

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití recyklátů do stmelených konstrukčních vrstev vozovek

Bc. David Hořák

Diplomová práce

2019

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Hořák**
Osobní číslo: **D16394**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Využití recyklátů do stmelěných konstrukčních vrstev vozovek**
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 :

V rámci diplomové práce prozkoumejte problematiku vhodnosti využití recyklátů do stmelěných vrstev konstrukce pozemních komunikací se zaměřením zejména na asfaltový recyklát. V práci se zaměřte na zhodnocení míry použitelnosti, ekonomické hledisko a vliv na životní prostředí záměny za klasické materiály, které se v současnosti používají. Práce bude obsahovat rešeršní, teoretickou a experimentální část tj. problematika a zhodnocení přístupu v České republice a v zahraničí a laboratorní experiment s využitím R-materiálu vyzískaný z recyklace pozemních komunikací. Výsledkem laboratorní práce bude směs, kde plnivem bude asfaltový recyklát a směs bude splňovat požadované parametry. Struktura práce je naznačena níže.

- Úvod
- Analýza současného stavu
- Stanovení cílů
- Příprava a vypracování experimentu
- Vyhodnocení a diskuze nad výsledky
- Závěr a doporučení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSN 73 6124 - Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy - Provádění a kontrola shody (2014)

ČSN 14 227-1 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - směsi stmelené cementem (2013)

TP 208 - Recyklace konstrukčních vrstev za studena (2009)

TP 210 - Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací (2011)

TKP 5 - Podkladní vrstvy (2015)

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Lopour, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **26. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. ledna 2019**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. října 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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 č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnici Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Liberci dne

.....

podpis autora

Bc. David Hořák

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Lopourovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady, ochotu a vynaložený čas. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za umožnění studia na vysoké škole, kde jsem se mohl dále rozvíjet a vzdělávat. Velké díky patří také mé přítelkyni, která mi poskytovala převážně psychickou podporu a chápala, že v určitých okamžicích bylo studium na prvním místě. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat zástupcům společnosti EUROVIA CS, a.s. a VIALAB CZ s.r.o. za možnost využití jejich laboratoře, poskytnuté rady, konstruktivní připomínky, jejich čas a nezbytné informace, které mi posloužily ke tvorbě mé diplomové práce.

ANOTACE

Práce se zaměřuje na problematiku znovuvyužití asfaltového recyklátu do stmelených konstrukčních vrstev vozovek. Z hlediska udržitelnosti bude hledána taková směs, kde plnivem bude asfaltový recyklát vyzískaný z frézování pozemních komunikací. Navržená směs bude možnou náhradou za běžně používané směsi pro stmelené vrstvy při recyklaci pozemních komunikací za studena. Jednotlivé parametry směsi budou prokázány a vyhodnoceny laboratorně. V závěru práce budou výstupy porovnány a posouzeny z hlediska vlivu na společnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

asfaltový recyklát, R-materiál, stmelená směs cementem, podkladní vrstva pozemní komunikace, recyklace za studena

TITLE

Use of recycled materials in stabilized construction layers of roads

ANNOTATION.

The thesis is focused on the problematics of reuse of asphalt recycled material into bonded structural layers of roads. In terms of sustainability, such a mixture will be sought, where the filler will be the asphalt recycled recovered from road milling. The designed mixture will be possible substitute for commonly used mixtures for bonded layers at cold recycling of roads. Mixture parameters will be proven and evaluated by laboratory. In the end of my work, outputs will be compared and asses from therms of influence on society.

KEYWORDS

asphalt recycled, R-material, cemented cement mixture, the underlying layer of road communications, cold recycling

OBSAH

ÚVOD	9
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU	11
1.1 <i>Užití recyklovaného materiálu do pozemních komunikací</i>	<i>11</i>
1.1.1 Požadavky na recyklované kamenivo.....	15
1.1.2 Nestmelené vrstvy	17
1.1.3 Stmelené vrstvy.....	18
1.1.4 Maximální množství R-materiálu ve směsi	23
1.2 <i>Poznátky ze zahraničí</i>	<i>24</i>
1.3 <i>Použití asfaltové recyklátu v České republice</i>	<i>31</i>
1.3.1 Přístupy a rozpory předpisů	33
1.4 <i>Získávání recyklovaného materiálu</i>	<i>37</i>
1.5 <i>Stavební a demoliční odpad (SDO)</i>	<i>44</i>
1.5.1 Výroba recyklovaných stavebních materiálů	47
1.5.2 Dělení recyklovaného stavebního materiálu	51
1.6 <i>Asfaltový recyklát</i>	<i>55</i>
1.7 <i>Recyklace asfaltových vrstev liniových staveb.....</i>	<i>57</i>
1.7.1 Recyklace asfaltových směsí na místě za studena	58
1.7.2 Recyklace asfaltových směsí v míchacím centru za studena	70
1.8 <i>Shrnutí současného stavu.....</i>	<i>72</i>
2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	74
3 PŘÍPRAVA A VYPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU	75
3.1 <i>Použité vstupy, výroba směsí a hledané receptury.....</i>	<i>75</i>
3.1.1 R-materiál	76
3.1.2 Fluidní popílek.....	76
3.1.3 Cement.....	77
3.1.4 Přírodní drcené kamenivo.....	79
3.1.5 Voda	79
3.1.6 Výroba směsí a hledané receptury	79
3.2 <i>Požadované zkušební metody</i>	<i>82</i>
3.2.1 Zkušební metody vstupních materiálů.....	83
3.2.2 Zkušební metody čerstvě stmelené směsí	87
3.2.3 Popis výroby zkušebních těles	96
3.2.4 Zkušební metody ztvrdlé směsí.....	98

3.3	<i>Výsledky laboratorních zkoušek</i>	105
3.3.1	<i>Výsledky zkoušek jednotlivých vstupních složek</i>	105
3.3.2	<i>Výsledky zkoušek stmelené směsi</i>	121
3.3.3	<i>Výsledky zkoušek ztvrdlé směsi</i>	133
3.4	<i>Realizace stmelené podkladní vrstvy z R-materiálu</i>	146
4	VYHODNOCENÍ A DISKUZE NAD VÝSLEDKY	159
4.1	<i>Rozbor navržených receptur a jejich využití</i>	159
4.2	<i>Návrh dalšího směru výzkumu</i>	162
4.3	<i>Porovnání metod realizace s posouzením dle vlastního ukazatele</i>	162
4.3.1	<i>Konvenční technologie</i>	163
4.3.2	<i>Recyklace za studena na místě</i>	164
4.3.3	<i>Recyklace za studena v míchacím mobilním centru</i>	167
4.3.4	<i>Výsledek porovnání metod realizace podle vlastního ukazatele</i>	168
	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ	169
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	172
	SEZNAM TABULEK	176
	SEZNAM OBRÁZKŮ	178
	SEZNAM ROVNIC	180
	SEZNAM ZKRATEK	181

ÚVOD

V dnešním rychle se měnícím světě, kde je stále větší požadavek na rozšiřování dopravní infrastruktury, nejen v České republice, ale i v zahraničí. A s ohledem na stále se zvyšující dopravní zatížení pozemních komunikací, kde podíl automobilové i nákladní dopravy stále roste. Má za následek, že některé dnešní komunikace nespĺňují požadavky z hlediska kapacity. Hlavně v době dopravních špiček dochází k tvorbě kongesce, která má za následek neustále brždění, stání a rozjíždění vozidel. Těmito jevy dochází k nadměrnému poškozování konstrukce vozovky a následnému snižování životnosti komunikace.

Tato skutečnost má za následek požadavek na rychlou údržbu, či rekonstrukci komunikace z hlediska udržitelnosti kvality dopravy. S požadavkem na údržbu nebo rekonstrukci komunikace, je neoddiskutovatelně spojeno ekonomické hledisko a vliv na životní prostředí. Z tohoto důvodu se hledají alternativy za drahé přírodní materiály, které nejsou ani kolikrát v dané lokalitě k dispozici a jejich těžba, zpracování a doprava by byla šetrnější k životnímu prostředí. Proto je nezbytné zvážit využití nejlevnějších dostupných materiálů a příslušných technologických postupů, které jsou momentálně u nás k dispozici. Mezi nejlevnější stavební materiály patří stavební a demoliční odpad, který vzniká při různých stavebních činnostech. Důležitým ukazatelem je to, že stavební a demoliční odpad tvoří přes polovinu všech odpadů, které na území České republiky vyprodukuje. [2] V současnosti se již drtivá většina stavebního a demoličního odpadu využije a slouží jako významný zdroj druhotných surovin.

V mé práci se budu zabývat recyklací asfaltových vrstev vozovek a opětovnému použití tohoto druhotného materiálu do stmelených vrstev vozovek. Recyklace vozovek je ideální způsob, jak docílit k rychlé opravě komunikace, zachovat přírodní zdroje a snížit tak finanční náklady na stavbu. Práce se skládá z rešeršní části, teoretické a experimentální. V rešeršní části práce se budu věnovat dané problematice, rozebrání aktuálního problému. Budou přiblíženy jednotlivé technologie recyklací vozovek. Dále se zaměřím na aktuální využití stavebního demoličního odpadu a jeho členění. S tím souvisí i požadavky na využití recyklovaného materiálu do konstrukce pozemní komunikace. Bude zhodnocena problematika aktuální legislativy a budou porovnány přístupy a zkušenosti v České republice a v zahraničí. Teoretická a experimentální část bude zaměřena na provádění průkazných zkoušek v laboratoři. Laboratorní část bude zaměřena na nalezení ideální směsi, která bude obsahovat jako plnivo asfaltový recyklát získaný z recyklace pozemních komunikací.

Směs bude splňovat požadované parametry, dle platné legislativy. Tudíž bude možnou náhradou za klasické receptury, které se v současnosti používají pro realizaci stmelených vrstev vozovek.

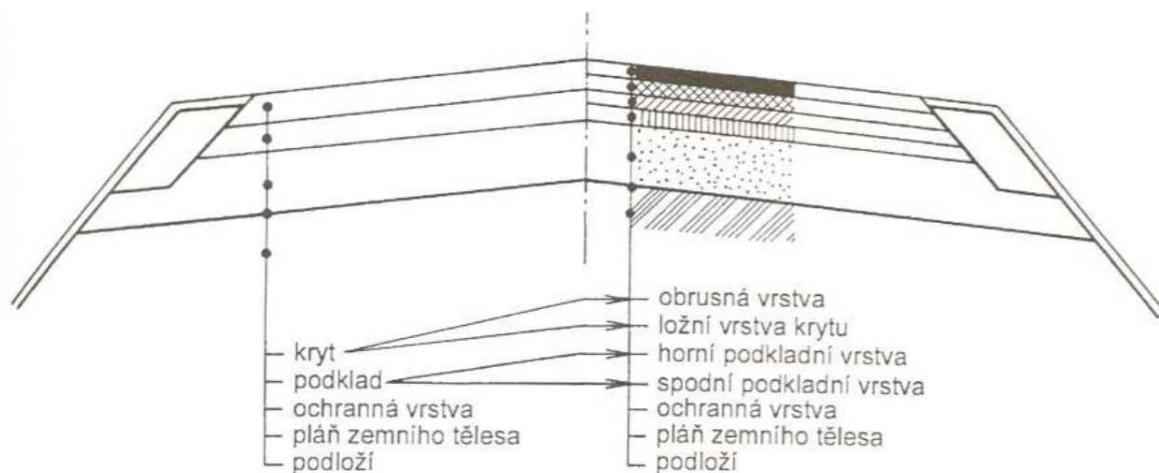
V závěru práce bude rozebrána navržená receptura a návrh jejího využití. Následně bude interpretováno zamyšlení budoucího směru výzkumu. V úplném závěru práce proběhne porovnání technologií pokládky z hlediska hodnocení pomocí vlastního ukazatele. Kde budou zmíněny jednotlivé výhody a nevýhody realizace. Dále bude zhodnocena vhodnost využití, časová náročnost, ekonomické hledisko a samozřejmě také vliv na životní prostředí.

