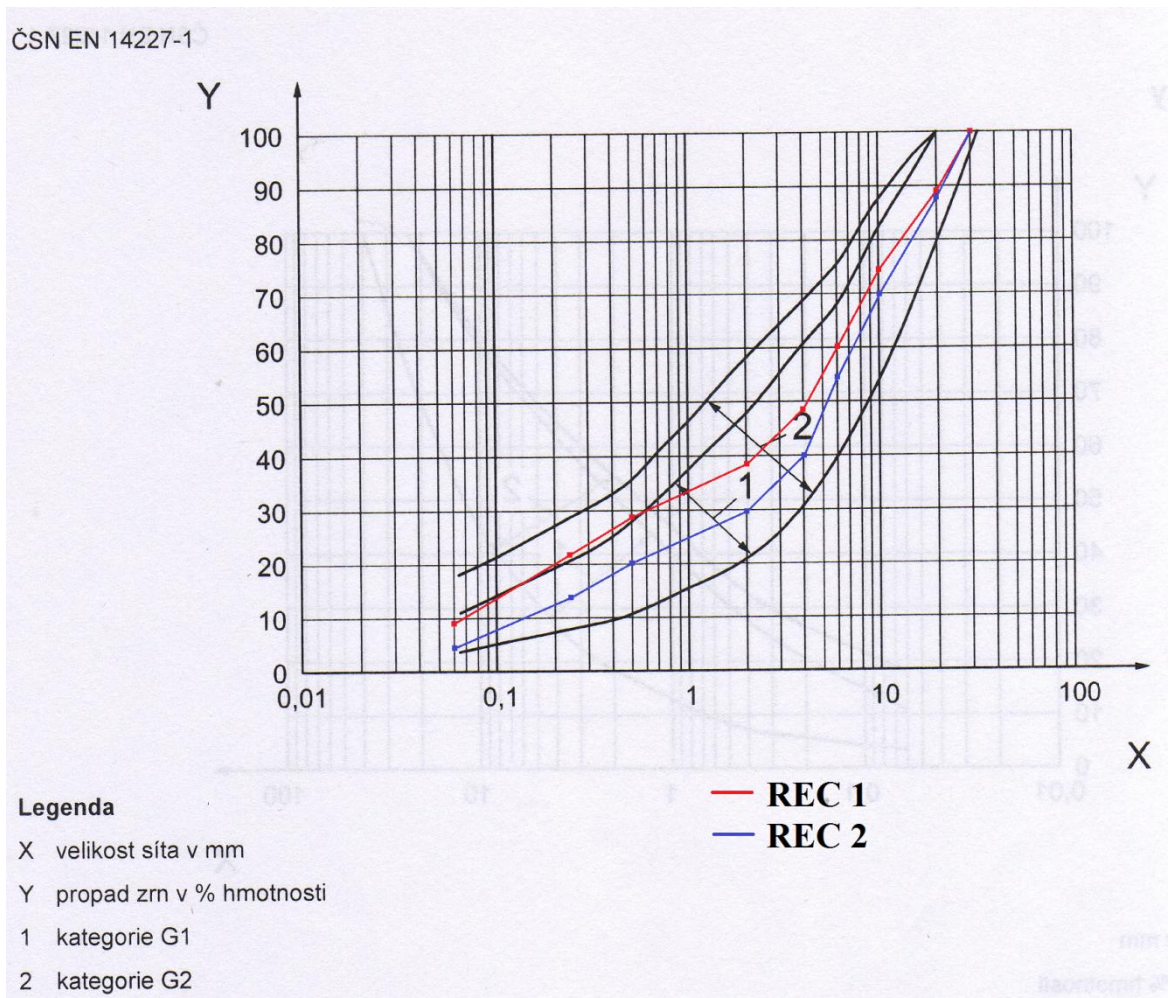
Zdroj: [vlastní]

Tabulka 20 - Sítový rozbor betonového recyklátu REC 2, frakce 8/32

Název zkoušky						Sítový rozbor		
Identifikace zkušební vzorku						REC 2		
Frakce						8/22		
Místo provedení zkoušky						Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky						7. 10. 2016		
Celková suchá hmotnost					[g]	4097,36		
Odchylka od normované zkušební metody						Bez prání		
Vypracoval						Bc. Jakub Fořt		
Velikost otvorů síta	Hmotnost zachyceného materiálu na sítu					Celková hmotnost zachyceného materiálu na sítu	Procento zbytku na sítích	Součtové % propadu
	Měření I.	Měření II.	Měření III.	Měření IV.	Měření V.			
[mm]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
22,0	120,89	98,51	95,84	99,17	97,67	512,08	12,50	87,50
10,0	181,72	156,86	145,82	161,31	96,67	742,38	18,12	69,38
6,3	113,04	111,41	119,21	118,14	139,26	601,06	14,67	54,71
4,0	105,78	108,54	110,25	104,47	120,78	549,82	13,42	41,30
2,0	78,23	94,71	92,45	99,59	101,88	466,86	11,39	29,90
0,5	71,58	71,91	80,22	85,21	97,13	406,05	9,91	19,99
0,25	48,74	43,44	50,18	50,45	55,61	248,42	6,06	13,93
0,063	67,60	72,91	79,33	82,55	95,42	397,81	9,71	4,22
< 0,063	27,89	31,14	34,59	40,27	38,99	172,88	4,22	0,00
Celkem	815,47	789,43	807,89	841,16	843,41	4097,36	100,00	

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 26 – Křivky zrnitosti použitých betonových recyklátů REC 1 a REC 2 frakcí 0/22



Zdroj: [vlastní] [7]

Z výsledku zkoušky stanovení zrnitosti síťovým rozborem vyplývá, že u betonového recyklátu REC 1 se jedná o kategorii G2 a u betonového recyklátu REC 2 se jedná o kategorii G1 zrnitosti směsi typu 1.

c) **Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva**

Tabulka 21 – Klasifikace složek betonového recyklátu REC 1

Název zkoušky		Klasifikace složek betonového recyklátu	
Identifikace zkušební vzorku		REC 1	
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky		18. 10. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody		-	
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt	
Hmotnost zkušební navážky			
	M_0	[kg]	7,179
Hmotnost zkušební navážky zachycená na síť 63 mm			
	M_{63}	[kg]	0,000
Hmotnost zkušební navážky propadá sítem 4 mm			
	M_4	[kg]	0,194
Hmotnost získané zkušební navážky zachycená na síť 4 mm			
	M_1	[kg]	6,985
Hmotnost složky X			
	M_X	[kg]	0,154
Hmotnost			
	M_2	[kg]	6,831
Hmotnost zredukované zkušební navážky			
	M_3	[kg]	4,087
Hmotnost složky Rc			
	M_{Rc}	[kg]	3,624
Hmotnost složky Ru			
	M_{Ru}	[kg]	0,297
Hmotnost složky Rb			
	M_{Rb}	[kg]	0,031
Hmotnost složky Ra			
	M_{Ra}	[kg]	0,135
Hmotnost složky Rg			
	M_{Rg}	[kg]	0,000
Objem složky FL			
	V_{FL}	[cm ³]	0,005
Zastoupení jednotlivých složek			
Zastoupení složky FL	FL	[cm ³ /kg]	0,72
Zastoupení složky X	X	[%]	2,20
Zastoupení složky Rc	Rc	[%]	86,72
Zastoupení složky Ru	Ru	[%]	7,11
Zastoupení složky Rb	Rb	[%]	0,74
Zastoupení složky Ra	Ra	[%]	3,23
Zastoupení složky Rg	Rg	[%]	0,00
Hodnocení podle: 1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů		NEVYHOVUJE	

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonový recyklát REC 1 neodpovídá procentnímu zastoupení složek hmotnosti v podmínce obsahu Rc o 3,28 % podle 1.3.1 *Dělení recyklovaných stavebních materiálů* (TP 210) této práce a podle normy ČSN

12620+A1 lze tento betonový recyklát klasifikovat jako Rc₈₀ (betonový recyklát s obsahem betonu vyšším než 80 %).

Tabulka 22 – Klasifikace složek betonového recyklátu REC 2

Název zkoušky		Klasifikace složek betonového recyklátu	
Identifikace zkušební vzorku		REC 2	
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky		19. 10. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody		-	
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt	
Zastoupení jednotlivých složek			
Hmotnost zkušební navážky	M ₀	[kg]	7,531
Hmotnost zkušební navážky zachycená na síť 63 mm	M ₆₃	[kg]	0,000
Hmotnost zkušební navážky propadlá sítím 4 mm	M ₄	[kg]	0,059
Hmotnost získané zkušební navážky zachycená na síť 4 mm	M ₁	[kg]	7,472
Hmotnost složky X	M _X	[kg]	0,071
Hmotnost	M ₂	[kg]	7,401
Hmotnost zredukované zkušební navážky	M ₃	[kg]	4,387
Hmotnost složky Rc	M _{Rc}	[kg]	4,186
Hmotnost složky Ru	M _{Ru}	[kg]	0,127
Hmotnost složky Rb	M _{Rb}	[kg]	0,052
Hmotnost složky Ra	M _{Ra}	[kg]	0,022
Hmotnost složky Rg	M _{Rg}	[kg]	0,000
Objem složky FL	V _{FL}	[cm ³]	0,007
Zastoupení složky FL	FL	[cm ³ /kg]	0,94
Zastoupení složky X	X	[%]	0,95
Zastoupení složky Rc	Rc	[%]	94,51
Zastoupení složky Ru	Ru	[%]	2,87
Zastoupení složky Rb	Rb	[%]	1,17
Zastoupení složky Ra	Ra	[%]	0,50
Zastoupení složky Rg	Rg	[%]	0,00
Hodnocení podle: 1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů			VYHOVUJE

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonový recyklát REC 2 odpovídá procentnímu zastoupení složek hmotnosti ve všech podmínkách podle 1.3.1 Dělení recyklovaných

stavebních materiálů (TP 210) této práce a podle normy ČSN 12620+A1 lze tento betonový recyklát klasifikovat jako Rc₉₀ (betonový recyklát s obsahem betonu vyšším než 90 %).

d) Stanovení nasákavosti zrn kameniva a betonového recyklátu

Tabulka 23 – Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REF

Název zkoušky	Nasákavost a objemová hmotnost	
Identifikace zkušební vzorku	REF	
Místo provedení zkoušky	Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky	2. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody	-	
Vypracoval	Bc. Jakub Fořt	
Frakce	8/16	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	3208,2
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	3215,1
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	2567,2
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	594,2
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	3153,9
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,665
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	2,534
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,583
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	1,9
Frakce	16/22	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	4404,2
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	4427,3
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	3321,5
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	594,3
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	4369,8
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,655
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	2,565
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,599
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	1,3

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 24 - Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REC 1

Název zkoušky	Nasákavost a objemová hmotnost	
Identifikace zkušební vzorku	REC 1	
Místo provedení zkoušky	Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky	3. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody	-	
Vypracoval	Bc. Jakub Fořt	
Frakce	8/16	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	3205,9
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	3325,2
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	2309,1
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	595,1
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	3132,4
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,204
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	1,940
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,059
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	6,2
Frakce	16/22	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	4204,2
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	4329,2
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	2824,1
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	595,8
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	4101,9
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,185
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	1,948
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,056
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	5,5

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 25 – Výsledky zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti směsi REC 2

Název zkoušky	Nasákavost a objemová hmotnost	
Identifikace zkušební vzorku	REC 2	
Místo provedení zkoušky	Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky	1. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody	-	
Vypracoval	Bc. Jakub Fořt	
Frakce	8/16	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	3203,5
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	3345,4
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	2341,3
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	595,7
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	3159,3
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,230
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	1,971
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,087
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	5,9
Frakce	16/22	
Hmotnost zkušební navážky	M [g]	4404,2
Hmotnost vodou nasyceného a povrchově osušeného kameniva	M ₁ [g]	4497,3
Hmotnost vzorku nasyceného kameniva ponořeného ve vodě v koši	M ₂ [g]	2844,1
Hmotnost prázdného koše ve vodě	M ₃ [g]	594,3
Hmotnost zkušební navážky na vzduchu, v sušárně vysušené	M ₄ [g]	4273,8
Teplota vody	[°C]	21,5
Hustota vody	[Mg/m ³]	0,9979
Objemová hmotnost zrn	[Mg/m³]	2,107
Objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	[Mg/m ³]	1,90
Objemová hmotnost zrn nasycených vodou a povrchově osušených	[Mg/m ³]	2,00
Nasákavost po 24 hodinách ponoření ve vodě	[%]	5,2

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 27 – Zkouška nasákavosti, betonový recyklát REC 1 (vlevo), betonový recyklát REC 2 (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonový recyklát má výrazně vyšší nasákavost a výrazně nižší objemovou hmotnost zrn v porovnání s drceným kamenivem.

e) Stanovení tvaru zrn – tvarový index

Tabulka 26 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REF

Název zkoušky		Tvarový index	
Identifikace zkušební vzorku		REF	
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky		2. 11. 2016	
Kritérium		SI ₅₅	
Odchylka od normované zkušební metody		-	
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt	
Frakce		8/16	
Zkušební navážka	M ₁ [g]	741,5	
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3	53,6
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100	7 % = SI₁₅
Frakce		16/22	
Zkušební navážka	M ₁ [g]	1443,5	
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3	347,7
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100	24 % = SI₄₀

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 28 – Zkušební navážka frakce 16/22 drceného kameniva s posuvným měřítkem



Zdroj: [vlastní]

Tabulka 27 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REC 1

Název zkoušky		Tvarový index
Identifikace zkušební vzorku		REC 1
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice
Datum provedení zkoušky		1. 11. 2016
Kritérium		SI ₅₅
Odchylka od normované zkušební metody		-
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt
Frakce		8/16
Zkušební navážka	M ₁ [g]	782,4
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3 133,1
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100 17 % = SI₂₀
Frakce		16/22
Zkušební navážka	M ₁ [g]	1103,8
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3 192,7
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100 17 % = SI₂₀

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 28 – Výsledky zkoušky tvarového indexu směsi REC 2

Název zkoušky		Tvarový index
Identifikace zkušební vzorku		REC 2
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice
Datum provedení zkoušky		3. 11. 2016
Kritérium		SI ₅₅
Odchylka od normované zkušební metody		-
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt
Frakce		8/16
Zkušební navážka	M ₁ [g]	763,4
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3 80,1
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100 10 % = SI₁₅
Frakce		16/22
Zkušební navážka	M ₁ [g]	1213,9
Nekubická zrna	M ₂ [g]	L/E > 3 97,4
Tvarový index	SI [%]	SI = (M ₂ /M ₁)*100 8 % = SI₁₅

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 29 – Kubická zrna (vlevo), nekubická zrna (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonové recykláty frakce 8/16 vykazují obdobný tvarový index jako drcené kamenivo stejné frakce, ale v porovnání frakce 16/22 vykazují i lepší tvarový index než drcené kamenivo stejné frakce.

f) Trvanlivost - Stanovení odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti zmrazování a rozmrazování

Tabulka 29 – Výsledky zkoušky odolnosti kameniva proti působení zmrazování a rozmrazování – REF

Název zkoušky		Odolnost proti mrazu		
Identifikace zkušební vzorku		REF		
Frakce		8/16		
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubrovice		
Datum provedení zkoušky		7. – 16. 11. 2016		
Kritérium		F ₄		
Odchylka od normované zkušební metody		-		
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt		
		Dílčí navážky		
		č. 1	č. 2	č. 3
Hmotnost vysušeného vzorku	[g]	2001,5	1998,7	2016,4
Hmotnost zůstatku na síti 4 mm	[g]	1989,7	1989,2	2004,2
Počáteční vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek		M ₁ [g]		6016,6
Konečná vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, které zůstaly na síti velikosti 4 mm		M ₂ [g]		5983,1
Procentní úbytek hmotnosti tří dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování		F [%]		0,56 = F₁

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 30 - Výsledky zkoušky odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC1

Název zkoušky		Odolnost proti mrazu		
Identifikace zkušební vzorku		REC 1		
Frakce		8/16		
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky		7. - 16. 11. 2016		
Kritérium		F ₄		
Odchylka od normované zkušební metody		-		
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt		
		Dílčí navážky		
		č. 1	č. 2	č. 3
Hmotnost vysušeného vzorku	[g]	2005,7	2022,5	2011,6
Hmotnost zůstatku na síť 4 mm	[g]	1927,8	1945,9	1937,6
Počáteční vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek		M ₁ [g]		6039,8
Konečná vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, které zůstaly na síť velikosti 4 mm		M ₂ [g]		5811,3
Procentní úbytek hmotnosti tří dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování		F [%]		3,78 = F₄

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 31 - Výsledky zkoušky odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC 2

Název zkoušky		Odolnost proti mrazu		
Identifikace zkušební vzorku		REC 2		
Frakce		8/16		
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky		7. - 16. 11. 2016		
Kritérium		F ₄		
Odchylka od normované zkušební metody		-		
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt		
		Dílčí navážky		
		č. 1	č. 2	č. 3
Hmotnost vysušeného vzorku	[g]	2010,8	2005,6	2008,7
Hmotnost zůstatku na síť 4 mm	[g]	1949,5	1948,9	1947,4
Počáteční vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek		M ₁ [g]		6025,1
Konečná vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, které zůstaly na síť velikosti 4 mm		M ₂ [g]		5845,8
Procentní úbytek hmotností tří dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování		F [%]		2,98 = F₄

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 30 – Zkušební vzorky při zkoušce odolnosti kameniva a betonového recyklátu proti působení zmrazování a rozmrazování – REC 1 (vlevo), REF (uprostřed), REC 2 (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonové recykláty frakce 8/16 vykazují mnohem horší odolnost proti působení mrazu a vodě než drcené kamenivo stejné frakce.

4.2 Výsledky zkoušek čerstvé stmelené směsi

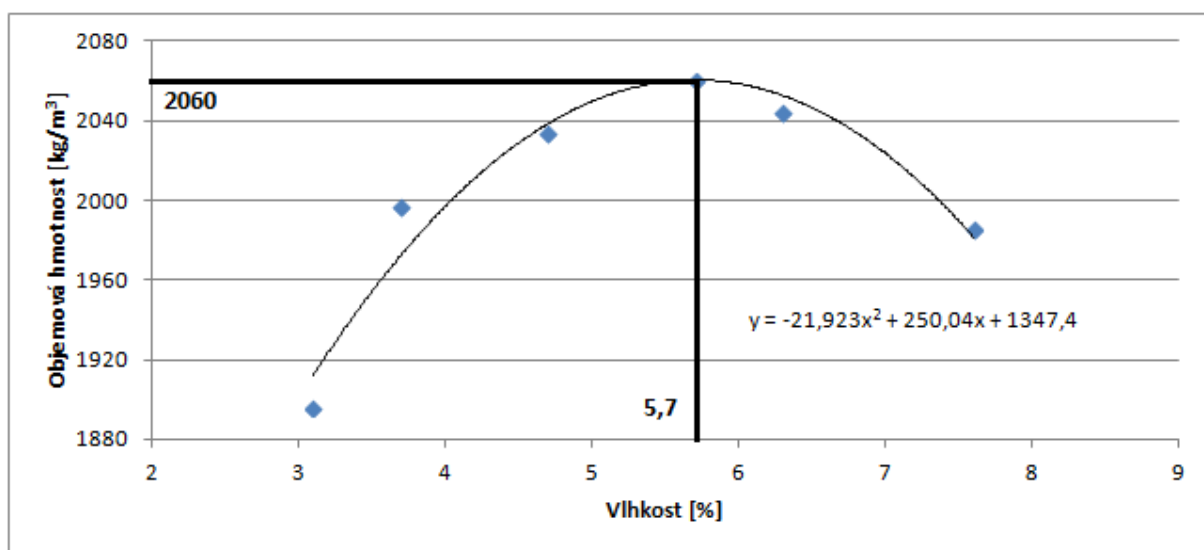
a) Proctorova zkouška

Tabulka 32 – Proctorova zkouška směsi REF

Název zkoušky		Proctorova zkouška				
Identifikace zkušební vzorku		REF				
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice				
Datum provedení zkoušky		10. 10. 2016				
Odchylka od normované zkušební metody		-				
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt				
zkouška číslo		1	2	3	4	5
objem moždíře	[cm ³]	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9
hmotnost moždíře	[g]	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7
hmotnost moždíře se zeminou	[g]	14425,7	14668,7	14794,7	14884,7	14809,7
hmotnost vlhké zeminy	[g]	4136	4379	4505	4595	4520
objem. hmotnost vlhké zeminy	[kg/m ³]	1956	2071	2130	2173	2137
miska + vlhký vzorek	[g]	210,51	190,53	220,11	244,59	223,74
miska + suchý vzorek	[g]	206,36	186,89	215,44	237,11	216,24
hmotnost misky	[g]	74,02	88,58	116,35	118,11	117,83
hmotnost suchého vzorku	[g]	132,34	98,31	99,09	119	98,41
hmotnost vody	[g]	4,15	3,64	4,67	7,48	7,5
vlhkost zeminy	[%]	3,1	3,7	4,7	6,3	7,6
objem. hmotnost suché zeminy	[kg/m ³]	1 896	1 997	2 034	2 044	1 986
Optimální vlhkost	[%]	5,7				
Maximální objemová hmotnost	[kg/m³]	2 060				

Zdroj: [vlastní]

Graf 1 – Proctorův graf směsi REF



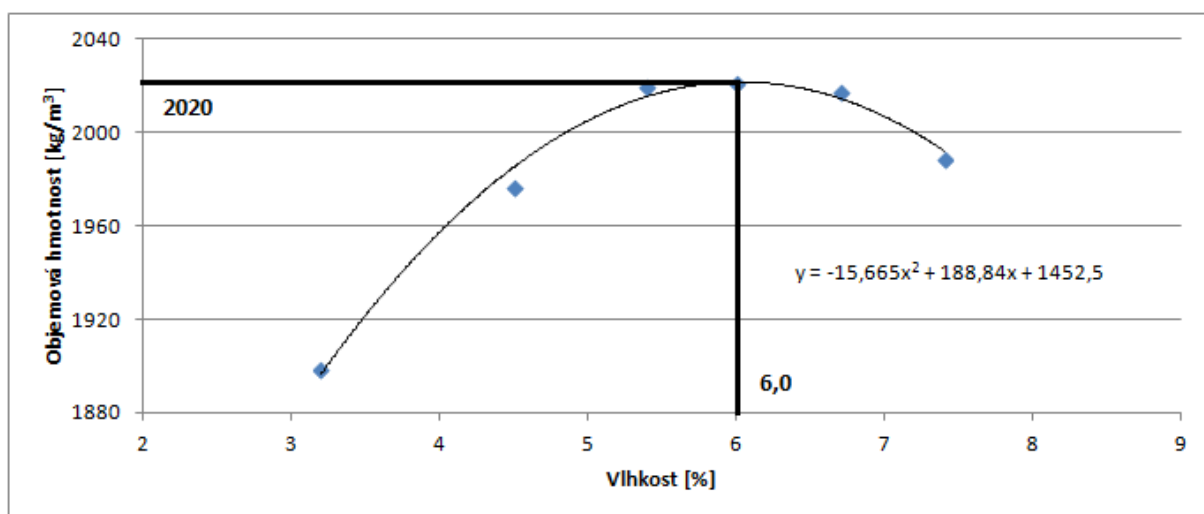
Zdroj: [vlastní]