1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

V první části diplomové práce bude popsána aktuální situace kolem asfaltového recyklátu a jeho znovuvyužití do konstrukcí pozemních komunikací. Nejprve se zaměřím na aktuální využití asfaltového recyklátu do nestmelených i stmelených částí liniových staveb. Následně budou rozebrány poznatky ze zahraničí a porovnání s přístupy u nás. Zaměřím se i na rozpory v aktuálně platné legislativě. Následně se budu zabývat jeho získáním. S čím nezbytně souvisí zařazení stavebně demoličních odpadů. Důležitým bodem bude definice konkrétního druhotného materiálu, popis jeho vlastností a rozebrání problematiky skladování. Nakonec budou popsány jednotlivé technologie studené recyklace netuhých vozovek a zhodnocen aktuální stav dané problematiky v České republice.

1.1 Užití recyklovaného materiálu do pozemních komunikací

Obecně je známo, že na pozemní komunikace jsou kladeny základní požadavky na zajištění bezpečného, hospodárného a pohodlného provozu silničních vozidel. Tyto základní tři požadavky silničního provozu jsou dále spojeny s minimalizováním škodlivého vlivu na životní prostředí a vysokého hluku. Rozhodujícím faktorem jednotlivých požadavků na kvalitu silničního provozu je dopravní význam dané komunikace. Je rozdíl, zda se jedná o místní, regionální nebo mezinárodní komunikaci. S dopravním významem dané komunikace také souvisí její třída dopravního zatížení, která nám stanovuje skladbu a počet vozidel, která projedou po stanovené komunikaci za daný časový interval. Díky tomuto ukazateli jsou navrhovány jednotlivé tloušťky vrstev konstrukce pozemních komunikací a návrh probíhá pomocí předpisu TP 170 vydaného ministerstvem dopravy České republiky. Na stavby dopravního charakteru jsou obecně kladeny jakostní požadavky na zajištění rovnosti v příčném a podélném směru, docílení požadovaných protismykových vlastností a minimalizování krytových poruch. Je jedno, zda se jedná o asfaltobetonový, dlažební nebo cementobetonový kryt komunikace, únosnost vozovky zajišťují podkladní vrstvy. Jejich kvalitní provedení přímo ovlivňuje životnost celé konstrukce během návrhové období, které je předpokládáno na 25 let. Podkladní vrstvy jsou děleny dle použití pojiva na vrstvy nestmelené a stmelené. Přenášejí zatížení způsobené dopravou a rozkládá jej na větší plochu podloží.



Obrázek 1 – Schéma konstrukce vozovky [29]

Již v minulosti na našem území bylo prokázáno, že asfaltové recykláty jsou velice vhodné pro technologie, které se zaměřují na studenou recyklaci s použitím emulzí, cementů, případně jejich kombinací. Při tomto procesu dochází k obalení ekologicky závadných částic a tím je docíleno k ochraně znehodnocení odpadních vod a blízkého okolí zájmové stavby. Upravený asfaltový recyklát může mít při správné úpravě stejné, ale i lepší kvalitativní vlastnosti než přírodní materiály. Konstruktivní vrstvy pozemních komunikací realizované z recyklovaných materiálů jsou tedy stejně hodnotné jako vrstvy vytvořené ze zánovních materiálů. Oblasti využití recyklovaného materiálu u dopravních staveb je zejména v podkladních vrstvách, ochranných, ale také v asfaltobetonových krytových vrstvách konstrukce komunikace. Zabudování asfaltového recyklátu je přímo závislé na charakteru provozu a třídě dopravního zatížení dané komunikace.

Níže budou uvedené možnosti použití asfaltového recyklátu za studena v návaznosti na použitém pojiva:

- bez přidání jakéhokoliv pojiva se hlavní uplatnění asfaltového recyklátu nachází v zabudování do spodních podkladních vrstev vozovek a pro zpevnění šterkopískových podkladních vrstev u málo zatížených komunikací.
- s přidáním hydraulického pojiva, kterým je ve většině případů cement, struska nebo vápno se asfaltový recyklát využívá k provedení nové stmelené podkladní vrstvy.

- přidání asfaltové emulze je vhodné zejména tam, kde se v asfaltovém recyklátu nachází staré dehtové pojivo.
- kombinací jednotlivých pojiv, kdy k recyklovanému materiálu je přidána složka cementu i emulze. Tato směs má prokazatelně stejné vlastnosti jako obalované kamenivo zpracované za horka. [27]

Typ RSM ³⁾	Konstrukční vrstvy pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso ⁴⁾
	AB	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠDa	ŠDb	MZ		Kostr ¹⁾	Výplň ²⁾	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+0	+	0/-	+0	+
Recyklát směsný	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+0 ⁵⁾	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát asfaltový	+	-	+0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Vysvětlivky:
+ ... doporučuje se používat
- ... nedoporučuje se používat
0 ... podmíněně použitelný (omezené např. z technologických, ekonomických nebo ekologických důvodů apod.)
AB ... asfaltové vrstvy vozovek PK
CB ... cementobetonové kryty vozovek PK, po splnění požadavků ČSN EN 13877-1 možné použití do spodní vrstvy dvouvrstvého CB krytu.
¹⁾ Kostra ... u prolévaných vrstev např. kamenivo frakce 32/63, případně u vibrovaného štěrku VŠ (podle ČSN 73 6126-2)
²⁾ Výplň ... u prolévaných vrstev jako součást výplňové malty nebo vibrovaného štěrku (VŠ) např. kamenivo frakce 8/11
³⁾ Zkratka RSM je vysvětlena výše viz. bod 1.4.1
⁴⁾ Zrnitý materiál do podloží vozovek, vrstevnatých násypů (ztužující vrstva), případně nezpevněných krajnic vozovky PK
⁵⁾ Pro recyklované kamenivo do CB krytů lze použít, po splnění požadavků ČSN EN 13877-1, pouze separovaný materiál drcený ze starého CB krytu.

Tabulka 1 – Doporučené užití RSM dle zastoupení základního materiálu [15]

Asfaltové recykláty je možné použít jako náhradu za klasické materiály spojené s výstavbou dopravních komunikací. Díky tabulce č. 1 můžeme vidět, že uplatnění zabudování asfaltového recyklátu je možné hlavně v asfaltobetonovém krytu nebo v podkladních vrstvách vozovky. Tudíž asfaltový recyklát se používá nejen ve studené a horké asfaltové směsi, ale také i v nestmelených vrstvách vozovky. Nicméně plnohodnotné využití není prozatím zajištěno. Hlavním důvodem je zejména nejednotná kvalita recyklátů, která hraje hlavní roli v rozhodování investorů o zabudování druhotného materiálu do konstrukce vozovek. Za překážky opětovného využití recyklátu nelze označit nedokonalosti výrobních technologií nebo málo výkonná výrobní zařízení.

Hlavním problémem v případě opětovného využití odfrézovaného materiálu z konstrukčních vrstev vozovek vidím v oblastech:

- nestejnorodosti vyfrézovaného materiálu, který je ovlivněn celou řadou odlišných technologií, které se používají při lokálních opravách a údržbě komunikace.

- nedisciplinovanosti provádění frézování po vrstvách, neexistuje motivace pro zhotovitele ze strany investora nebo státu.

- nedokonalá legislativa v České republice, která z hlediska systému řízení majetku nepovažuje původní materiál vozovky za velmi cennou materiálovou surovinu.

- prioritní využívání recyklovaného materiálu pro druhotné účely, díky levné nabídce materiálu je i poměrně velká poptávka.

- jistá neakceptovatelnost nových trendů.

- nedostatečné zohlednění analýz vlivu na životní prostředí. Hlavně co se týká energetické náročnosti výroby a uhlíkové stopy.

Plnohodnotné využití asfaltového recyklátu by se mělo týkat převážně použití do asfaltových směsí. U využití asfaltového recyklátu do nestmelených směsí bychom měli být opatrnější a používat ho jen v omezeném rozsahu, neboť vlivem pomalu jedoucích nebo zastavujících se nákladních vozidel, dochází k nevratnému dotvarování asfaltových slepenců. Což má za následek vznik trvalých deformací vozovky. Proto je vhodné směsi asfaltového recyklátu stmelit vhodným pojivem. Recyklované materiály jsou při správném způsobu užití v mnoha případech stejné hodnotné jako materiály přírodní. [12]

1.1.1 Požadavky na recyklované kamenivo

Recyklované kamenivo patří mezi vstupní materiály pro budoucí vytvoření stmelené nebo nestmelené směsi. Budoucí použití do směsi stmelené nebo nestmelené ovlivňuje jednotlivé stanovené požadavky na recyklované kamenivo. V experimentální části mé práci se zaměřím na využití asfaltového recyklátu ve stmelěných vrstvách, proto v této kapitole budou uvedeny jen požadavky na materiál, který bude zabudován spolu s pojivem. R-materiál nebo recyklovaného kamenivo je externě dodáváno nebo se vyzíská přímo na místě z původní vrstvy krytu konstrukce. Variantou je i vhodná kombinace těchto postupů. Metody zpracování a výroby stanovuje TP 210. Aktuální legislativa poukazuje na fakt, že kamenivo, které již jednou bylo zabudováno do konstrukce, muselo splňovat určité parametry, tudíž při recyklaci nejsou požadavky na prokázání určitých vlastností kameniva. Toto ovšem neplatí v případě, že recyklované kamenivo je na stavbu externě dovezeno z jiných zdrojů nebo obsah jeho původu není znám. V tomto případě musí zhotovitel doložit prokázání všech požadovaných vlastností, které na recyklované kamenivo stanovuje aktuální legislativa. V předpisu TP 208 jsou dále uvedené další požadavky na recyklované kamenivo:

- Při využití asfaltové emulze u recyklace vrstev realizovaných z asfaltových směsí musí mít externě dodávané kamenivo vlastnosti dle ČSN EN 13 043.

- U recyklace, kde zastoupení asfaltových směsí je jen částečné, musí externě dodávané kamenivo prokázat vlastnosti dle ČSN EN 13 242+A1 a obsah složek hrubého recyklovaného kameniva musí splňovat zařazení do určitých skupin.

- Poslední požadavek se týká obsahu dehtu v recyklovaném materiálu. Přítomnost dehtu se pozná charakteristickým zápachem na čerstvě odlomené ploše nebo po prohnětení v ruce studeného zkušební vzorku. Naopak samotný asfalt je cítit při zvýšené teplotě směsi. Ovšem při technologii recyklace na místě je možné recyklovaný materiál s obsahem dehtu použít bez zvláštních opatření, neboť samotné pojivo docílí obalení jednotlivých zrn. [12]

V této tabulce č.2 jsou uvedené další požadavky na recyklované kamenivo použité do stmelených směsí, které se dále dělí dle použitého pojiva. Tyto doporučené požadavky slouží pro usnadnění splnění závazných požadavků na samotné recyklované směsi, tudíž jejich požadavky není nezbytné splnit.