Tabulka 33 – Proctorova zkouška směsi REC 1

Název zkoušky		Proctorova zkouška				
Identifikace zkušební vzorku		REC 1				
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice				
Datum provedení zkoušky		11. 10. 2016				
Odchylka od normované zkušební metody		-				
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt				
zkouška číslo		1	2	3	4	5
objem moždíře	[cm³]	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9
hmotnost moždíře	[g]	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7
hmotnost moždíře se zeminou	[g]	14432,7	14659,7	14792,7	14844,7	14805,7
hmotnost vlhké zeminy	[g]	4143	4370	4503	4555	4516
objem. hmotnost vlhké zeminy	[kg/m³]	1959	2066	2129	2154	2135
miska + vlhký vzorek	[g]	211,34	188,54	218,29	238,17	180,76
miska + suchý vzorek	[g]	207,16	184,19	213,12	230,71	174,99
hmotnost misky	[g]	74,88	88,15	117,21	119,65	96,66
hmotnost suchého vzorku	[g]	132,28	96,04	95,91	111,06	78,33
hmotnost vody	[g]	4,18	4,35	5,17	7,46	5,77
vlhkost zeminy	[%]	3,2	4,5	5,4	6,7	7,4
objem. hmotnost suché zeminy	[kg/m³]	1 899	1 977	2 020	2 018	1 989
Optimální vlhkost	[%]	6,0				
Maximální objemová hmotnost	[kg/m³]	2 020				

Zdroj: [vlastní]

Graf 2 – Proctorův graf směsi REC 1



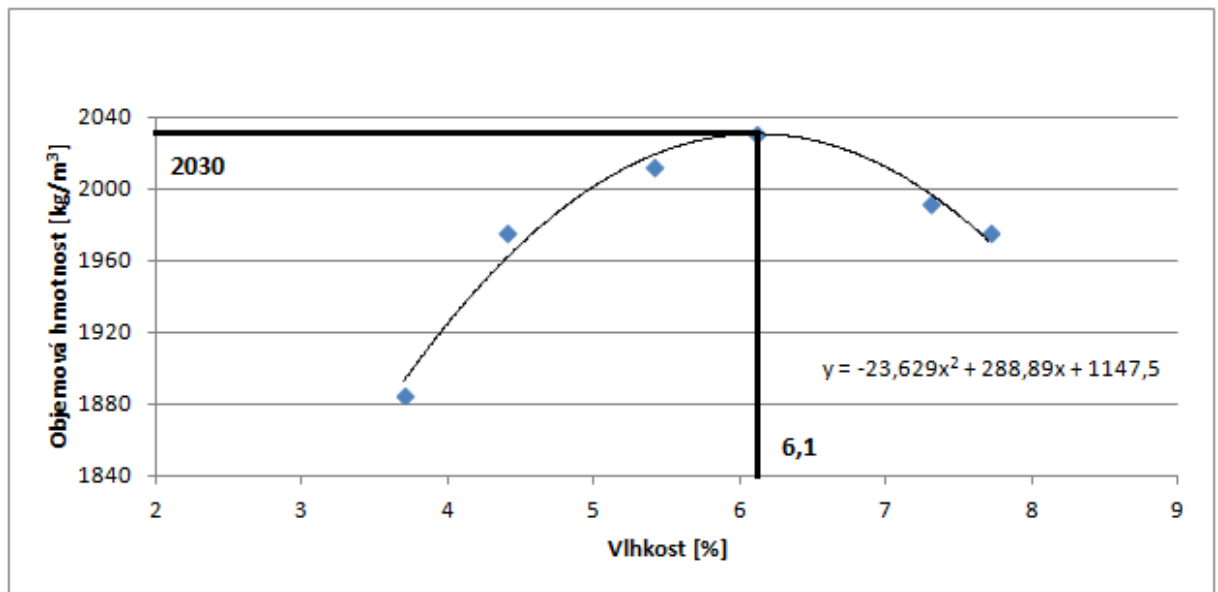
Zdroj: [vlastní]

Tabulka 34 – Proctorova zkouška směsi REC 2

Název zkoušky		Proctorova zkouška				
Identifikace zkušební vzorku		REC 2				
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice				
Datum provedení zkoušky		11. 10. 2016				
Odchylka od normované zkušební metody		-				
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt				
zkouška číslo		1	2	3	4	5
objem moždíře	[cm ³]	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9	2114,9
hmotnost moždíře	[g]	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7	10289,7
hmotnost moždíře se zeminou	[g]	14423,7	14651,7	14775,7	14811,7	14790,7
hmotnost vlhké zeminy	[g]	4134	4362	4486	4522	4501
objem. hmotnost vlhké zeminy	[kg/m ³]	1955	2062	2121	2138	2128
miska + vlhký vzorek	[g]	210,52	185,13	220,17	239,89	181,76
miska + suchý vzorek	[g]	205,66	181,11	214,84	231,6	175,72
hmotnost misky	[g]	74,99	89,11	116,1	118,7	97,15
hmotnost suchého vzorku	[g]	130,67	92	98,74	112,9	78,57
hmotnost vody	[g]	4,86	4,02	5,33	8,29	6,04
vlhkost zeminy	[%]	3,7	4,4	5,4	7,3	7,7
objem. hmotnost suché zeminy	[kg/m ³]	1 885	1 976	2 012	1 992	1 976
Optimální vlhkost	[%]	6,1				
Maximální objemová hmotnost	[kg/m³]	2 030				

Zdroj: [vlastní]

Graf 3 – Proctorův graf směsi REC 2



Zdroj: [vlastní]

Obrázek 31 – Proctorova zkouška



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že betonové recykláty vykazují vlivem vyšší nasákavosti i vyšší optimální vlhkost směsi při maximální míře ztuhnutí než je tomu u směsi z drceného kameniva.

4.3 Výsledky zkoušek ztvrdlé stmelené směsi

a) Objemová hmotnost ztvrdlé stmelené směsi cementem

Tabulka 35 – Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem
REF

Název zkoušky				Rozměry zkušebních těles pro výpočet objemu	
Identifikace zkušebního vzorku				REF	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice	
Stav zkušebního tělesa				nasyčeno vodou	
Způsob stanovení objemu				změření rozměrů	
Datum provedení zkoušky				14. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	H [mm]	V _m [mm ³]	V _m [m ³]
krychle 1	150	149	120	2682000	0,002682
krychle 2	149	149	120	2664120	0,002664
krychle 3	149	150	120	2682000	0,002682
válec 1	150	-	120	2120575	0,002121
válec 2	150	-	120	2120575	0,002121
válec 3	150	-	120	2120575	0,002121
válec 4	150	-	120	2120575	0,002121
válec 5	150	-	120	2120575	0,002121
válec 6	150	-	120	2120575	0,002121
válec 7	150	-	120	2120575	0,002121
válec 8	150	-	120	2120575	0,002121
válec 9	150	-	120	2120575	0,002121
válec 10	150	-	120	2120575	0,002121
válec 11	150	-	120	2120575	0,002121
válec 12	150	-	120	2120575	0,002121
válec 13	150	-	120	2120575	0,002121
válec 14	150	-	120	2120575	0,002121
válec 15	150	-	120	2120575	0,002121
válec 16	150	-	120	2120575	0,002121

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 36 – Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem REC 1

Název zkoušky				Rozměry zkušebních těles pro výpočet objemu	
Identifikace zkušebního vzorku				REC 1	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice	
Stav zkušebního tělesa				nasyceno vodou	
Způsob stanovení objemu				změření rozměrů	
Datum provedení zkoušky				15. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	H [mm]	V _m [mm ³]	V _m [m ³]
krychle 1	149	148	120	2646240	0,002646
krychle 2	149	149	120	2664120	0,002664
krychle 3	150	149	120	2682000	0,002682
válec 1	150	-	120	2120575	0,002121
válec 2	150	-	120	2120575	0,002121
válec 3	150	-	120	2120575	0,002121
válec 4	150	-	120	2120575	0,002121
válec 5	150	-	120	2120575	0,002121
válec 6	150	-	120	2120575	0,002121
válec 7	150	-	120	2120575	0,002121
válec 8	150	-	120	2120575	0,002121
válec 9	150	-	120	2120575	0,002121
válec 10	150	-	120	2120575	0,002121
válec 11	150	-	120	2120575	0,002121
válec 12	150	-	120	2120575	0,002121
válec 13	150	-	120	2120575	0,002121
válec 14	150	-	120	2120575	0,002121
válec 15	150	-	120	2120575	0,002121
válec 16	150	-	120	2120575	0,002121

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 37 – Rozměry a vypočítané objemy zkušebních těles – stmelená směs cementem REC 2

Název zkoušky				Rozměry zkušebních těles pro výpočet objemu	
Identifikace zkušebního vzorku				REC 2	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice	
Stav zkušebního tělesa				nasyčeno vodou	
Způsob stanovení objemu				změření rozměrů	
Datum provedení zkoušky				16. 11. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	H [mm]	V _m [mm ³]	V _m [m ³]
krychle 1	150	149	120	2682000	0,002682
krychle 2	149	150	120	2682000	0,002682
krychle 3	148	149	120	2646240	0,002646
válec 1	150	-	120	2120575	0,002121
válec 2	150	-	120	2120575	0,002121
válec 3	150	-	120	2120575	0,002121
válec 4	150	-	120	2120575	0,002121
válec 5	150	-	120	2120575	0,002121
válec 6	150	-	120	2120575	0,002121
válec 7	150	-	120	2120575	0,002121
válec 8	150	-	120	2120575	0,002121
válec 9	150	-	120	2120575	0,002121
válec 10	150	-	120	2120575	0,002121
válec 11	150	-	120	2120575	0,002121
válec 12	150	-	120	2120575	0,002121
válec 13	150	-	120	2120575	0,002121
válec 14	150	-	120	2120575	0,002121
válec 15	150	-	120	2120575	0,002121
válec 16	150	-	120	2120575	0,002121

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 38 – Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REF

Název zkoušky			Objemová hmotnost zkušebních těles
Identifikace zkušebního vzorku			REF
Místo provedení zkoušky			Laboratoř VVCD Doubravice
Stav zkušebního tělesa			nasyčeno vodou
Způsob stanovení objemu			změření rozměrů
Datum provedení zkoušky			14. 11. 2016
Odchylka od normované zkušební metody			-
Vypracoval			Bc. Jakub Fořt
	m [kg]	V_m [m ³]	D_m [kg.m ⁻³]
krychle 1	6,025	0,002682	2246
krychle 2	6,087	0,002664	2285
krychle 3	6,011	0,002682	2241
válec 1	4,843	0,002121	2284
válec 2	4,852	0,002121	2288
válec 3	4,844	0,002121	2284
válec 4	4,865	0,002121	2294
válec 5	4,905	0,002121	2313
válec 6	4,842	0,002121	2283
válec 7	4,838	0,002121	2281
válec 8	4,891	0,002121	2306
válec 9	4,875	0,002121	2299
válec 10	4,862	0,002121	2293
válec 11	4,849	0,002121	2287
válec 12	4,901	0,002121	2311
válec 13	4,871	0,002121	2297
válec 14	4,911	0,002121	2316
válec 15	4,891	0,002121	2306
válec 16	4,889	0,002121	2306
Průměrná hodnota objemové hmotnosti			2290

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 39 – Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REC 1