Vlastnost		Požadavky na recyklované kamenivo při použití pojiva		
		cement nebo jiné hydraulické pojivo	cement + asfaltové emulze nebo zpěněný asfalt	asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt
Označení směsi	recyklace na místě	0/32; 0/45; 0/63		0/32
	recyklace v centru	0/16; 0/22; 0/32; 0/45		0/16; 0/22; 0/32
Max. obsah jemných částic		f_{15}	f_{15}	f_6
Kvalita jemných částic		$I_p \leq 17$	$I_p \leq 17$	-
Nadsítné		10%	10%	10%

Tabulka 2 – Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy [12]

Musíme si uvědomit, že skladování vybouraného materiálu má zásadní vliv na jeho kvalitu. Zásady jeho skladování vyplývají z jeho vlastností a z technologie vyzískání, kdy na deponii by měl být jednoznačně označen druh a původ vyfrézované asfaltové směsi. Jedná se především o fakt, že asfaltový recyklát obsahuje okolo 4,5 % až 7 % hmotnosti asfaltového pojiva. Proto je nutné původní směs chránit před celou řadou znehodnocujících faktorů. Proti nadměrné zvyšování vlhkosti ve skladované směsi je nezbytné, aby recyklační linka nebo deponie byla vybavena zpevněnou skladovací plochou, která má zajištěný odvod srážkové vody díky potřebnému vyspádování. Ideálně v kombinaci se zastřešením. Přímé sluneční záření recyklované asfaltové směsi také neprospívá, dochází ke spečení jednotlivých zrn frakce. Znovustmelení asfaltové směsi lze zabránit postříkem povrchu skládky vápenným mlékem, posypem povrchu práškovým vápnem nebo dolomitickým pískem. K samostmelení skladované asfaltové směsi může také dojít díky vlastní váze materiálu, proto je omezená skladovací výška kopy na 4 metry. Bezpodmínečně musí být na skládce takový provoz, aby nedocházelo k přímému pojíždění skladovaného asfaltového recyklátu. Před použitím se doporučuje původní asfaltovou směs párkrát intenzivně přehodit bagrem, aby bylo docíleno k homogenizaci směsi. Z těchto skutečností jasně vyplývá, že kvalita recyklovaného kameniva je přímo úměrná výrobní kázi při získávání, přepravě, skladování a zpracování materiálu.

1.1.2 Nestmelené vrstvy

Jsou to takové podkladní vrstvy vozovek pozemních komunikací, které jsou tvořeny zrnitým materiálem, neobsahují žádné přidané pojivo ani příměsi. Využívají se převážně tyto materiály: vhodná zemina, kamenivo, recykláty nebo jejich směsi. Druh použitého materiálu přímo ovlivňuje únosnost podkladní vrstvy. Přednostně se používají materiály s vysokou smykovou pevností, kterou splňuje drcené kamenivo. U nestmelených vrstev bývá pravidlem, že použité materiály se vyznačují plynulou čarou zrnitosti, která bezprostředně ovlivňuje množství mezer v kamenivu, následnou zhutnitelnost, odolnost proti nenamrzavosti, splnění filtračního kritéria, a hlavně požadovanou únosnost. Dostatečná únosnost nestmelených podkladních vrstev je přímo závislá na charakteristice podloží, což nám udává druh zeminy a vodní režim v podloží. Dále je nutné, aby nestmelené podkladní vrstvy zaručily neměnné vlastnosti při účincích klimatických jevů, mezi které patří zejména mráz, kolísající vlhkost a vysoké teploty. S tím souvisí i přítomnost jílovitých materiálů, kterou je nutné zcela vyloučit z materiálů určených k zabudování do nestmelené podkladní vrstvy, jelikož jílovitý materiál způsobuje citlivost na změny vlhkosti a tím i problém s následným hutněním. Posledním požadavkem na nestmelené vrstvy je odolnost proti namrzavosti materiálu. Namrzavost materiálu je stanovena Casagrandeho kritériem, které nám stanovuje podíl částic $< 0,02\text{mm} < 3\%$. [30]

Druhy nestmelených podkladních vrstev:

- Mechanicky zpevněná zemina (MZ)
- Mechanicky zpevněné kamenivo (MZK)
- Vrstva ze štěrkodrti (ŠD)
- Vrstva ze štěrkopísku (ŠP)
- Vibrovaný štěrk (VŠ)

Tloušťka nestmelených podkladních vrstev by se měla pohybovat v rozmezí mocnosti 150 až 300 mm. V tabulce č. 3 jsou uvedené možnosti použití recyklovaného stavebního materiálu do nestmelených vrstev ochranných a podkladních. Toto členění dále stanovuje vhodnost použití určitého druhu nestmelené vrstvy v závislosti na třídě dopravního zatížení, která je na dané komunikaci navržena.

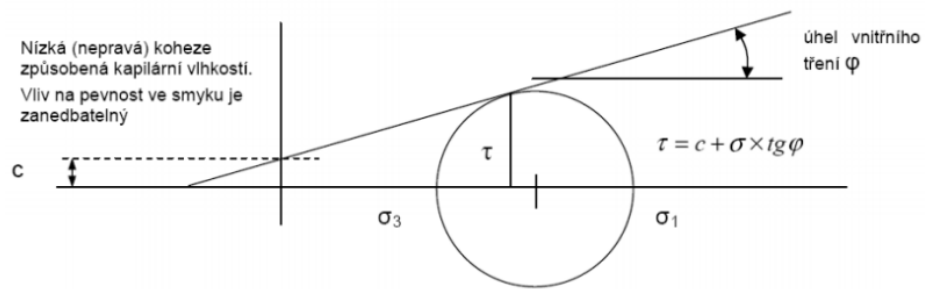
Vrstva	Doporučená třída dopravního zatížení podle ČSN 73 6114, Z1		
		Podkladní vrstva	Ochranná vrstva
MZK z recyklovaného kameniva ^{1) 2)}	MZK - R	bez omezení	-
ŠD z recyklovaného kameniva ¹⁾	ŠDa - R	III, IV, V, VI	bez omezení
	ŠDb - R	V, VI	V, VI
VŠ z recyklovaného kameniva	VŠ - R	V, VI	V, VI
MZ z recyklátu	MZ - R	V, VI	V, VI
¹⁾ označení MZK, ŠDa, ŠDb, MZ a VŠ je vhodné doplnit popisem použitého materiálu („recyklované kamenivo“ nebo označením písmenem R) ²⁾ Pro komunikace TDZ VI, parkovací, odstavné plochy, dočasné komunikace a nemotoristické komunikace je možno použít zejména recyklát z betonu nebo recyklát z vozovek jako kryt vozovky. Povrch vrstvy se doporučuje opatřit nátěrem nebo kalovou vrstvou.			

Tabulka 3 – Užití RSM do nestmelených vrstev [15]

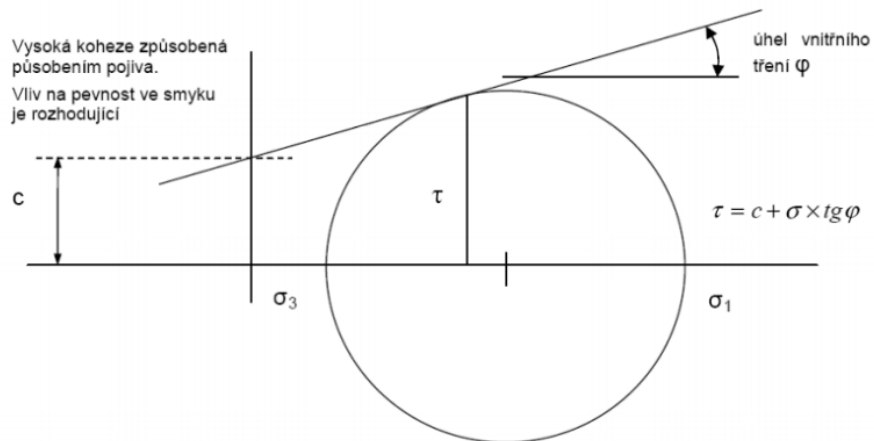
1.1.3 Stmelené vrstvy

Pod pojmem stmelená vrstva si můžeme představit směs plniva a pojiva, která splňuje požadované pevnostní parametry klasifikované podle pevnosti v prostém tlaku. Samotná stmelená vrstva spolupůsobí s podkladem tak, že je omezen její průhyb a tím pádem zaručen přenos smykových napětí. Přidané pojivo zajišťuje smykovou pevnost neboli soudržnost ve smyku, která vzniká vlivem působení koheze. Nově vzniklá směs by měla mít co nejvyšší pevnost, ale takovou pevnost, která je optimální pro dané podmínky. Neboť vysoká pevnost směsi může mít nežádoucí vliv na vznik reflexních trhlin v konstrukční vrstvě vozovky. Tyto trhliny se mohou konstrukcí vozovky šířit až do krytových vrstev a zapříčinit jeho poruchu. Opačným jevem je křehkost stmelené vrstvy, kdy kombinací nižší pevnosti s vysokým modulem pružnosti dochází k porušení vrstvy již při malé deformaci. Porušení nastává vznikem velkého množství mikrotrhlin v konstrukční vrstvě, které mají opačnou orientaci než smykové síly a díky tomu mají jen malý vliv na celkovou smykovou pevnost vozovky. Ovšem vznik mikrotrhlin je považován za žádoucí porušení, které zabraňuje vzniku závažnějších reflexních trhlin. V praxi je vznik reflexních trhlin omezován včasným zatěžováním čerstvě položené vrstvy, které nám způsobí vznik velkého množství nepatrných trhlinek a díky tomu se vrstva stává poddajnější a odolnější vůči vzniku trhlin způsobených vlivem smršťování a teplotních změn.

NESTMELENÉ SMĚSI



STMELLENÉ SMĚSI



Legenda:

- C koheze
- σ_1, σ_3 hlavní napětí
- τ smykové napětí
- φ úhel vnitřního tření

Obrázek 2 – Porovnání Mohrovy kružnice nestmelené a stmelené vrstvy [33]

V tabulce č. 4 je jasně viditelné, dělení vhodnosti použití stmelené směsi dle použitého pojiva do jednotlivých konstrukčních vrstev pozemních komunikací s ohledem na třídu dopravního zatížení. Dále v mé práci bude zacíleno pouze na stmelené směsi za použití hydraulického pojiva.

Směs recyklovaného kameniva vyrobená v míchacím centru nebo obalovně	Doporučená třída dopravního zatížení		
	Obrusná vrstva	Ložná vrstva ¹⁾	Podkladní vrstva
s použitím asfaltu jako asfaltové vrstvy	IV, V, VI	II, III, IV	II, III, IV
s použitím cementu nebo jiného hydraulického pojiva jako stmelená vrstva ^{2) 3)}	-	-	bez omezení
s použitím asfaltové emulze, zpěněného asfaltu v kombinaci s jiným např. hydraulickým pojivem nebo jako výplňová směs proprolévané vrstvy ²⁾	-	IV, V, VI	bez omezení
s použitím asfaltové emulze nebo zpěněného asfaltu ²⁾	-	IV, V, VI	bez omezení
¹⁾ Nerozlišuje se v případě jednovrstvého krytu. ²⁾ Pro komunikace TDZ VI, parkovací, odstavné plochy, dočasné komunikace a nemotoristické komunikace je možno použít zejména recyklát z betonu nebo recyklát z vozovek, recyklát asfaltový jako kryt vozovky. Povrch vrstvy se doporučuje opatřit nátěrem nebo kalovou vrstvou. ³⁾ V případě návrhu stmelených směsí s použitím hydraulického pojiva do podkladních vrstev je možné po splnění požadavků TP použít recyklát směsný.			

Tabulka 4 – Užití RSM do asfaltových, stmelených a prolévaných vrstev [15]

Z výše uvedené tabulky můžeme vidět, že doporučené využití stmelených vrstev hydraulickým pojivem je určené pouze do podkladní vrstev komunikace, a to dle typu dopravního zatížení. ČSN EN 14 227- 1 definuje směsi stmelené hydraulickými pojivy jako směs obsahující kamenivo s řízenou zrnitostí a jedním či více hydraulickými pojivy. Musí být zajištěn takový postup výroby směsi, aby bylo zajištěno požadované homogenity. Směsi s obsahem hydraulického pojiva tvrdnou a tuhnou hydraulickou reakcí a jejich klasifikace je založena na mechanických vlastnostech. [31]

Klasifikace stmelených směsí na základě použitého hydraulického pojiva:

- SC – směs z kameniva stmelená cementem
- SS – směs z kameniva stmelená struskou
- SP – směs kameniva stmelená popílkem
- SH – směs kameniva stmelená hydraulickým silničním pojivem

Další rozdělení je uvedeno v normě ČSN 73 6124 – 1 a stanovuje nám užití směsí stmelovaných hydraulickými pojivy o požadované pevnosti v prostém tlaku v konstrukci vozovky podle typu třídy dopravního zatížení.