Název zkoušky			Objemová hmotnost zkušebních těles
Identifikace zkušebního vzorku			REC 1
Místo provedení zkoušky			Laboratoř VVCD Doubravice
Stav zkušebního tělesa			nasyceno vodou
Způsob stanovení objemu			změření rozměrů
Datum provedení zkoušky			15. 11. 2016
Odchylka od normované zkušební metody			-
Vypracoval			Bc. Jakub Fořt
	m [kg]	V_m [m³]	D_m [kg.m⁻³]
krychle 1	5,871	0,002646	2219
krychle 2	5,812	0,002664	2182
krychle 3	5,799	0,002682	2162
válec 1	4,643	0,002121	2190
válec 2	4,708	0,002121	2220
válec 3	4,735	0,002121	2233
válec 4	4,723	0,002121	2227
válec 5	4,724	0,002121	2228
válec 6	4,691	0,002121	2212
válec 7	4,622	0,002121	2180
válec 8	4,677	0,002121	2206
válec 9	4,769	0,002121	2249
válec 10	4,674	0,002121	2204
válec 11	4,709	0,002121	2221
válec 12	4,691	0,002121	2212
válec 13	4,692	0,002121	2213
válec 14	4,711	0,002121	2222
válec 15	4,737	0,002121	2234
válec 16	4,712	0,002121	2222
Průměrná hodnota objemové hmotnosti			2210

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 40 – Výsledky zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi cementem – REC 2

Název zkoušky			Objemová hmotnost zkušebních těles
Identifikace zkušební vzorku			REC 2
Místo provedení zkoušky			Laboratoř VVCD Dobruška
Stav zkušební tělesa			nasyceno vodou
Způsob stanovení objemu			změření rozměrů
Datum provedení zkoušky			16. 11. 2016
Odchylka od normované zkušební metody			-
Vypracoval			Bc. Jakub Fořt
	m [kg]	V_m [m³]	D_m [kg.m⁻³]
krychle 1	5,958	0,002682	2221
krychle 2	5,933	0,002682	2212
krychle 3	5,879	0,002646	2222
válec 1	4,845	0,002121	2285
válec 2	4,836	0,002121	2281
válec 3	4,811	0,002121	2269
válec 4	4,801	0,002121	2264
válec 5	4,789	0,002121	2258
válec 6	4,722	0,002121	2227
válec 7	4,729	0,002121	2230
válec 8	4,719	0,002121	2225
válec 9	4,701	0,002121	2217
válec 10	4,766	0,002121	2248
válec 11	4,761	0,002121	2245
válec 12	4,759	0,002121	2244
válec 13	4,697	0,002121	2215
válec 14	4,718	0,002121	2225
válec 15	4,731	0,002121	2231
válec 16	4,721	0,002121	2226
Průměrná hodnota objemové hmotnosti			2240

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Z výsledků této zkoušky vyplývá, že směsi s betonovým recyklátem vykazují nižší objemovou hmotnost než směs z drceného kameniva, což odpovídá porovnání objemové hmotnosti samotného betonového recyklátu a drceného kameniva.

b) Odolnost směsí stmelených cementem proti mrazu a vodě

Tabulka 41 – Zkouška odolnosti směsí stmelených cementem proti mrazu a vodě

Název zkoušky	Odolnost proti působení mrazu a vodě
Identifikace zkušební vzorku	REF, REC 1, REC 2
Místo provedení zkoušky	Trojovice 32
Datum provedení zkoušky	16. 11. - 2. 12. 2016
Mrazící skříň	Mrazák GORENJE
Odchylka od normované zkušební metody	-
Vypracoval	Bc. Jakub Fořt
Označení směsi	
REF	Počet zkušebních vzorků
REC 1	8
REC 2	8

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 32 – Zkušební tělesa při zkoušce odolnosti proti působení mrazu a vodě – vlevo fáze mražení, vpravo fáze oteplování



Zdroj: [vlastní]

c) Pevnost v tlaku zkušebních těles

Tabulka 42 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REF ve stáří 28 dní

Název zkoušky				Pevnost v prostém tlaku		
Identifikace zkušebního vzorku				REF		
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice		
Stáří vzorků				28 dní		
Datum provedení zkoušky				14. 11. 2016		
Přepočtový koeficient λ				0,92		
Odchylka od normované zkušební metody				-		
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt		
Druh vzorku	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
krychle 1	150	149	22350	33	255897	11,4
krychle 2	149	149	22201	28	217097	9,8
krychle 3	149	150	22350	33	264131	11,8
Průměrná krychelná pevnost						11,0
Druh vzorku	D ₁ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]	
Vzorky - normové formy						
válec 1	150	17671,5	44	291137	15,2	
válec 2	150	17671,5	43	276413	14,4	
válec 3	150	17671,5	43	270342	14,1	
Průměrná válcová pevnost						14,5
Vzorky - nařezané						
válec 7	150	17671,5	48	299791	15,6	
válec 8	150	17671,5	59	366616	19,1	
válec 9	150	17671,5	45	290370	15,1	
válec 10	150	17671,5	49	318944	16,6	
válec 11	150	17671,5	59	387185	20,2	
Průměrná válcová pevnost						17,3

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 43 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 1 ve stáří 28 dní

Název zkoušky		Pevnost v prostém tlaku				
Identifikace zkušební vzorku		REC 1				
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice				
Stáří vzorků		28 dní				
Datum provedení zkoušky		15. 11. 2016				
Přepočtový koeficient λ		0,92				
Odchylka od normované zkušební metody		-				
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt				
Druh vzorku	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
krychle 1	149	148	22052	18	125820	5,7
krychle 2	149	149	22201	18	117306	5,3
krychle 3	150	149	22350	20	111654	5,0
Průměrná krychelná pevnost						5,3
Druh vzorku	D ₁ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]	
Vzorky - normové formy						
válec 1	150	17671,5	37	200137	10,4	
válec 2	150	17671,5	32	198695	10,3	
válec 3	150	17671,5	31	196846	10,2	
Průměrná válcová pevnost						10,3
Vzorky - nařezané						
válec 7	150	17671,5	38	225750	11,8	
válec 8	150	17671,5	39	248430	12,9	
válec 9	150	17671,5	38	214027	11,1	
válec 10	150	17671,5	34	209281	10,9	
válec 11	150	17671,5	36	222331	11,6	
Průměrná válcová pevnost						11,7

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 44 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 2 ve stáří 28 dní

Název zkoušky		Pevnost v prostém tlaku				
Identifikace zkušební vzorku		REC 2				
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice				
Stáří vzorků		28 dní				
Datum provedení zkoušky		16. 11. 2016				
Přepočtový koeficient λ		0,92				
Odchylka od normované zkušební metody		-				
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt				
Druh vzorku	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
krychle 1	150	149	22350	16	105373	4,7
krychle 2	149	150	22350	19	124075	5,6
krychle 3	148	149	22052	19	134054	6,1
Průměrná krychelná pevnost						5,4
Druh vzorku	D ₁ [mm]		A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
Vzorky - normové formy						
válec 1	150		17671,5	34	200547	10,4
válec 2	150		17671,5	37	200915	10,5
válec 3	150		17671,5	39	201111	10,5
Průměrná válcová pevnost						10,5
Vzorky - nařezané						
válec 7	150		17671,5	45	309979	16,1
válec 8	150		17671,5	43	273064	14,2
válec 9	150		17671,5	48	297558	15,5
válec 10	150		17671,5	50	324156	16,9
válec 11	150		17671,5	45	288625	15,0
Průměrná válcová pevnost						15,5

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 45 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REF po zkoušce odolnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě

Název zkoušky		Pevnost v prostém tlaku			
Identifikace zkušební vzorku		REF			
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice			
Počet cyklů odolnosti stmelených směsí proti mrazu a vodě		16			
Datum provedení zkoušky		2. 12. 2016			
Přepočtový koeficient λ		0,92			
Odchylka od normované zkušební metody		-			
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt			
Druh vzorku	D_1 [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
Vzorky - normové formy					
válec 4	150	17671,5	45	284997	14,8
válec 5	150	17671,5	52	351674	18,3
válec 6	150	17671,5	42	265806	13,8
Průměrná válcová pevnost					15,7
Vzorky - nařezané					
válec 12	150	17671,5	59	441945	23,0
válec 13	150	17671,5	55	439304	22,9
válec 14	150	17671,5	59	539999	28,1
válec 15	150	17671,5	58	477247	24,8
válec 16	150	17671,5	51	414773	21,6
Průměrná válcová pevnost					20,3

Zdroj: [vlastní]

Obrázek 33 – Zkušební tělesa po zkoušce pevnosti v prostém tlaku; REC 2 (vlevo), REC 1 (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

Tabulka 46 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 1 po zkoušce odolnosti směsí stmelovaných hydraulickými pojivky proti mrazu a vodě

Název zkoušky		Pevnost v prostém tlaku			
Identifikace zkušební vzorku		REC 1			
Místo provedení zkoušky		Laboratoř VVCD Doubravice			
Počet cyklů odolnosti stmelovaných směsí proti mrazu a vodě		16			
Datum provedení zkoušky		2. 12. 2016			
Přepočtový koeficient λ		0,92			
Odchylka od normované zkušební metody		-			
Vypracoval		Bc. Jakub Fořt			
Druh vzorku	D ₁ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	Rc [MPa]
Vzorky - normové formy					
válec 4	150	17671,5	38	234403	12,2
válec 5	150	17671,5	46	203669	10,6
válec 6	150	17671,5	35	218632	11,4
Průměrná válcová pevnost					11,4
Vzorky - nařezané					
válec 12	150	17671,5	48	302373	15,7
válec 13	150	17671,5	45	267341	13,9
válec 14	150	17671,5	35	194040	10,1
válec 15	150	17671,5	41	202442	10,5
válec 16	150	17671,5	37	215562	11,2
Průměrná válcová pevnost					11,9

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 47 – Výsledky zkoušky pevnosti v prostém tlaku směsi REC 2 po zkoušce odolnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě

Název zkoušky				Pevnost v prostém tlaku	
Identifikace zkušební vzorku				REC 2	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Dobruška	
Počet cyklů odolnosti stmelených směsí proti mrazu a vodě				16	
Datum provedení zkoušky				2. 12. 2016	
Přepočtový koeficient λ				0,92	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
Druh vzorku	D ₁ [mm]	A [mm ²]	Doba drcení [s]	F [N]	R _c [MPa]
Vzorky - normové formy					
válec 4	150	17671,5	40	226378	11,8
válec 5	150	17671,5	38	237823	12,4
válec 6	150	17671,5	33	204047	10,6
Průměrná válcová pevnost					11,6
Vzorky - nařezané					
válec 12	150	17671,5	45	294138	15,3
válec 13	150	17671,5	38	233950	12,2
válec 14	150	17671,5	54	422348	22,0
válec 15	150	17671,5	57	453967	23,6
válec 16	150	17671,5	48	321097	16,7
Průměrná válcová pevnost					15,1

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Tato zkouška byla provedena na zkušebních vzorcích dvou typů stář. Prvním typem zkoušení byly zkušební tělesa tvaru válce o výšce 120 mm a tvaru krychle o délce hrany 150 mm ve stáří 28 dní. Druhým typem zkoušení byly zkušební tělesa tvaru válce o výšce 120 mm ve stáří 28 dní a následně podrobených zkoušce odolnosti stmelené směsi proti působení mrazu a vodě. Zkušební tělesa tvaru válce se dále dělila na normové zkušební vzorky vyrobené v normových formách a na nenormové zkušební vzorky nařezané z válců o výšce 300 mm. Z tohoto důvodu nebyly porovnány normové výsledky směsí s nenormovými, proto bylo porovnání rozděleno na normové a nenormové.