Třída pevnosti v tlaku R_c^b	Doporučená třída dopravního zatížení ^a		
	Krytová vrstva	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	-	-	-

Poznámka:
 U krytových vrstev místních obslužných komunikací se povrch vrstvy musí opatřit nátěrem nebo emulzní kalovou vrstvou. Pro účelové komunikace, zpevněné plochy a dočasné komunikace se provedení tohoto opatření na povrchu vrstvy doporučuje.

^d Směsi třídy $C_{0,4/0,5}$ a $C_{0,8/1}$ se nedoporučují do podkladních vrstev používat, zatímco směsi třídy $C_{15/20}$ a výše se do podkladních vrstev používají jen výjimečně. Pro takové případy se doporučuje použít podkladový beton dle ČSN EN 206:2014, článek 4.3.1, tabulka 12 (např. beton třídy C 16/20).

Tabulka 5 – Užití směsí stmelovaných hydraulickými pojivy ve vozovce [32]

Dalším rozdělením stmelovaných směsí hydraulickými pojivy je na základě klasifikace dle pevnosti v tlaku. V tabulce č. 6 jsou stanovené minimální hodnoty pro válcová nebo krychelná zkušební tělesa.

Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa, štíhlostní poměr 2 ^a [MPa]	Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa, štíhlostní poměr 1 ^a a zkušební tělesa tvaru krychle [MPa]	Třída R_c^b
1,5	2	$C_{1,5/2}$
3	4	$C_{3/4}$
5	6	$C_{5/6}$
8	10	$C_{8/10}$
12	16	$C_{12/16}$

^a Pokud je štíhlostní poměr válcových zkušebních těles v rozmezí 0,8 až 1,21, postupuje se stejně jako při štíhlostním poměru 1.
^b Bude-li požadováno, je možné použít i mezilehlé hodnoty dle ČSN 14227-1

Tabulka 6 – Třídy pevnosti stmelovaných směsí hydraulickými pojivy [32]

Posledním dělením je klasifikace podle svých mechanických vlastností. Je nezbytné upozornit na to, že pokud dojde k výrobě směsi o třídě pevnosti například $C_{3/4}$ stmelené cementem, struskou, popílkem nebo jinými hydraulickými pojivy, jedná se z hlediska klasifikace a užitných vlastností stále o jednu totožnou směs. Rozhodující není ani skutečnost, zda je směs vyrobena v míchacím centru nebo pomocí zemní frézy přímo na stavbě. Díky této skutečnosti bylo rozumnější opustit od zažitých názvů technologií (S I, S II, KSC I, KSC II, VB), které znamenaly jistou podřízenost klasifikace směsi těmto pojímům. Konkrétně u značení směsí stmelených hydraulickými pojivy podle evropských norem by staré označení systém klasifikace značně zkomplikovalo. Pro přehlednější počáteční orientaci jsou v tabulce č. 7 uvedeny nově používané označení dle třídy pevnosti a k nim jsou přiřazeny původní názvy jednotlivých technologií.

Řádek	Třída Rck	Užívaný název
1	$C_{1,5/2}$	Stabilizace cementem S II
2	$C_{3/4}$	Stabilizace cementem S I
3	$C_{5/6}$	Kamenivo zpevněné cementem KSC II
4	$C_{8/10}$	Kamenivo zpevněné cementem KSC I
5	$C_{12/16}$	Válcovaný beton VB I
6	$C_{16/20}$	Podkladový beton PB II
7	$C_{20/25}$	Podkladový beton PB I

Tabulka 7 – Přiřazení původních názvů technologií k jednotlivým třídám pevnosti [33]

Smysl aplikace stmelených směsí hydraulickými pojivy je především ve využití lokálních materiálů a druhotných surovin do konstrukčních vrstev vozovek. Touto problematikou se budu zabývat i ve své praktické části diplomové práce, kdy pro návrh směsi budou použity druhotné místní materiály. Dále si také musíme uvědomit, že chování stmelené vrstvy hydraulickými pojivy nelze vysvětlit jen na základě její pevnosti v tlaku, musíme brát v potaz, že vrstva se chová částečně i jako nestmelená. Další skutečností je to, že čím je vyšší pevnost, tím je stmelená vrstva náchylnější ke tvorbě reflexních trhlin.

Konkrétně u stmelených recyklovaných podkladních vrstev komunikací můžeme prakticky vyloučit deformace typu vyjetých kolejí, které by zapříčinila nedostatečná únosnost podkladu. Díky dobrým mechanickým vlastnostem recyklovaných podkladních vrstev je tento typ poruch vyloučen. U stmelených vrstev, kde jsou použita hydraulická pojiva, patří mezi častější poruchy tvorba trhlin.

Trhliny ve stmelených vrstvách můžeme rozdělit dle příčin jejich vzniku:

- Vznik trhlin zapříčiněný dopravou.
- Vznik trhlin způsobený smršťováním vrstvy během tvrdnutí, kdy do asfaltových vrstev se prorýsují jako reflexní trhliny.
- Vznik trhlin zapříčiněné jinými mechanismy.

1.1.4 Maximální množství R-materiálu ve směsi

Díky vzrůstajícímu tlaku na využívání recyklovaných materiálů u výstavby, rekonstrukce a údržby liniových staveb je nezbytné, aby R-materiál byl přesně specifikován a byly známy jeho jednotlivé vlastnosti. Podobným způsobem jako je tomu u kameniva a pojiva. Norma ČSN EN 13108-8 stanovuje požadavky na R-materiál z hlediska vlastností kameniva, pojiva a znečišťujících látek, dále nám také uvádí, které vlastnosti R-materiálu je nezbytné uvádět a zaznamenávat. Charakteristiky získaného R-materiálu mohou být značně proměnné, a to zejména díky nedodržení kázně při jeho získávání a skladování. Je proto nezbytně nutné stanovit maximální přípustný rozsah charakteristik R-materiálu. Problémem v České republice je skutečnost, že existuje legislativa jen ohledně použití asfaltového recyklátu do asfaltových směsí typu asfaltového betonu. Konkrétně pro každý typ asfaltové směsi je podle norem stanoveno maximální dovolené množství přidaného R-materiálu. U obrusné vrstvy se maximální přidané množství R-materiálu do nové asfaltové směsi pohybuje okolo 25 %, pro asfaltový beton určený pro ložné vrstvy je to maximálně 40 % a u asfaltového betonu pro podkladní vrstvy je to až 60 % z celkové směsi. Využití R-materiálu u mastixových koberců bylo zcela vyloučeno, přestože evropské normy tuto možnost dovolují. Stěžejní vlastnosti R-materiálu je jeho homogenita, kdyby ta byla zaručena, věřím, že lze R-materiál využít i pro vysoce kvalitní výrobky, které by našly uplatnění na dálnicích, rychlostních komunikacích a vysoce dopravně zatížených komunikacích. Skutečnost je ale taková, že negativní stránkou práce s asfaltovým recyklátem je jeho proměnlivost. Tudiž finanční náklady na kontrolu z hlediska laboratorní zkoušek je vyšší, to by nám ale měly vykompenzovat snížené pořizovací náklady recyklovaného materiálu a jeho následného zabudování do konstrukčních vrstev oproti využití nových materiálů. Níže ve své experimentální části diplomové práce bych se chtěl věnovat uplatnění R-materiálu ve stmelených podkladních vrstvách, neboť si myslím, že je to zajímavé téma z hlediska udržitelného rozvoje společnosti.

1.2 Poznatky ze zahraničí

Z údajů uvedených od mezinárodní společnosti EAPA vyplývá, že celková produkce asfaltu v Evropě vzrostla v roce 2017 o 5,0 % na 296,7 milionů tun (včetně Švýcarska, Turecka a Norska). Navíc se jedná již o trend totožný s přecházejícími třemi lety, kdy produkce asfaltu stále roste. [35] Proto si musíme uvědomit, že tento trend nepůjde držet donekonečna a snažit se naplno využít potenciálu recyklovaných materiálů.

Přístup každé země k opětovnému zabudování recyklovaných materiálů je trochu odlišný, neboť reagují na jejich lokální zdroje, technologické možnosti, ekonomický nátlak nebo legislativu. Osobně si ale myslím, že to, jak se v dané zemi přistupuje k opětovnému zabudování RSM, je určitý ukazatel vyspělosti dané země. Níže budou popsány jednotlivé přístupy, jak dané země využívají recyklaci stavebních materiálů a také poznatky z hlediska využití asfaltového recyklátu do stmelených, ale i nestmelených konstrukčních vrstev vozovek.

Německo – konkrétně u našich západních sousedů je recyklace stavebních materiálů považována za nezbytný aspekt dnešní a budoucí podoby stavebnictví. Je to zapříčiněno hlavně nedostatkem místa pro případné skládky. Tamní řídicí orgány si uvědomily, že jejich rozsáhlá dálniční a silniční síť představuje dostupné zásoby kameniva, které mohou být využity k opětovnému zabudování a hrát tak výraznou roli z hlediska šetrnosti k životnímu prostředí. Nejen po stránce rapidního snížení využití nových přírodních materiálů, ale také po stránce minimalizaci problémů vzniklých při likvidaci stavebního odpadu. Zajímavým poznatkem je fakt, že dopravní správa dálniční a silniční sítě poskytuje R-materiál bezúplatně a přímo nařizuje, aby jej zhotovitel přidal do nově vyráběné směsi. Dle vydaných údajů společnosti EAPA za rok 2017 je uváděno, že v Německu je každoročně k dispozici 13 mil. tun asfaltového recyklátu, který je kompletně využit do opětovného zabudování liniových staveb. Drtivou většinou je recyklace za horka, která využívá až 84 % dostupného vyzískaného materiálu a 16 % je využito do nestmelených podkladních vrstev vozovek. [35] Z toho jasně vyplývá, že Německo je ideální příklad toho, jak přistupovat k druhotným materiálům, oproti České republice, která ukládá na skládky až 26 % z celkového množství dostupného asfaltového recyklátu (2,6 mil. tun). [35] Samozřejmě s tímto ukazatelem je pevně spojeno technologické vybavení obaloven, které musí daná obalovna obsahovat, aby dokázala asfaltový recyklát vmístit do nové směsi. S tímto poznatkem pevně souvisí i fakt, že areál obaloven musí být vybaven takovým zázemím, které umožňuje uskladnění a třídění asfaltového recyklátu.