Z výsledků zkoušky pevnosti v prostém tlaku vyplývá, že pro tuto zkoušku nejsou vhodná zkušební tělesa tvaru krychle, což potvrdily naměřené hodnoty, které nevyhovují navržené pevnosti. Porovnáním všech tří ztvrdlých směsí na pevnost v prostém tlaku normových zkušebních těles můžeme potvrdit, že referenční směs vyhověla návrhové pevnosti v tlaku použité receptury. Směsi s plnivem betonového recyklátu splnily pevnost v tlaku, ale nesplnily návrhovou pevnost v tlaku, na kterou je receptura navržena. Výsledky pevnosti v prostém tlaku po provedení zkoušky odolnosti směsí stmelých cementem proti mrazu a vodě došlo k nárůstu pevnosti u všech tří vyrobených směsí. Všechny tři směsi splnily kritérium této zkoušky, že jejich hodnoty neklesly pod 85 % pevnosti, ale naopak se ještě zvýšily. Zkušební vzorky vytvořené nařezáním z válců výšky 300 mm, tedy z nenormového provedení, můžeme říct, že naměřené hodnoty jejich pevnosti v prostém tlaku dosahovaly vyšších hodnot než hodnoty normové výroby zkušebních těles.

d) Stanovení odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

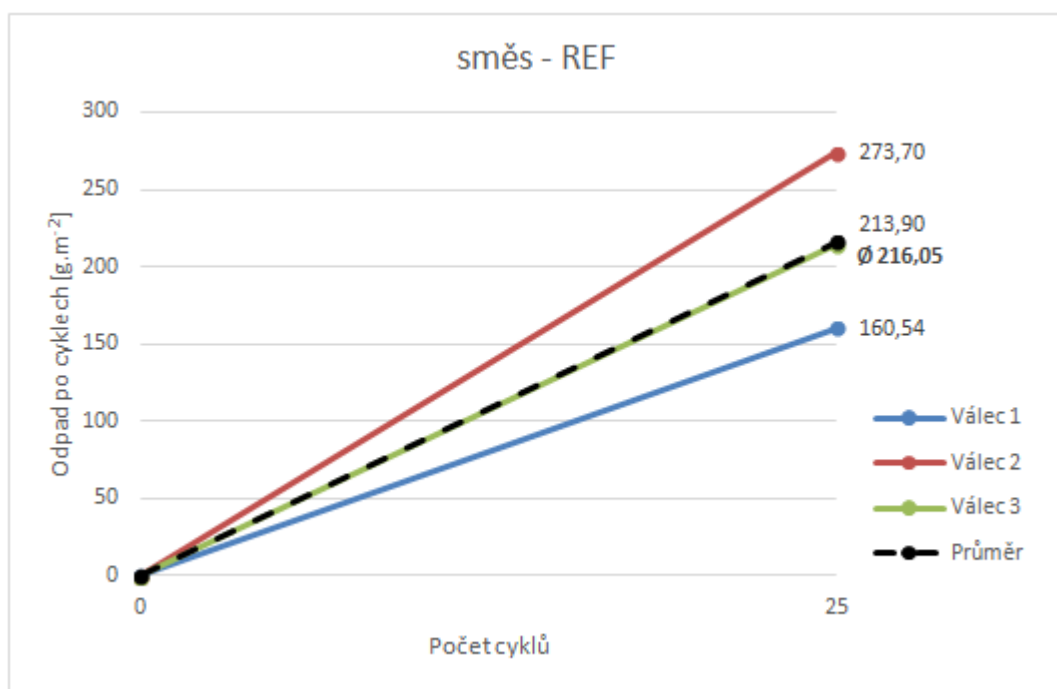
Tabulka 48 – Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REF

Název zkoušky			Odolnost proti CHRL		
Identifikace zkušební vzorku			REF		
Místo provedení zkoušky			Laboratoř VVCD Doubravice		
Datum provedení zkoušky			5. - 12. 12. 2016		
Odchylka od normované zkušební metody			-		
Vypracoval			Bc. Jakub Fořt		
	Odpad po cyklech [g]		Plocha [mm ²]	Odpad po cyklech [g.m ⁻²]	
	25	50		25	50
válec 1	24	X	149,5	160,54	X
válec 2	41	X	149,8	273,70	X
válec 3	32	X	149,6	213,90	X
Průměrná hodnota odpadu				216,05	X

X ... nenaměřená hodnota

Zdroj: [vlastní]

Graf 4 – Odpad po 25 cyklech směsi REF



Zdroj: [vlastní]

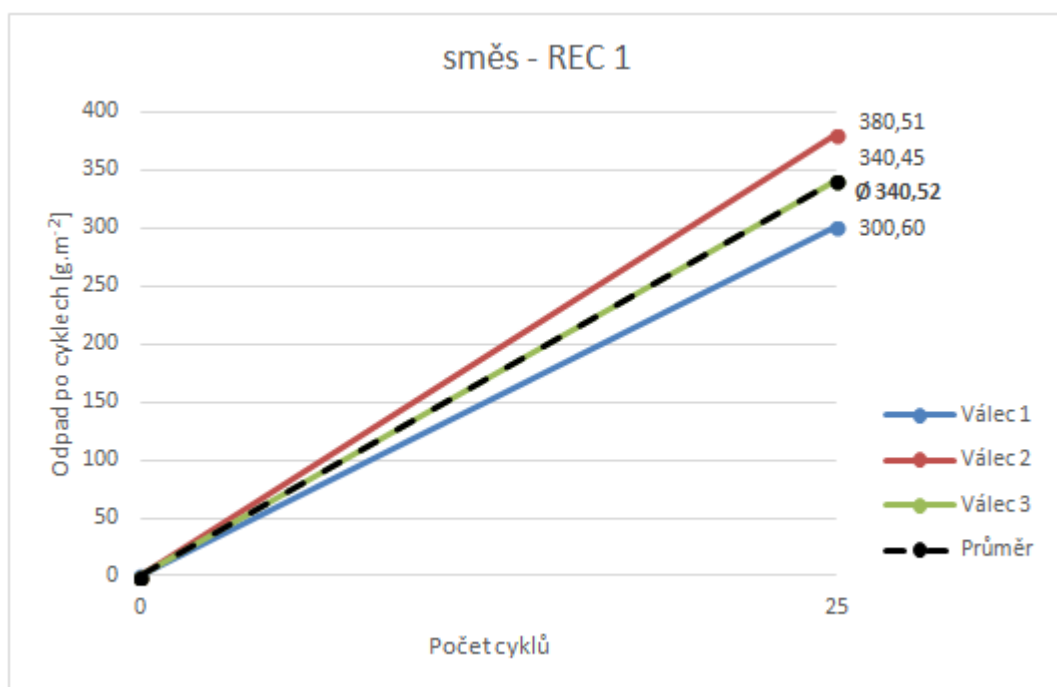
Tabulka 49 – Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REC 1

Název zkoušky				Odolnost proti CHRL	
Identifikace zkušební vzorku				REC 1	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky				5. - 12. 12. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
	Odpad po cyklech [g]		Plocha [mm ²]	Odpad po cyklech [g.m ⁻²]	
	25	50		25	50
válec 1	45	X	149,7	300,60	X
válec 2	57	X	149,8	380,51	X
válec 3	51	X	149,8	340,45	X
Průměrná hodnota odpadu				340,52	X

X ... nenaměřená hodnota

Zdroj: [vlastní]

Graf 5 – Odpad po 25 cyklech směsi REC 1



Zdroj: [vlastní]

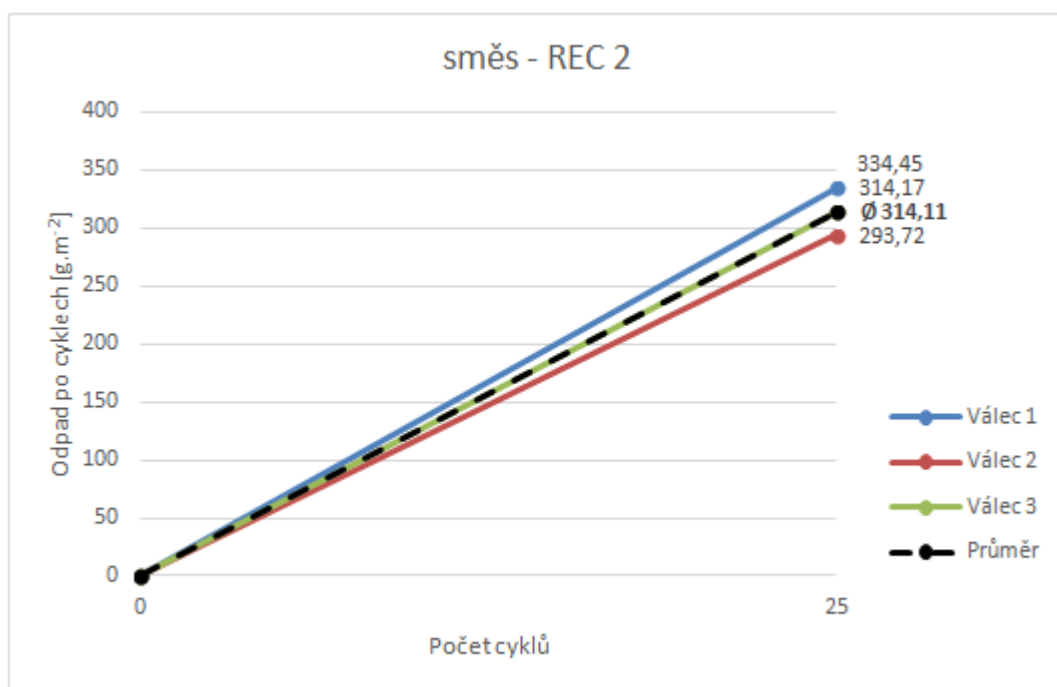
Tabulka 50 – Výsledky zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi proti působení vody a CHRL: směs REC 2

Název zkoušky				Odolnost proti CHRL	
Identifikace zkušební vzorku				REC 2	
Místo provedení zkoušky				Laboratoř VVCD Doubravice	
Datum provedení zkoušky				5. - 12. 12. 2016	
Odchylka od normované zkušební metody				-	
Vypracoval				Bc. Jakub Fořt	
	Odpad po cyklech [g]		Plocha [mm ²]	Odpad po cyklech [g.m ⁻²]	
	25	50		25	50
válec 1	50	X	149,5	334,45	X
válec 2	44	X	149,8	293,72	X
válec 3	47	X	149,6	314,17	X
Průměrná hodnota odpadu				314,11	X

X ... nenaměřená hodnota

Zdroj: [vlastní]

Graf 6 – Odpad po 25 cyklech směsi REC 2



Zdroj: [vlastní]

Obrázek 34 – Vysušené hmotnostní odpady směsí (REF, REC 1, REC 2) po 25. cyklu



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Zatěžování zkušebních těles všech tří směsí bylo ukončeno po 50 cyklech a vyhodnoceno po 25 cyklech. Důvodem bylo protékání rozmrazovacího roztoku (3 % roztok NaCl). Z vyhodnocených výsledků této zkoušky po 25 cyklech zatěžování vyplývá, že směsi

s betonovým recyklátem mají menší odolnost proti cyklickém střídání teplot při působení CHRL.

4.4 Finanční analýza

Významem finanční analýzy stmelené směsi cementem je porovnání cen drceného kameniva a betonového recyklátu. Cena cementu se pohybuje v průměru 100 Kč za 25 kg. Pro názornost jsou uvedeny i ceny směsného a cihelného recyklátu.