Holandsko – je specifické v tom, že tamní poměry vyžadují dovoz veškerých agregátů (přírodního kameniva) při výstavbě staveb dopravního stavitelství. Z toho důvodu existuje ekonomický nátlak na opětovné zabudování recyklovaných materiálů do stavebního díla. Současně s tím je trh nastaven tak, že cena za uložení tuny R-materiálu na skládku je přibližně totožná s cenou za novou asfaltovou směs. V současné době se v Holandsku vyprodukuje přibližně 4,5 mil. tun asfaltového recyklátu ze stavební činnosti, kdy 82 % ke znovu využití při technologii teplé nebo studené recyklace, a i přes přísné podmínky je 11 % z celkové produkce asfaltového recyklátu uloženo na skládky. Pravděpodobně je to ovlivněno i tím, že použití R-materiálu je limitováno i množstvím přidání do nové směsi, a to 50 % pro asfaltový beton určený pro obrusné a ložné vrstvy a 20 % pro drenážní koberce. U výroby mastixových asfaltů je přidání R-materiálu zcela vyloučeno. Zajímavý poznatek je i to, že Holandsko je z hlediska rozlohy přibližně 2x menší než Česká republika, přesto evidují zhruba 40 obaloven, které jsou vybaveny paralelním bubnem, zatímco u nás tímto vybavením disponují zhruba 4 obalovny. [35]

Austrálie – zkoumala vliv přidání popílku do směsi kameniva z hlediska zlepšení fyzikálních a geotechnických vlastností kameniva, kde se přidává jako stabilizátor asfaltového recyklátu do konstrukčních vrstev vozovek. Cílem výzkumu bylo zlepšení pevnosti a trvanlivosti recyklovaného materiálu, kdy vývoj pevnosti v tlaku a modulu pružnosti byl zkoumán při pokojové teplotě a při zvýšení teplotě 40 °C a porovnávám se samotným asfaltovým recyklátem. Výzkum ukázal, že přítomnost popílku ve směsi plní funkci pojiva pro stabilizaci asfaltového recyklátu. Nejvyšší pevnost v tlaku byla dosažena při přidání množství 15 % popílku z hlediska celkové hmotnosti směsi. Této pevnosti bylo docíleno jak při pokojové teplotě, tak při zvýšené teplotě na 40 °C. Ovšem při vytvrnutí směsi při vyšší teplotě, bylo docíleno vyšší únosnosti. [36]

Thajsko – pracovalo na obdobném výzkumu, kde se výzkumníci snažili podpořit použití velkého množství asfaltového recyklátu do směsí za použití vedlejšího produktu spalování. Jednalo se o směsi, kde se zkoumal stabilizovaný materiál s obsahem popílku po ekologické stránce. Hlavně z hlediska nebezpečí pro životní prostředí formou loužení do půdních, povrchových či podzemních vod. Tento předpoklad se nepotvrdil, proto je možné považovat směs asfaltového recyklátu a popílku za ekologicky neškodnou směs. [37]

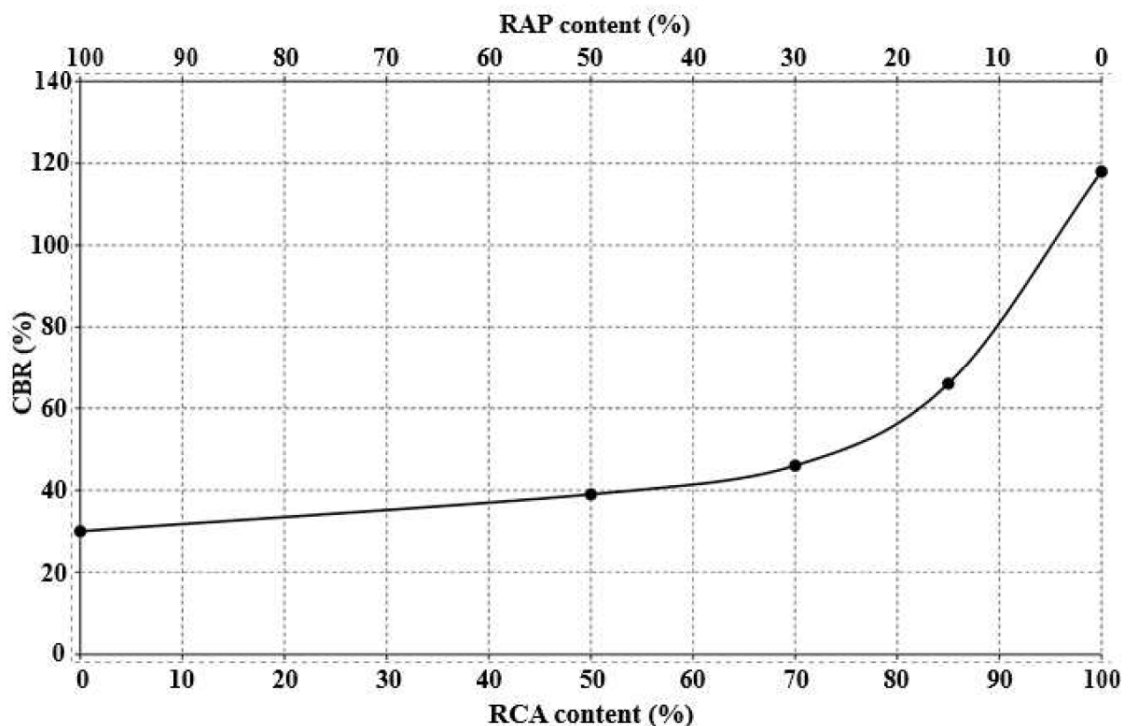
Indie – se zabývala též problematikou použití popílku do konstrukčních vrstev vozovek a dospěla k následujícím závěrům. Národní technický institut vydal zprávu o tom, že popílek je vhodné použít do betonových vozovek v návaznosti na měnící se požadavky druhu použitého popílku, zastoupení ve směsi, postupu míchání, polních podmínek a umístění. Dále také výzkumníci dospěli k závěru, že popílek a portlandský cement lze kombinovat s kamenivem k docílení zvýšení životnosti. Z hlediska stabilizace zemin je popílek vhodným účinným činidlem po stránce chemické, ale i mechanické. Používá se také jako přidané pojivo u recyklace asfaltových směsí za tepla. Přidání popílku do nové asfaltové směsi nám umožňuje snižovat tloušťky navrhovaných vrstev, což přímo ovlivňuje snížení celkových nákladů na novou vozovku. [38]

Čína – jakožto celosvětová velmoc neustále řeší dopady jednotlivých činností výroby na životní prostředí. Proto možnost opětovného využití materiálů ze stávajících vozovek je bráno jako nezbytnou součástí dnešní doby. Pozitivní dopady na životní prostředí jsou z hlediska zachování vyčerpatelných přírodních zdrojů a snížení celkových nákladů na výstavbu dopravní infrastruktury v Číně. Z tohoto důvodu byl proveden podrobný testovací průzkum, který měl za cíl zhodnotit mechanické a konstrukční vlastnosti asfaltového recyklátu. Během průzkumu byly testovány různé směsi asfaltového recyklátu stabilizované portlandským cementem. Systémová analýza směsí zjišťovala jednotlivé náklady na životní cyklus. Výsledkem analýzy bylo zjištění, že přidání malého procentuálního zastoupení cementu ve směsi, podstatně zlepšuje strukturální vlastnosti recyklovaných asfaltových materiálů, které se používají do nových konstrukčních vrstev, případně při rekonstrukci vozovek. Závěr práce potvrdil pozitivní dopad na snížení pořizovacích nákladů asfaltového recyklátu oproti přírodnímu kamenivu. Což přímo ovlivňuje zachování přírodních zdrojů kameniva a přispívá tak k ochraně životního prostředí. [39]

USA – Spojené státy tvoří silniční síť, která měří více jak 6 mil. kilometrů. Z toho 2/3 tvoří silnice s asfaltovou obrusnou vrstvou. Z tohoto důvodu je pro ně problematika znovu zabudování R-materiálu zcela zásadní. Z drtivé většiny se asfaltový recyklát zabudovává pomocí recyklace za horka a v minimálním případě recyklací za studena. K této problematice mají k dispozici publikace, které pojednávají o využití 100 % R-materiálu. Skutečnost je ale taková, že v mnoha amerických státech existují předpisy, které limitují využití R-materiálu pouze na 30 %.

Ze studií vyplývá, že za pomoci přísad je možné vyrobit směs s 75 % až 100 % R-materiálu s podobnými vlastnosti jako má asfaltová směs bez přidání recyklovaných materiálů. Pomocí jednotlivých přísad lze snížit nutnou teplotu výroby a tím tak snížit energetickou náročnost a produkci emisí. Nicméně výzkumníci se zároveň obávají, že při snížené teplotě položeného materiálu, kdy je povrch hutněný, tak může docházet ke snížení pevnosti tahu, zvýšení vlhkostí a zvýšení náchylnosti tvorby vyjetých kolejí.

Výzkumníci ve Spojených státech se také snažili o výrobu směsi z asfaltového recyklátu (dále jen RAP) a betonového recyklátu (dále jen RCA), kdy zkoumaly různé složení směsí RCA s obsahem RAP v zastoupení od 15 % až do 100 %. Z laboratorních výsledků bylo patrné, že směs s obsahem RAP 15 % dostatečně splňovala požadavky pro trvalé namáhání a modul pružnosti pro využití této směsi při zabudování do podkladních vrstev vozovek. Nicméně výsledky této směsi z hlediska požadavků CBR byly nedostačující. Naopak směs s obsahem 100 % RAP neměla vyhovující vlastnosti z hlediska pevnosti. Došlo se tedy k závěru, že směsi RAP a RAP/RCA nejsou v souladu s místními požadavky, nicméně mohou být použity do konstrukcí vozovek s nižším dopravním zatížením. [40]



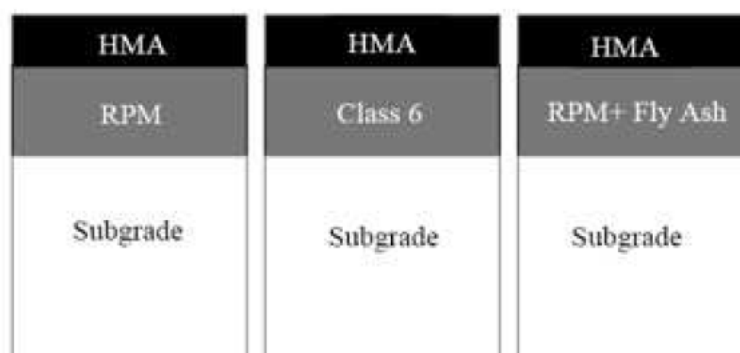
Obrázek 3 – Výsledky CBR v závislosti na obsahu RAP/RCA [40]

Další Americký výzkum se zabýval studií, která pojednávala o mechanických a hydraulických vlastnostech RAP a popílku v porovnání s přírodními materiály.

Hodnotící ukazatele byly vlastnosti retence vody, hydraulická vodivost, modul pružnosti a smyková pevnost. Z vizualizace výsledků bylo jasně patrné, že křivky retence vody jsou srovnatelné, zatímco hydraulická vodivost byla u RAP s obsahem popílku vyšší, což jednoznačně poukazuje na fakt, že díky přidání asfaltového recyklátu spolu s popílek, dochází k obecnému zlepšení odvodňovacích schopností. U požadovaného modulu pružnosti a smykové pevnosti bylo též potvrzeno, že přidání hrubších recyklovaných materiálů do směsi má pozitivní dopad na mechanické, ale i hydraulické vlastnosti. Popílek má sice jemnější zrna, nicméně má také určité cementové vlastnosti, proto byly výsledky dostačující již při přidání 15 % popílku do zájmové směsi. Z této studie taktéž vyplývá skutečnost, že RAP spolu s určitým obsahem popílku adekvátně nahrazuje běžně používané materiály do konstrukčních vrstev vozovek. [41]

Cílem výzkumu na území spojených států bylo také vyhodnocení výkonosti recyklovaného asfaltu, který obsahuje cement s vysokým obsahem uhlíku (dále jen CHCFA), a to na reálné vozovce. Tento experiment byl realizován na zkušební dráze MnRoad v Minnesotě, kde byly realizovány tři testovací vozovky.