Tabulka 51 – Porovnání cen drceného kameniva a recyklovaných materiálů

Porovnání cen drceného kameniva a recyklovaných materiálů			
Typ	Zdroj	Frakce	Cena [Kč/t]
Drcené kamenivo	CEMEX	8/16	330
	CEMEX	16/22	330
	GRANITA	8/16	285
	GRANITA	16/32	270
Betonový recyklát	ATM CZ	0/22	140
	ATM CZ	22/45	210
	ATM CZ	0/63	180
	ECORETEL	0/8	85
	ECORETEL	8/32	195
	ECORETEL	32/63	195
	ECORETEL	0/63	160
Směsný recyklát	ATM CZ	0/22	50
	ATM CZ	22/45	145
	ATM CZ	0/63	120
	ECORETEL	0/8	60
	ECORETEL	8/32	100
	ECORETEL	32/63	85
Cihelný recyklát	ECORETEL	0/8	60
	ECORETEL	8/32	85
	ECORETEL	32/63	85
	ECORETEL	0/63	60

Uvedené ceny jsou bez DPH.

Zdroj: [34] [35] [36] [37] [38]

Závěr:

Při nahrazení klasického stavebního materiálu v konstrukci novým nebo recyklovaným materiálem, je důležitým bodem hodnocení i porovnání cen těchto materiálů. Toto nahrazení může mít i finanční dopad na úpravu technologie výroby. V současné době je rozdíl mezi cenou přírodního drceného kameniva a betonového recyklátu v poměru 2 až 3 krát vyšší při cenách za tunu materiálu. Právě tato skutečnost by mohla přispět k vyššímu využití recyklovaných materiálů.

5 DISKUSE VÝSLEDKŮ

5.1 Zhodnocení vlastního měření

V této diplomové práci bylo realizováno vlastní měření, které se skládalo ze:

- Zjištění a klasifikace geometrických a fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonových recyklátů (zrnitost – síťový rozbor, klasifikace složek betonových recyklátů, nasákavost, tvarový index, trvanlivost – stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování)
- Klasifikace ztvrdlých stmelných směsí cementem (objemová hmotnost, odolnost proti působení mrazu a vodě, pevnost v prostém tlaku)
- Ověření proveditelnosti zkoušky odolnosti povrchu stmelné směsi cementem při cyklickém střídání teplot za působení CHRL na odřezech z válců z důvodu výskytu lokálních poruch krytů vozovek PK
- Finanční analýza receptury stmelné směsi cementem při použití kameniva a betonového recyklátu

Pro takto navržené vlastní měření možnost porovnání vyrobených směsí a zkušebních těles byla vybrána jedna společná receptura stmelné směsi hydraulickým pojivem s označením SC 0/22; C_{8/10}; ČSN 73 6124-1. Stmelná směs podle receptury obsahovala hydraulické pojivo, plnivo a vodu. Hydraulickým pojivem byl použit Portlandský struskový cement CEM II/A-S - 42,5 R z cementárny CEMEX Prachovice. Podle získané receptury byly vyrobeny tři směsi, které se od sebe odlišovaly v použitém plnivu. Plnivem referenční směsi (REF) bylo použito přírodní drcené kamenivo ve frakcích 0/4, 8/16 a 16/22. Ve zbylých dvou směsích bylo drcené kamenivo nahrazeno stejnými frakcemi dvěma různými betonovými recykláty. Tyto dva betonové recykláty byly získány ze dvou různých recyklačních středisek stavebního a demoličního odpadu. Betonový recyklát s označením REC 1 byl získán ve frakci 0/32. Pro použití do experimentu musel být tento betonový recyklát vytříděn na dvě frakce 8/16 a 16/22, které byly následně použity na výrobu stmelné směsi cementem s označením REC 1. Betonový recyklát s označením REC 2 byl získán ve frakci 8/32. Pro použití do experimentu musel být tento betonový recyklát taktéž vytříděn na dvě frakce 8/16 a 16/22, které byly následně použity na výrobu stmelné směsi cementem s označením REC 2. Ani v jedné stmelné směsi nebyly použity chemické přísady a příměsi.

Prvním cílem bylo zjištění a klasifikace geometrických a fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonového recyklátu. Zkoušky geometrických a fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonového recyklátu byly provedeny a vyhodnoceny podle platných norem uvedených u popisu každé zkoušky.

Ze zkoušky stanovení zrnitosti síťovým rozbořem bylo zjištěno, že u betonového recyklátu REC 1 se jedná o kategorii G2 a u betonového recyklátu REC 2 se jedná o kategorii G1 zrnitosti směsi typu 1.

Ze zkoušky klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva vyplývá, že betonový recyklát s označením REC 1 nespĺňuje procentní zastoupení složek hmotnosti v podmínce obsahu R_c o 3,28 % hmotnosti podle *1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů* (TP 210) této práce a podle normy ČSN 12620+A1 lze tento betonový recyklát klasifikovat jako R_{c80} (betonový recyklát s obsahem betonu vyšším než 80 %). Vzhledem k tomu, že se jednalo o toto malé procento nesplnění, bylo rozhodnuto, že bude použito jako plnivo pro výrobu směsi stmelené cementem REC 1. Výhodou tohoto rozhodnutí bylo zjištění, zda bude mít tato skutečnost vliv na výsledek zkoušky pevnosti v prostém tlaku. Druhý betonový recyklát s označením REC 2 splňuje procentní zastoupení složek hmotnosti ve všech podmínkách podle *1.3.1 Dělení recyklovaných stavebních materiálů* (TP 210) této práce a podle normy ČSN 12620+A1 lze tento betonový recyklát klasifikovat jako R_{c90} (betonový recyklát s obsahem betonu vyšším než 90 %).

Z výsledků zkoušky nasákavosti a objemové hmotnosti vyplývá, že betonový recyklát má výrazně vyšší nasákavost a výrazně nižší objemovou hmotnost zrn v porovnání s drceným kamenivem.

Z výsledků zkoušky stanovení tvarového indexu vyplývá, že betonové recykláty frakce 8/16 vykazují obdobný tvarový index jako drcené kamenivo stejné frakce, ale v porovnání frakce 16/22 vykazují zkoušené betonové recykláty lepší tvarový index než drcené kamenivo stejné frakce. Kritérium tvarového indexu použití zrn do použité stmelené směsi ($C_{8/10}$) je hodnota SI_{55} . Toto kritérium bylo splněno u zrn obou betonových recyklátů a drceného kameniva. Tvarový index zrn kameniva souvisí s použitím sít při fázi třídění betonových recyklátů. Z naměřených výsledků tvarového indexu lze usuzovat, že byly použity síta čtvercových otvorů.

Z výsledků zkoušky stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování vyplývá, že betonové recykláty frakce 8/16 vykazují mnohem horší odolnost proti působení mrazu a vodě než drcené kamenivo stejné frakce. Kritérium této odolnosti zrn použité stmelené směsi (C_{8/10}) je hodnota F₄. Toto kritérium bylo splněno u zrn obou betonových recyklátů a drceného kameniva.

Tabulka 52 – Klasifikace fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonových recyklátů

Zkoušky kameniva a betonových recyklátů							
Provedená zkouška	Kritérium	Označení směsi					
		REF		REC 1		REC 2	
		8/16	16/22	8/16	16/22	8/16	16/22
Stanovení zrnitosti	Typ 1: G1, G2	---	---	G2		G1	
Tvarový index	$\leq SI_{55}$	SI ₁₅	SI ₄₀	SI ₂₀	SI ₂₀	SI ₁₅	SI ₁₅
Klasifikace složek	TP 210	---	---	Nevyhovuje		Vyhovuje	
	ČSN 12620+A1	---	---	R _{c80}		R _{c90}	
Nasákavost [%]	---	1,9	1,3	6,2	5,5	5,9	5,2
Objemová hmotnost [Mg/m ³]	---	2,665	2,655	2,204	2,185	2,230	2,107
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	$\leq F_4$	F ₁	---	F ₄	---	F ₄	---

Zdroj: [vlastní]

Druhým cílem bylo zkoušení a klasifikace ztvrdlých stmelných směsí cementem. Zkoušky ztvrdlých stmelných směsí cementem byly provedeny a vyhodnoceny podle platných norem uvedených u popisu každé zkoušky.

Z výsledků zkoušky stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé stmelené směsi vyplývá, že směsi s betonovým recyklátem vykazují nižší objemovou hmotnost než směs z drceného kameniva, což odpovídá porovnání objemové hmotnosti samotného betonového recyklátu a drceného kameniva.

Zkouška pevnosti v prostém tlaku a odolnosti směsí stmelných proti mrazu a vodě byla provedena na zkušebních vzorcích dvou typů stáří. Prvním typem zkoušení byly zkušební tělesa tvaru válce o výšce 120 mm a tvaru krychle o délce hrany 150 mm ve stáří 28 dní. Druhým typem zkoušení byly zkušební tělesa tvaru válce o výšce 120 mm ve stáří 28 dní a následně podrobených zkoušce odolnosti stmelené směsi proti působení mrazu a vodě. Zkušební tělesa tvaru válce se dále dělila na normové zkušební

vzorky vyrobené v normových formách a na nenormové zkušební vzorky nařezané z válců o výšce 300 mm. Z tohoto důvodu nebyly porovnány normové výsledky směsí s nenormovými, proto bylo porovnání rozděleno na normové a nenormové. Z výsledků zkoušky pevnosti v prostém tlaku vyplývá, že nelze provést tuto zkoušku na zkušebních tělesech tvaru krychle. Důvodem je nedostatečné zhutnění zkušebních těles ve tvaru krychle metodou hutnění pomocí hutnicího pěchu. Porovnáním všech tří ztvrdlých směsí na pevnost v prostém tlaku normových zkušebních těles můžeme potvrdit, že referenční směs vyhověla návrhové pevnosti v tlaku použité receptury. Směsi s plnivem betonového recyklátu splnily pevnost v tlaku, ale nesplnily návrhovou pevnost v tlaku, na kterou je receptura navržena. Pro splnění návrhové pevnosti použité receptury by bylo nutné zvýšení procenta obsahu hmotnosti cementu.

Výsledky pevnosti v prostém tlaku po provedení zkoušky odolnosti směsí stmelených cementem proti mrazu a vodě došlo k nárůstu pevnosti u všech tří vyrobených směsí. Všechny tři směsi splnily kritérium této zkoušky, že jejich hodnoty neklesly pod 85 % pevnosti po 28 dnech zrání, ale naopak se ještě zvýšily. Z čehož můžeme usuzovat, že receptura má ještě rezervu ve zvyšování své pevnosti. Co se týče zkušebních vzorků vytvořených nařezáním z válců výšky 300 mm, tedy z nenormového provedení, můžeme říct, že naměřené hodnoty jejich pevnosti v prostém tlaku dosahovaly vyšších hodnot. Tyto hodnoty jsou zcela jistě ovlivněny u spodních válců vyšším hutněním a vytvořeným povrchem, při jejich řezání na výšku 120 mm. Z toho důvodu je vyvozován závěr využití betonového recyklátu z normových zkušebních vzorků.

Po porovnání výsledků pevnosti v tlaku můžeme konstatovat, že nesplnění procentního obsahu R_c o 3,28 % hmotnosti betonového recyklátu REC 1, mělo minimální vliv na výsledek měření.