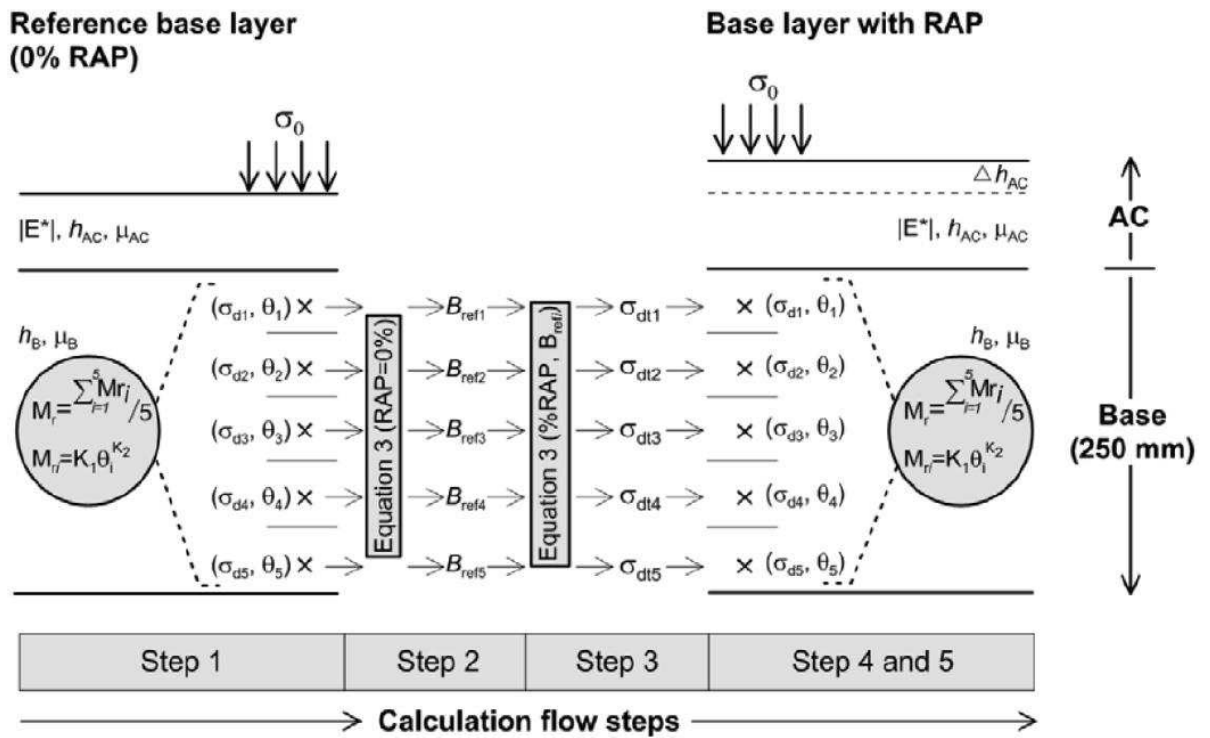
Jednotlivé vozovky byly složeny ze stejných krytových asfaltových vrstev, ale s různými podkladními vrstvami. První z vozovek měla podkladní vrstvu tvořenou z přírodního kameniva, druhá z recyklovaného materiálu z vozovek (dále jen RPM) a třetí z recyklovaného materiálu stabilizovaného právě cementem s vysokým obsahem uhlíku. Během i po skončení výstavby byly na jednotlivých vozovkách prováděny terénní a laboratorní zkoušky, které sloužily pro určení vlastností daných materiálů a stanovení tak jejich chování. Zjištěná výsledná data byla použita pro mechanicko-empirický návrh vozovky (dále jen MEPDG) a pro předpověď kvality vozovky. Na základě těchto závěrů byla provedena analýza životního cyklu, nákladů, spotřeby energie a skleníkových plynů.



Obrázek 4 – Navržené skladby vozovek v Minnesotě [42]

Laboratorní testy ukázaly, že vrstva realizovaná z recyklovaného materiálu stabilizovaným popílkem měla vyšší modul pružnosti než zbývající dvě vozovky. Na základě návrhu vozovky vycházející z naměřených dat byla stanovena životnost této vozovky na 23,5 let, což je zhruba dvakrát déle než jaká byla stanovena životnost u vozovky s nestabilizovaným recyklovaným materiálem (11 let) a přibližně trojnásobek oproti životnosti stanovené u vozovky z přírodního kameniva, kde byla stanovena její životnost na pouhých 7,5 let. Z těchto výsledků lze jednoznačně konstatovat, že vozovka se stabilizovaným recyklovaným materiálem může výrazně snížit pořizovací náklady stavby, spotřebu energie nezbytnou k výrobě a tím pádem i omezit znečištění ovzduší. [42]

Kanada – I v této nehostinné krajině na severu Severní Ameriky, je otázka opětovného využití asfaltového recyklátu do podkladních vrstev vozovek velice aktuální. Tamní výzkumníci zkoumali využití asfaltového recyklátu v podkladních vrstvách vozovek jako náhradu za přírodní kamenivo, kdy je konkrétně zajímala odolnost nestmelené konstrukční vrstvy deformované opakovaným zatížením. Nakonec došli k závěru, že asfaltový recyklát je náchylnější na vznik trvalých deformací při opakovaném zatížení. Tudíž ve stejných tloušťkách oslabuje samotnou konstrukci vozovky a v mnoha případech docházelo k nepříjemnému výskytu vyjetých kolejí. Na základě těchto poznatků byl vyvinut metodický návrh tloušťky konstrukce vozovky z asfaltového recyklátu tak, aby zohlednil obsah RAP a zajistil stejné vlastnosti, jako má požadovaná vrstva konstrukce tvořená z přírodního kameniva. Byl stanoven výpočtový model, který nám umožňuje určit zvýšení mocnosti konstrukční vrstvy tvořené z asfaltového recyklátu tak, aby deformační chování materiálu této vrstvy bylo totožné s vrstvou tvořenou z přírodního kameniva. Samotný výpočtový model je založený na víceúrovňových triaxiálních testech, provedených na vzorcích s různým obsahem RAP. Do samotné rovnice pak vstupují výpočty deformační rychlosti, obsah RAP a deviátor napětí. Tento výpočtový model byl v praxi mnohokrát aplikován a ukázal se jako plně vyhovující. Kanadský výzkumný program došel k závěru, že nestmelená konstrukční vrstva tvořená z asfaltového recyklátu je adekvátní náhradou za konstrukční vrstvy tvořené z přírodního kameniva, ale jen v případě, kdy je upravena mocnost vrstvy s obsahem RAP na základě metodiky stanoveného výpočtového modelu. [43]



Obrázek 5 – Schéma výpočtového modelu mocnosti vrstvy s obsahem RAP [43]

1.3 Použití asfaltové recyklátu v České republice

Dnešní situace na trhu je taková, že asfaltový recyklát je v určitém množství zpracován a znovu zabudován v různých etapách realizace liniových staveb. Osobně jsem ale toho názoru, že jeho opětovné využití v České republice by mohlo být efektivnější z hlediska kvality a zabudovaného množství. To je ale úzce spojeno s jeho homogenitou, která je přímo závislá na kázni při technologii získávání, zpracování a skladování.

Jak jsem již výše uvedl, tak nejběžnější využití R-materiálu v České republice je pomocí studené recyklace, která se dělí na technologii na místě nebo v míchacím centru. Avšak její největší rozmach byl v roce 2014 [35], momentální situace je taková, že tato technologie se dostává spíše do pozadí. Můžeme se jen domnívat, zda na tom nese svůj díl přísnější legislativa, která nabyla platnosti v roce 2015 a prakticky znemožňuje využití recyklovaného materiálu do konstrukce komunikace, která je ve správě Ředitelství silnic a dálnic ČR. Dalším způsobem opětovného zpracování R-materiálu je pomocí recyklací za horka, která opět umožňuje zpracování R-materiálu přímo na místě nebo v obalovnách. R-materiál se také používá do zásypů, jako náhrada přírodního kameniva do nestmelených směsí, pro realizaci krajnic nebo pro provizorní komunikace, které slouží například pro staveništní dopravu.

Výhodou využití R-materiálu ve vrchních vrstvách konstrukce vozovek je taková, že díky působení teplých klimatických vlivů, dochází k efektu spečení jednotlivých zrn a vrstva se pak stává celistvější a odolnější. Moje zkušenost je taková, že když na stavbu přijede fréza, tak rezidenti v okolí stavby zpozorní, neboť je to ideální materiál na příjezdové cesty nebo pro zpevnění parkovacích ploch. Kolikrát je praxí, že investor vyfrézovaný R-materiál už předem nasliboval různým zájemcům, tudíž nutnost odvezení přebytečného vyfrézovaného materiálu na recyklační linku nebo určenou deponii je pak minimální nebo zcela žádný. Samozřejmě to se stává u rekonstrukcí místních komunikací menších rozměrů. U frézování dálnic, kdy získaný R-materiál není znovu zpracován nebo je zpracován jen částečně, dochází k nutnosti převozu obrovského objemu materiálu na určenou deponii nebo skládku v blízkosti stavby, kde se materiál kupí a při nedodržení kázně skladování dochází i k jeho znehodnocování.

Zajímavým poznatkem je to, že v České republice existuje zhruba 1/3 z celkového počtu obaloven, která umožňuje dávkování R-materiálu za studena.

Zatímco zpracování R-materiálu za horka umožňují jen 4 obalovny v České republice, neboť tyto obalovny musejí být vybaveny paralelním bubnem.

Dalším velkým problémem je to, že v České republice se za vyfrézovaný materiál musí platit a není požadavek na jeho třídění podle vrstev, z které byl získán. Například v sousedním Německu je R-materiál poskytován bezplatně a výrobce ho musí přidat do nově vyráběné směsi. Níže bude uvedena tabulka, kde je vidět srovnání přístupů jednotlivých zemích evropské unie k recyklaci vozovek. Recyklace asfaltových vozovek se stala nezbytnou součástí fungování dnešní společnosti, ale data uvedená v tabulce ukazují, že některé státy v Evropě pořád ukládají velké množství vyzískaného R-materiálu na skládky bez jeho dalšího využití. Bohužel musím konstatovat, že mezi těmito státy figuruje i Česká republika. Například v sousedním Německu je opětovné zabudování stavebních materiálů, považováno za nejdůležitější aspekt, vzhledem k výraznému nedostatku místa pro skládky.

Stát	Celková produkce asfaltu v roce 2017 [t]	Dostupný R-materiál [t]	Znovuvyužité recyklace za horka [%]	Znovuvyužité recyklace za studena* [%]	Využití do spodních nestmelených vrstev [%]	Jiné inženýrské využití [%]	Uložení na skládku [%]
Česká republika	7 400 000	2 600 000	14	30	20	10	26
Dánsko	4 000 000	1 165 000	66	0	8	0	26
Finsko	6 400 000	1 200 000	100	0	0	0	0
Francie	33 700 000	6 400 000	70	-	-	-	-
Německo	42 000 000	13 000 000	84	0	16	0	0
Velká Británie	22 700 000	3 400 000	90		0	0	0
Maďarsko	2 600 000	120 000	95	0	0	4	1
Nizozemí	8 100 000	4 500 000	71	11	0	0	18
Norsko	7 800 000	1 101 000	30	1	69	0	0
Slovensko	2 000 000	50 000	96	2	1	1	0
Slovinsko	1 800 000	84 000	24	6	10	0	60
Španělsko	15 200 000	494 000	83	0	14	0	3
Turecko	46 900 000	2 570 589	9	6	85	0	0
USA	344 000 000	72 500 000	96	0	4	0	0

Vysvětlivky:

- ... data nebyla dohledána

Tabulka 8 – Porovnání opětovného využití R-materiálu ve světě [35]

U nás se technologií recyklací vozovek začali odborníci zabývat od druhé poloviny osmdesátých let, kdy se začaly používat první výkonné silniční frézy. Díky frézování asfaltových krytů vozovek došlo ke vzniku nového stavebního materiálu. Samozřejmě v zahraničí se touto technologií zabývali už mnohem dříve. První známky o rozvoji recyklace za horka ve Francii a Německu pocházejí ze sedmdesátých let minulého století, zatímco zmínky o principu využití obalení kameniva vhodným pojivem bez potřeby ohřevu, jsou známé již z počátku šedesátých let minulého století. Mezi první průkopníky tohoto směru patří pěnoasfaltové směsi. Technologie s použitím pěnoasfaltů byla zpočátku energeticky velice náročná, tudíž značně neefektivní.

Díky postupnému vývoji, standardizaci zcela nových postupů, vývoji mechanizace a tlaku veřejnosti, došlo k rozvoji technologií tak, jak je známe v dnešní době.

1.3.1 Přístupy a rozpory předpisů

V této kapitole bych chtěl poukázat na konflikt platné legislativy v České republice, který nastává mezi novými TKP 5 s TP 208 a TP 210 a omezuje tím využití recyklovaného materiálu do konstrukce vozovky. Hlavním problémem je to, že TKP 5 uplatňují mnohem vyšší požadavky na recyklované materiály než technické podmínky. Vyššími požadavky porušují předepsané omezení, že TKP by neměly jít nad požadavky platných předpisů. Státní organizace Ředitelství silnic a dálnic si ovšem tyto požadavky prozatím prosadilo i přes odpor zástupců jednotlivých zhotovitelů. Tato skutečnost v podstatě zcela znemožňuje zabudování jakéhokoli recyklovaného materiálu u staveb, které jsou v jurisdikci ŘSD. Zdůvodněním byla údajná zastaralost platných TP, což lze akceptovat u TP 208, ale nikoli u TP 210.

Níže budou uvedeny jednotlivé přístupy platných předpisů a zhodnocen jejich postoj k zabudování R-materiálu do konstrukčních vrstev vozovek jako adekvátní náhrada za přírodní kamenivo.

V TP 208 je uveden původní smysluplný přístup, kde v bodě 6.1 jsou shrnuty všeobecně požadavky na vstupní materiály. Tyto technické podmínky jsou zaměřeny přímo na recyklaci konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena a zpřesňují požadavky na R-materiál, který může být externě dodáván nebo získán přímo na místě z původní konstrukční vrstvy. Případně lze i tyto dva způsoby získávání vhodně kombinovat. V TP 208 je doslovně uvedeno: „*Kamenivo muselo při budování původních vrstev splňovat určité parametry. Proto při jeho recyklaci již nepožaduje prokazování některých vlastností jako tvarový index, odolnost proti drcení, obsah celkové síry a odolnost proti zmrazování a rozmrazování.*” [12] Toto ovšem neplatí, když je recyklované kamenivo dovezeno z jiných zdrojů nebo jeho původ není znám. Závěrečné stanovisko technických podmínek zní že „*recyklované kamenivo, které splňuje požadované parametry. Je plnohodnotná náhrada kameniva přírodního a při jeho užití není důvod měnit standartní postupy při návrhu a provádění díla.*” [12] Požadované parametry se odvíjí od využití recyklovaného kameniva do nestmelených nebo stmelených vrstev vozovky. Konkrétní dílčí požadované parametry na recyklované kamenivo použité do stmelených směsí jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Novější mírně přísnější přístup je uvedený v TP 210, který stále umožňuje použití recyklátů do konstrukčních vrstev vozovek. Konkrétně v bodě 5.1 jsou uvedené obecné požadavky na vstupní materiály.

Uvádějí možnost kombinace recyklovaného kameniva s kamenivem přírodním nebo umělým, kdy pro kombinované směsi kameniva platí stejné požadavky jako pro směsi jednosložkové, a to včetně požadavků zkoušených vlastností. Doslovně uvádějí že „ *při dodržení příslušných norem je recyklované kamenivo plnohodnotná náhrada přírodního kameniva a jeho použití není důvodem změny standardních postupů při návrhu a provádění díla.*”[15] Recyklované kamenivo určené pro použití do podkladních konstrukčních vrstev, musí odpovídat příslušnému druhu dle rozdělení recyklovaného stavebního materiálu v TP 210. Dále musí být deklarováno podle ČSN EN 13242+A1 a musí splňovat nutné požadavky pro dané použití. Na recyklované kamenivo jsou odlišné požadavky pro využití do nestmelených a stmelených směsí podkladních vrstev vozovek. V mé práci se zaměřuji na stmelené podkladní vrstvy, proto konkrétní požadavky na recyklovaný stavební materiál a směsi jsou uvedeny v tabulce č. 9 níže.

Vlastnost	Požadavky na RSM pro stmelené směsi a prolévané vrstvy	
	cement nebo jiné hydraulické pojivo	prolévané vrstvy asfaltem, asfaltovou emulzí nebo cementovou suspenzí
Označení směsi	0/16; 0/22; 0/32; 0/45	16/32; 32/63
Max. obsah jemných částic	f_{15}	f_{15}
Kvalita jemných částic	$I_p \leq 17$	$I_p \leq 17$
Nadsítiné	15%	15%
Požadavky na zrnitost směsi ¹⁾	viz. tabulka níže č.18	viz. tabulka níže č. 19
¹⁾ Platí pro směs recyklátu (RSM) bez přidaného pojiva		

Tabulka 9 – Doporučené požadavky na RSM pro stmelené směsi [15]

Velikost síta (mm)	Propad zrn v % hmotnosti
31,5	100
22,4	85 - 100
10	55 - 87
4	18 - 70
2	23 - 54
0,5	11 - 31
0,25	8 - 23
0,063	4 - 11

Tabulka 10 – Doporučené požadavky na zrnitost stmelených směsí z recyklátu fr. 0/22 [15]

Velikost síta (mm)	Propad zrn v % hmotnosti
45	100
31,5	85 - 100
22,4	65 - 94
10	44 - 78
4	26 - 61
2	18 - 50
0,5	8 - 30
0,25	6 - 22
0,063	3 - 11 ¹⁾
¹⁾ 5 – 15 Při použití zpěněného asfaltu jako pojiva	

Tabulka 11 - Doporučené požadavky na zrnitost stmelených směsí z recyklátu fr. 0/31,5 [15]

Oproti přístupu TP 208 jsou zpřísněny požadavky na nadsítne z původních 10 % na nově požadovaných 15 %. A také jsou nově stanovené požadavky na zrnitost směsi, která je závislá na frakci jednotlivé směsi.

Ovšem konkrétní stanovené požadavky na recyklát a směsi uvedené v tabulce č. 9, jsou jen doporučené, ale dopomáhají nám ke snadnějšímu splnění následných závazných požadavků na samotné recyklované směsi.

Posledním platným legislativním dokumentem v České republice, který stanovuje požadavky na zabudování recyklovaného kameniva do konstrukčních vrstev vozovek jsou TKP kapitola 5 – podkladní vrstvy. Jejichž nové znění prakticky znemožňuje použití recyklátů. Doslovně uvádějí, že **„pokud vlastnosti recyklovaných materiálů splňují požadavky uplatňované u materiálů přírodních, jsou recyklované materiály stejně hodnotné a jejich použití není na úkor kvality stavebního díla. K tomu je nezbytné, aby všechny recyklované materiály byly především správně pojmenovány a aby byly známy jejich vlastnosti. Tyto vlastnosti pak musejí být v souladu s požadavky pro danou technologii, kde se mají recyklované materiály použít.**” [34] Požadavek, aby recyklovaný materiál splňoval naprosto stejné vlastnosti, které mají nové přírodní materiály, je zcela nereálný! Recykláty mohou splňovat jen některé parametry, což bylo v dřívějších předpisech zohledněno. Dle technologie recyklace stavebních materiálů rozeznáváme dva základní způsoby, kterými jsou recyklace konstrukčních vrstev přímo na místě a výroba prostřednictvím drcení a třídění stavebního demoličního odpadu na skládkách nebo deponiích. Níže bude ocitováno znění ohledně specifikace a požadavků na recyklované kamenivo.

„Recyklované kamenivo jako náhrada kameniva přírodního do podkladních vrstev podle článku 5.1.2. Recyklované kamenivo musí mít vlastnosti podle ČSN EN 13242+A1, konkretizované v příslušných technologických normách jako ČSN EN 13285, ČSN 73 6126-1, ČSN 73 6126-2, ČSN EN 14227-1 až -5, ČSN 73 6124-1, ČSN 73 6124-2, ČSN 73 6127-1 až -4. Požadavky na recyklované kamenivo jsou tedy stejné a není potřeba je zvlášť specifikovat. Použití recyklovaného kameniva nemá vliv na technologii provádění podkladních vrstev. Požadavky na použití recyklovaného kameniva jsou sumarizovány v TP 210.

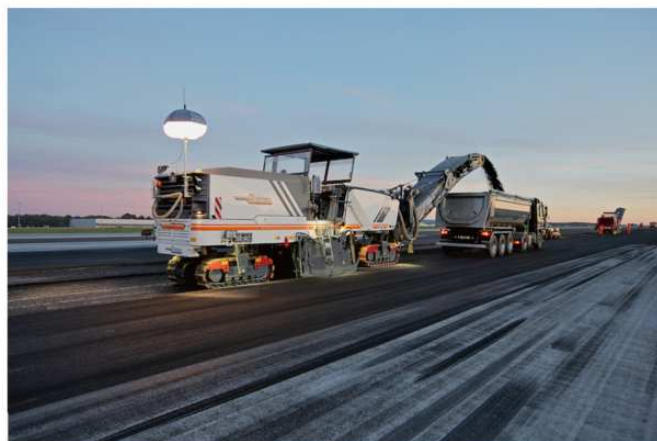
Zvláštní postavení má R-materiál (ČSN EN 13108-8), který je možné použít jako kamenivo do podkladních vrstev jako náhradu za ŠD, pokud se u R-materiálu upraví a sleduje vlhkost podle požadavků tab. NA.2 ČSN EN 13285, R-materiál je možno použít jako náhradu za MZK. I po kvalitním zhutnění vrstvy z R-materiálu však může vlivem pomalu jedoucích nebo zastavujících těžkých nákladních vozidel docházet k trvalým deformacím vrstvy vlivem dotvarování vrstvy asfaltem obalených zrn. Ke stejnému jevu může docházet i při měření modulu přetvárnosti statickou zatěžovací zkouškou podle ČSN 72 1006, proto zde nelze tuto zkoušku spolehlivě použít.

Nejefektivnější uplatnění R-materiálu je při výrobě asfaltových směsí. Proto by se jeho použití do nestmelených podkladních vrstev mělo omezovat.” [34]

Dále TKP 5 v článku 5.D.2 radikálně modifikuje aktuální znění TP 208, kde doplňuje, ruší, upravuje a nahrazuje příslušná ustanovení uvedená v platných technických podmínkách. Tento nový přístup TKP 5 prakticky vylučuje možnost použití kteréhokoli recyklovaného materiálu pro výstavbu nové stavby. Ovšem pro stavby mimo vliv ŘSD však TP 208 a TP 210 stále platí v aktuální podobě, a proto je použití recyklátu v těchto případech možné.

1.4 Získávání recyklovaného materiálu

Existuje několik způsobů, jak získat materiál ze starých vozovek. Nejjednodušší způsob je vybourání celé konstrukce vozovky nebo její jednotlivé vrstvy pomocí rypadla, který lžicí nebo zbíjecím kladivem narušuje asfaltovou vrstvu. Ve stísněných prostorech slouží k vybourání asfaltové vrstvy kolový nakladač nebo kompresor a ruční bourací kladivo. Dalším způsobem je frézování asfaltových vrstev za studena s následným odvozem materiálu na příslušnou deponii. Poslední technologií získávání asfaltového recyklátu z konstrukce vozovek je pomocí frézování asfaltových vrstev za tepla na místě, kde je R-materiál zpracován a opět zabudován do nové vrstvy vozovky. Dnešní frézy umožňují během jednoho jetí získávat materiál v tloušťce až 30 cm a šířce téměř 4 m.