Třetím cílem bylo ověření proveditelnosti zkoušky odolnosti povrchu stmelené směsi cementem při cyklickém střídání teplot za působení CHRL na odřezech z válců. Tato zkouška byla provedena a vyhodnocena podle platné normy uvedené v popisu zkoušky. Předpokladem provedení této zkoušky byla skutečnost, že dochází k promrzání vrstev vozovky a vlivem lokálních poruch k působení chemických rozmrazovacích látek v podkladních vrstvách vozovek. U provedené zkoušky odolnosti stmelené směsi cementem proti působení mrazu a CHRL bylo zatěžování zkušebních těles všech tří směsí ukončeno po 50 cyklech a vyhodnoceno po 25 cyklech. Důvodem bylo protékání rozmrazovacího roztoku (3 % roztok

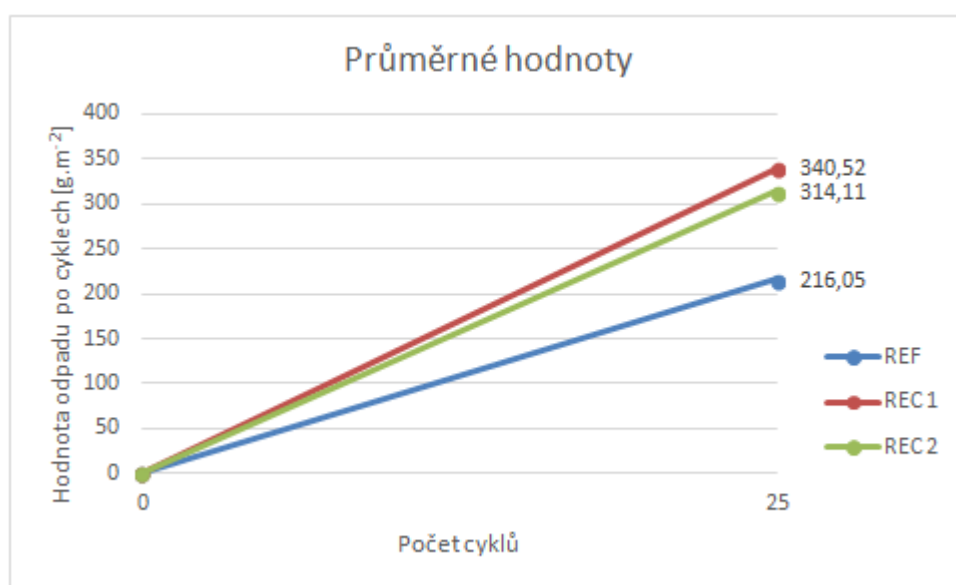
NaCl). Z vyhodnocených výsledků této zkoušky po 25 cyklech zatěžování vyplývá, že směsi s betonovým recyklátem mají menší odolnost proti působení mrazu a CHRL. Vzhledem k malému počtu cyklů zatěžování nebylo dosaženo žádného součinitele odolnosti zkoušené směsi, a proto žádný součinitel odolnosti nebyl vynesen. Z výsledků této zkoušky se nedá vyvodit jednoznačný závěr. Naměřené hodnoty mohou být použity jako orientační pro případné další experimentální zkoumání v tomto směru.

Tabulka 53 – Výsledky zkoušek stmelných směsí cementem na zkušebních tělesech

Zkoušky stmelných směsí cementem na zkušebních tělesech						
Provedená zkouška		Kritérium	Označení směsi			
			REF	REC 1	REC 2	
Objemová hmotnost [kg/m ³]		---	2290	2210	2240	
Pevnost v prosté tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	na krychlích	8	11,0	5,3	5,4	
	na válcích	normová výroba	R _{c28} 10 R _{c_{návrh}28} 11,5	14,5	10,3	10,5
		nenormová výroba	R _{c28} 10 R _{c_{návrh}28} 11,5	17,3	11,7	15,5
Pevnost v prosté tlaku po odolnosti [N/mm ²]	na válcích	normová výroba	R _c ≥ 85 % R _{c28}	15,7	11,4	11,6
		nenormová výroba	R _c ≥ 85 % R _{c28}	20,3	11,9	15,1
Odolnost proti působení mrazu a CHRL [g/m ²]			216,05	340,52	314,11	

Zdroj: [vlastní]

Graf 7 – Průměrné hodnoty odpadu po 25 cyklech na zkušebních vzorcích všech tří vyrobených stmelných směsí



Zdroj: [vlastní]

Čtvrtým cílem byla finanční analýza receptury stmelené směsi cementem při použití kameniva a betonového recyklátu. Při nahrazení klasického stavebního materiálu v konstrukci novým nebo recyklovaným materiálem, je důležitým hodnocením i porovnání cen těchto materiálů. Toto nahrazení může mít i finanční dopad na úpravu technologie výroby. V současné době je rozdíl mezi cenou přírodního drceného kameniva a betonového recyklátu v poměru 2 až 3 krát vyšší při cenách za tunu materiálu. Právě tato skutečnost by mohla přispět k vyššímu využití recyklovaných materiálů. Výhodou výroby recyklovaných materiálů jsou mobilní drtící a třídící linky. Tato multifunkční zařízení mohou drtit recyklovatelný materiál a zároveň ho třídit na požadované frakce využitím různých velikostí třídících sít. Další důležitou funkcí těchto zařízení je separace cizorodých součástí recyklátu.

5.2 Doporučení a poznatky experimentu

Při výrobě stmelených směsí cementem v míchačce MSH 70 bylo výhodnější nejdříve promíchat všechny suché složky a až následně přidat vodu, než přidat vodu do nepromíchaných suchých složek. Hlavním důvodem byl fakt, že vodní součinitel této receptury stmelené směsi cementem byl velmi nízký. V opačném případě by nedošlo k potřebnému promíchání všech složek receptury.

Pro další experimentální poznání betonových recyklátů by bylo vhodné, kdyby byly podrobeny zkoušce odolnosti proti drcení. Pádovým důvodem bylo zjištění, že při hutnění docházelo k občasnému drcení zrn betonového recyklátu, což je patrné na Obrázek 35 – *Detail rozdrcení zrna betonového recyklátu při hutnění*. U referenční směsi (plnivo – drcené kamenivo) nebyl tento problém zjištěn. Bohužel zkouška odolnosti proti drcení nebyla realizována kvůli nesehnání otlukového bubnu potřebného pro tuto zkoušku.

Obrázek 35 – Detail rozdrcení zrna betonového recyklátu při hutnění



Zdroj: [vlastní]

Zkoušku odolnosti stmelené směsi cementem proti působení vody a CHRL nebylo možné realizovat normovým postupem ve větším počtu cyklů, protože docházelo k protékání zkušebních vzorků. U standardních betonových směsí k tomuto problému nedochází. Z tohoto důvodu by bylo vhodné navrhnout či vymyslet nový postup zkoušení, který by simuloval reálné podmínky, protože vlivem poruch krytů vozovek PK může pronikat rozmrazovací roztok do spodních vrstev vozovek PK.

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo shromáždění informací o betonovém recyklátu, který patří mezi stavební a demoliční odpad. Dále pak možnost využití frakcí betonového recyklátu nahradit frakce drceného kameniva do směsí stmelých cementem podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací, které jsou v práci taktéž popsány.

Po provedení rešerše a shrnutí současného stavu poznání bylo realizováno vlastní měření, které bylo rozděleno na zkoušky betonového recyklátu a kameniva, zkoušky čerstvé a ztvrdlé stmelé směsi. Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjištění a porovnání možnosti využití betonového recyklátu ve směsích stmelých cementem do podkladních vrstev. Pro možnost porovnání naměřených výsledků byla použita jedna společná receptura směsi stmelé cementem, podle které byly vyrobeny tři směsi. Tyto tři vyrobené směsi se od sebe lišily použitým plnivem. V referenční směsi bylo použito standardně drcené kamenivo. Ve zbylých dvou vyrobených směsích byl plnivem betonový recyklát získaný z odlišných recyklovaných středisek z blízkého okolí města Pardubice. Prvním krokem vlastního měření bylo zjištění a porovnání fyzikálních vlastností drceného kameniva a betonových recyklátů. Dalším krokem bylo provedení zkoušky zhutnitelnosti pomocí Proctorovy zkoušky, která sloužila k zjištění optimálních vlhkostí pro výrobu směsí. Vyrobena zkušební tělesa byla podrobena zkouškám ztvrdlé stmelé směsi za účelem jejich klasifikace.

Výstupní data z provedeného experimentálního měření na všech třech použitých směsích byla zpracována, vyhodnocena a uvedena ve formách tabulek a grafů. Z výsledků betonových recyklátů můžeme potvrdit, že použité betonové recykláty splnily kritéria jejich využití do směsí stmelých cementem, ale vykazují horší fyzikální vlastnosti než přírodní drcené kamenivo. Porovnáním všech tří ztvrdlých směsí na pevnost v prostém tlaku normových zkušebních těles můžeme potvrdit, že referenční směs vyhověla návrhové pevnosti v tlaku použité receptury. Směsi s plnivem betonového recyklátu splnily pevnost v tlaku, ale nesplnily návrhovou pevnost v tlaku, na kterou je receptura navržena. Pro splnění návrhové pevnosti použité receptury by bylo nutné zvýšení procenta obsahu hmotnosti cementu. Po provedení zkoušky odolnosti směsí stmelých cementem proti mrazu a vodě došlo k nárůstu pevnosti u všech tří vyrobených směsí. Z čehož můžeme usuzovat, že receptura má ještě rezervu ve zvyšování své pevnosti. Výsledky provedeného měření jsou uvedeny v kapitole 5. Diskuse výsledků provedeného měření je uvedena v kapitole 6.

Z naměřených a vyhodnocených výsledků vlastního měření na vyrobených zkušebních tělesech lze usoudit, že využití betonového recyklátu do podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací nahrazením za drcené kamenivo je možné. Předpokladem musí být znalost jejich aktuálních vlastností, které jsou zjišťovány pomocí laboratorních zkoušek a podle nich přizpůsobena použitá receptura, hlavně množství cementu.

Rozvoj v oblasti recyklace je v současné době značně pokročilý. V budoucnu se musíme pokusit o zpětné využití všech složek recyklovaného materiálu, které nejsou využívány a jsou uloženy na skládkách recyklačních středisek stavebních a demoličních materiálů. Tato skutečnost má negativní vliv na životní prostředí. Na základě zjištěné problematiky recyklace stavebních a demoličních odpadů v některých zemích EU lze jednoznačně konstatovat, že pro další rozšíření využívání recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů by výrazně prospěla tvorba jednotného systému jejich posuzování. Tento jednotný systém posuzování by byl přínosný při jejich používání i pro investory a dodavatele staveb.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Stavební a demoliční odpady*. [online]. B.m.: Ministerstvo životního prostředí, nedatováno. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady
- [2] KUDRNA, Jan. *Podkladní vrstvy a navrhování vozovek* [online]. 2011. Dostupné z: <http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf>
- [3] STEHLÍK, Dušan. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích* [online]. 2006. Dostupné z: [http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20\(semester%201%20-%202010\)%20-%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%9Ama%203%20text%20-%20Nestmelen%C3%A9%20podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf](http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20(semester%201%20-%202010)%20-%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%9Ama%203%20text%20-%20Nestmelen%C3%A9%20podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf)
- [4] KUDRNA, Jan. *Pozemní komunikace II* [online]. 2005. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BM02-Pozemni%20komunikace%20II/pozemni%20kom%207%20Navrhovani%20vozovek.pdf>
- [5] ČSN 73 6126-1. *Stavba vozovek - Nestmelené vrstvy - Část 1: Provádění a kontrola shody*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006
- [6] ČSN 73 6126-2. *Stavba vozovek - Nestmelené vrstvy - Část 2: Vrstva z vibrovaného štěrku*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2006
- [7] ČSN EN 14227-1. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2013
- [8] ČSN 73 6124-1. *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [9] STEHLÍK, Dušan. *Recykláty do stmelených podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací. Recycling 2013: „Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin“: Sborník přednášek 18. ročníku konference*. B.m.: VUT Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4688-5.
- [10] TP 210. *Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací* [online]. B.m.: Ministerstvo dopravy obor silniční infrastruktury, 2011. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20210.pdf>
- [11] ČSN EN 933-11. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [12] ŠKOPÁN, Miroslav. *Metodická příručka pro podporu využívání a recyklaci stavebních odpadů*. 1999.

- [13] *Základní druhy recyklátů a možnosti jejich využití. Citace 30.12.2016* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.arasm.cz/recyklaty.php>
- [14] *Podstata recyklace stavebních odpadů. Citace 29.12.2016* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.arasm.cz/podstata.php>
- [15] NOVOTNÝ, Miloslav. *Recyklace vzniklé stavební suti s možností jeho využití. Citace 29.12.2016* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/recyklace-vznikle-stavebni-suti-s-moznosti-jejeho-vyuziti/>
- [16] *Kuželový, čelistový, odrazový drtič. Citace 29.12.2016* [online]. B.m.: Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, nedatováno. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>
- [17] *Recykláty, betonový recyklát. Citace 30.12.2016* [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.fasvoboda.cz/recyklaty/#recyklat_podsitni
- [18] *Betonový recyklát. Citace 30.12.2016* [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.dufonev.cz/popis_recyklatu-dep.php#betonovy
- [19] KOLEKTIV AUTORŮ: PERNICOVÁ, R.; DOBIÁŠ, D.; KOLÍSKO, J. *Modernizace dálnice D1, Rešeršní analýza možnosti využití recyklovaného betonu RCA do vrstvy CBK*. Praha: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6 – Dejvice, 2013.
- [20] HASSAN, K. E., B. CHADDOCK, J. W. E. CHANDLER, C. ROBERTS, C. COLEY, A. BADR A J. P. EDWARDS. *Development of performance tests for HBM. Citace 30.12.2016* [online]. B.m.: Banbury: Waste & Resources Action Programme, 2008. Dostupné z: http://www.sustainableaggregates.com/library/docs/wrap/L0334_AGG79-004_TRL.pdf
- [21] TEREZA PAVLŮ. *Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu* [online]. B.m.: Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební ČVUT v Praze. 26. srpen 2013. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>
- [22] ČSN EN 1097-5. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008
- [23] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2012
- [24] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008
- [25] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014

- [26] ČSN EN 933-4. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008
- [27] ČSN EN 13242+A1. *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2013
- [28] ČSN EN 1367-1. *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2007
- [29] ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011
- [30] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009
- [31] ČSN 73 6124-1. *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody. Příloha A*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [32] ČSN EN 13286-41. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2004
- [33] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Změna Z1*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2003
- [34] ATM CZ. *Ceník recyklátu* [online]. Dostupné z: <http://www.atmcz.cz/files/tinymce/Cen%C3%ADk%20recykl%C3%A1t%C5%AF%20ATM%20CZ%20a.s.%202014.pdf>
- [35] SK EKO. *Orientační ceník - areál recyklace Rybitví* [online]. Dostupné z: http://www.skeko.cz/media/files/sk-eko-cenik-recyklace-2015_04_01.pdf
- [36] CEMEX. *Ceník betonových směsí a dopravy* [online]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/betonarna-pardubice-semtin.aspx>
- [37] ECORETEL. *Prodej recyklátu - cihelný, betonový, směsný* [online]. Dostupné z: <http://www.ecoretel.cz/recyklace-stavebnich-demolicnich-odpadu/nabidka-sluzeb/prodej-recyklatu--cihelny-betonovy-smesny->
- [38] GRANITA. *Ceník výrobků* [online]. Dostupné z: <http://www.granita.cz/cenik.html>

8 PŘÍLOHY

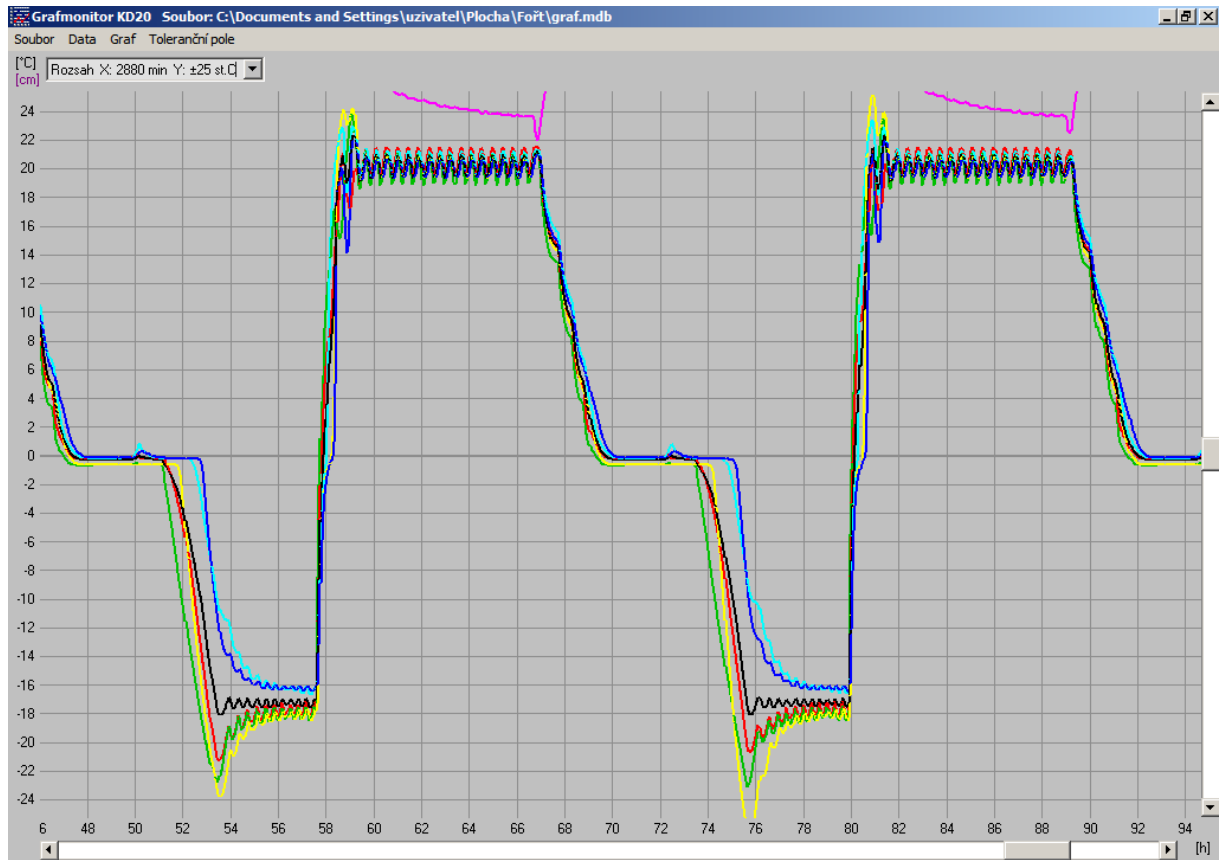
8.1 Přílohy spojené s experimentem

Obrázek 36 – *Detail betonového recyklátu REC 2*



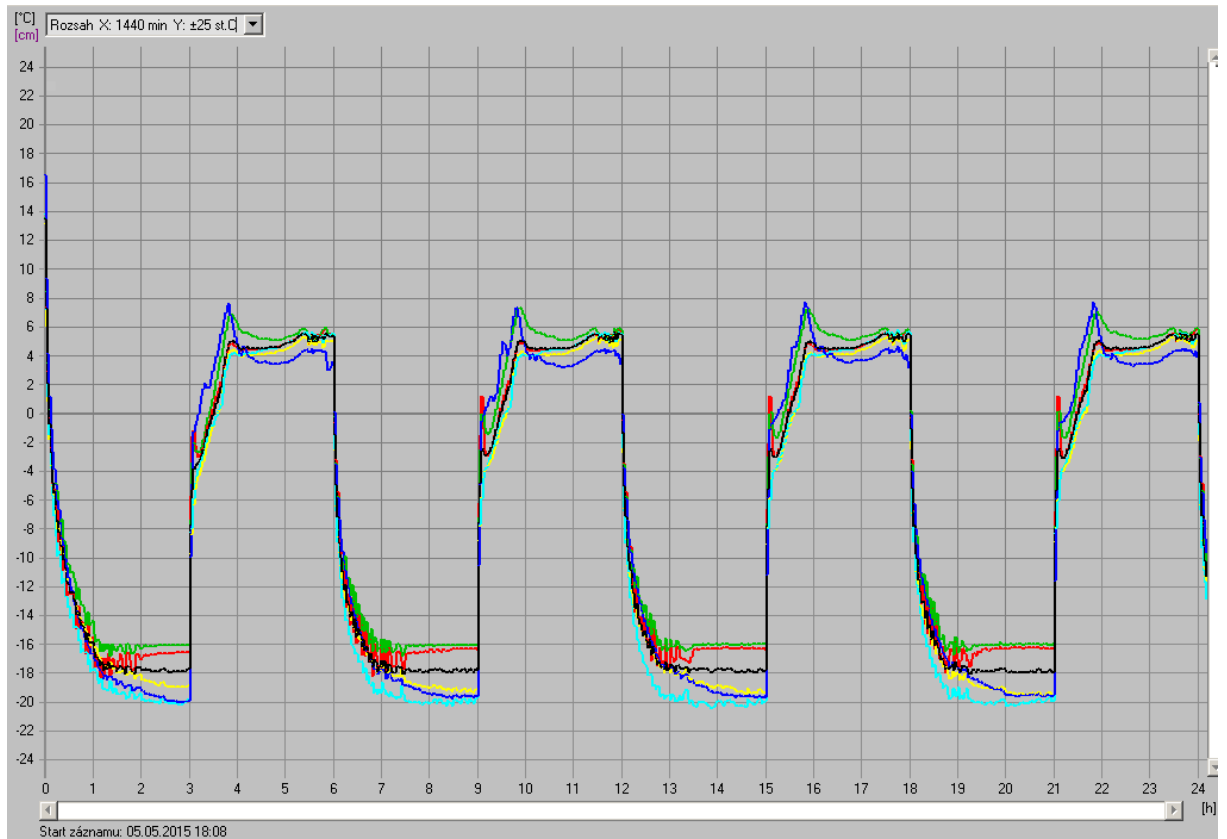
Zdroj: [vlastní]

Graf 8 – Část průběhu teplot při zkoušce odolnosti proti působení mrazu a vodě v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3



Zdroj: [vlastní]

Graf 9 – Část průběhu teplot při zkoušce odolnosti povrchu proti působení vody a CHRL v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3



Zdroj: [vlastní]

Obrázek 37 – Připravená zkušební tělesa pro zkoušku odolnosti povrchu proti působení vody a CHRL v automatickém cyklovacím zařízení KD 20.3



Zdroj: [vlastní]

Obrázek 38 – Ukázky povrchu zkušebních těles vzniklého řezem kotoučové pily; směs REC 1 (vlevo), směs REC 2 (uprostřed), směs REF (vpravo)



Zdroj: [vlastní]

8.2 Doklady



Prohlášení o vlastnostech

č. 1020-CPR-040 019100-15

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku: Portlandský struskový cement EN 197-1-CEM – II/A-S 42,5 R
2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití: Příprava betonu, malty, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a pro výrobu stavebních výrobků
3. Výrobce: CEMEX Cement, k.s., Tovární 296, 53804 Prachovice, Česká republika
4. Systém POSV: 1+
5. Harmonizovaná norma: EN 197-1:2011

Oznámený subjekt: Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, NB 1020

6. Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Cement pro obecné použití - složení	CEM II/A-S	EN 197-1:2011
Pevnost v tlaku (počáteční a normalizovaná pevnost)	42,5 R	
Počátek tuhnutí	splněno	
Nerozpustný zbytek	splněno	
Ztráta žiháním	splněno	
Objemová stálost	splněno	
Obsah síranů	splněno	
Hydratační teplo	splněno	
Obsah chloridů	splněno	

Toto prohlášení o vlastnostech je zpřístupněno na internetové stránce výrobce: www.cemex.cz

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Karol Czubara

V Prachovicích

dne 18.5.2015