Obrázek 6 – Technologie získávání asfaltového recyklátu z konstrukce vozovek [20]; [21]

Před zahájením prací spojených s frézováním povrchu vozovky je nutné, aby byly provedeny práce předvýrobní přípravy. K tomuto účelu slouží zjednodušená projektová dokumentace zájmové stavby, která obsahuje zejména situaci v určitém měřítku. Situační výkres nám přesně stanovuje vymezení frézované plochy, pokud investor nestanoví jinak. Dále udává tloušťku frézované vrstvy, popřípadě i vyžadované výšky vyfrézované plochy. Během frézování je nutné dbát na ochranná pásma předepsaná projektem a povrchových znacích inženýrských sítí. Je pravidlem, že stavební technik zhotovitele před začátkem frézovacích prací projde celý úsek stavby a reflexním sprejem označí všechny povrchové znaky inženýrských sítí nebo nebezpečné kovové předměty, které by se v asfaltové vrstvě mohly nacházet. Frézování se provádí za částečné nebo celkové uzavírky komunikace, které se řídí závazným rozhodnutím veřejných orgánů.

Samotný technologický postup začíná již požadavky na frézovaný povrch, kdy fréza musí pojíždět po dostatečně rovném a únosném podkladu. Podélný a výsledný sklon komunikace nesmí překročit 12 %, přičemž příčný sklon může být maximálně 6 %, pokud není požadavek na použití zvláštního zařízení, které není těmito skutečnostmi limitováno. Před začátkem frézovacích prací je nezbytné vozovku důkladně očistit od nežádoucích nečistot, očištění probíhá buď kropicí nebo samosběrem. Samotná přeprava frézovacího stroje probíhá pomocí speciálního přepravníku, přičemž v místě stavby, kde se přepravní vzdálenost pohybuje do 2 km, dochází k přesunu frézy po vlastní ose. Než začneme frézovat je nutné uvést nivelační zařízení do pracovní polohy, nastavit frézovací válec, spustit skrápění a nastavit chladicí zařízení. Tloušťka frézování je dána skladbou vrstev vozovky, tvrdosti materiálu a s ohledem na druhotné využití vyfrézovaného materiálu. Například na mostech je nutné počítat s tím, že není možné frézovat až těsně k povrchu izolace mostu. Frézování probíhá po více vrstvách menších tlouštěk, přibližně po 2 cm tak, aby nebyla narušena izolace mostu. Vzdálenost od překážek frézování je dáno situačními možnostmi na staveništi, ale u znaků inženýrských sítí, ocelových vpustí nebo poklopů se v podélném směru pohybujeme v rozmezí 15 cm od kraje znaku, v příčném směru je to přibližně 7 cm. U tramvajových kolejí podélnou vzdálenost frézování od tramvajové tratě stanoví investor na základě typu konstrukce a kolejnice. Rychlost samotného frézování se optimalizuje na základě druhu frézované úpravy, požadavků na zrnitost, tvrdosti materiál, teplotě a tloušťce frézované vrstvy. Po průjezdu frézovacího stroje daným úsekem je nezbytné, provést dokončovací práce. Tyto práce spočívají ve vybourání neodfrézovaných ostrůvků okolo vpustí, poklopů a znaků inženýrských sítí. Celkový odfrézovaný povrch se vyčistí strojem s možností odsávání nebo mechanickým koštětem i v případě, kdy na něj nebude vzápětí kladena nová asfaltová vrstva. Bezpodmínečně musí být zaručena bezpečnost provozu veřejné dopravy v daném úseku po skončení stavebních prací. Může nastat situace, kdy během frézování dojde k odhalení větších poruch v konstrukci vozovky, na ty je pak investor upozorněn a rozhodne o jejich úpravě. Jako všechny stavební technologie, tak i frézování je limitováno povětrnostními vlivy. Frézování není limitováno při rozmezí teplot od 10 °C do 30 °C, při vyšších nebo nižších teplotách dochází k horší zpracovatelnosti materiálu, s tím souvisí zpomalení pracovního postupu, tudíž snížení denního výkonu stroje. Při teplotách pohybující se pod bodem mrazu, není doporučeno provádět frézovací práce. [17] Pokud ovšem investor trvá na nezbytnosti provedení těchto prací, je nutné při frézování použít teplou vodu.

Po odfrézování asfaltového krytu v požadované tloušťce a kvalitě, dojde k odvozu vyfrézovaného materiálu na předem stanovenou deponii, vyčistí se komunikace a předá se zástupci investora.

Dělení silničních fréz dle velikosti:

- **Malé frézy:** využívají se na opravy malého rozsahu, kdy denní výkon frézy se pohybuje okolo 500 m²/den. Šířka frézovacího válce je 500 mm a hloubka záběru frézy je 100 mm.
- **Střední frézy:** využívají se u staveb střední velikosti, kdy je potřeba vyfrézovat celou šíři vozovky. Denní výkon frézy se pohybuje od 1000 m² až do 2000 m² za jeden den dle místních podmínek. Šířka frézovacího válce je 500 mm až 1000 mm a hloubka frézování je až 180 mm.
- **Velké frézy:** jsou největší frézy, které máme na území České republiky k dispozici. Jejich denní výkon je až 7000 m², ale většinou se pohybuje okolo 3500 m². Využívají se k frézování velkých ploch, sanačních úseků dálnic, rychlostních komunikací a letišť. Šířka frézovacího válce je větší než 1000 mm, maximálně však 2200 mm. Hloubka frézování se pohybuje až do 350 mm.
- **Speciální frézy:** jejich využití je převážně při sanačních pracích v intravilánu, kde dochází k frézování poškozeného asfaltového krytu v blízkosti kanalizačních poklopů, uličních vpustí, rigolů a obrubníků. Šířka frézovacího válce je do 350 mm a hloubka záběru frézy až 100 mm.



Obrázek 7 – Využití speciální silniční frézy v blízkosti kanalizačního poklopu [21]

Nasazení typu silniční frézy závisí na zhotoviteli stavby, který dle svého vozového parku, zkušeností a harmonogramu stavby zajistí strojní zařízení pro frézování vozovky. V souvislosti s realizací mikrokoberců, asfaltových nátěrů nebo emulzí se obvykle provádí úprava příčného profilu, kde dochází k odfrézování malých nerovností, které nepřesahují tloušťku 10 mm. Dalším využitím frézování je za účelem obnovy drsnosti povrchu vozovky. Frézování probíhá za studena v tloušťce maximálně 10 mm. Ovšem toto technologické opatření je jen provizorní řešení, které zlepšuje provozní způsobilost vozovky. Níže jsou popsány základní tři technologie získávání recyklovaného materiálu ze starých vozovek.

1) Vybourání celé konstrukce vozovky nebo jejich jednotlivých vrstev

Rozpojení je provedeno strojní sestavou, kterou většinou tvoří bagr, nakladač, případně bourací kladivo. Pro zaříznutí spáry asfaltu se používá pila s diamantovým kotoučem. Během bouracích prací je možné v jednom cyklu provést vybourání spodní podkladní vrstvy a asfaltových vrstev krytu, které jsou stmeleny asfaltovými pojivy. V druhém cyklu se bourací práce věnují spodním podkladním a nestmeleným vrstvám. Vybourání těchto rozdílných druhů vrstev vozovky pomáhá ke zlepšení vlastností asfaltového recyklátu, což přímo ovlivňuje jeho druhotné zpracování u obdobných vrstev. Vybouraný materiál je posléze odvážen nákladními automobily na předem určenou deponii nebo přímo na místo drcení a třídění. Záleží na dojezdové vzdálenosti a dalším faktorům, které prodražují realizaci díla, ale v některých případech je i vhodnější, využít mobilní třídící linku a instalovat ji v blízkosti zájmové stavby nebo místa zpracování R-materiálu.

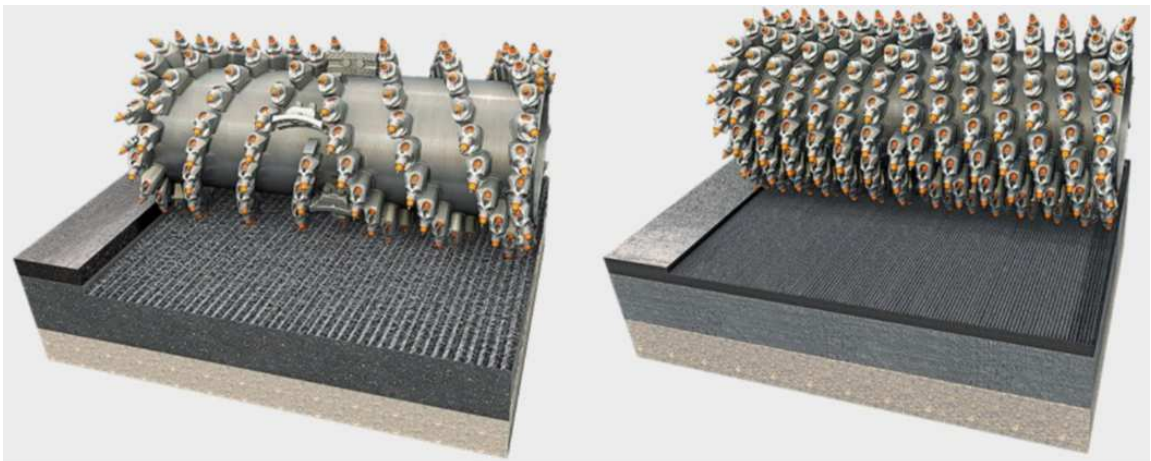
2) Frézování asfaltových vrstev za studena na místě

Frézování ztuhlých asfaltových vrstev za studena se provádí pomocí silničních fréz, kterých existuje celá řada druhů dle velikosti nebo strojního vybavení. Většinou fréza obsahuje výložník pro nakládku vyfrézovaného materiálu na korbu nákladního automobilu. Následně nákladní automobily převážejí přebytečný vyfrézovaný materiál na skládku, případně k okamžitému zpracování za tepla v obalovacích soupravách. Tento způsob odstraňování starých vrstev asfaltových vozovek je na území České republiky nejrozšířenější, neboť je na trhu k dispozici široký sortiment silničních fréz.

Frézování asfaltových vrstev na místě za tepla

Je realizováno v případě, kdy vyfrézovaný R-materiál je na místě opětovně využit jako plnivo do nové recyklované směsi. Tato technologie se nazývá recyklace vozovek za studena na místě. Kdy po zájmové komunikaci přejíždí uskupení strojů, jehož nejdůležitějším článkem je Recyklér, který dokáže během jednoho pracovního pojezdu rozpojit asfaltovou vrstvu nebo podkladní vrstvu se záběrnou hloubkou až 400 mm. Do rozpojené staré asfaltové směsi přidat určité množství organických i hydraulických pojiv, případně jejich kombinaci. Za účelem zlepšení mechanických vlastností nové směsi. Tato směs je v míchací komoře recykléru důkladně promíchána a položena během jednoho pracovního cyklu.

Technologie frézování se neustále vyvíjí, dochází nejen ke zdokonalování realizačních postupů, vývoji mechanizace, ale i celé řady potřeb, které stanovuje dnešní společnost. S požadavkem na jemnější strukturu vyfrézovaného povrchu, který by zlepšoval protismykové vlastnosti vozovky byla vyvinuta technologie Jemného frézování. U této technologie je použit speciální frézovací buben, který má oproti klasickému bubnu dvojnásobek frézovacích nožů, a to 300 kusů. [18] Tím je docíleno ke snížení rozteče drážkování povrchu u frézované plochy. Textura takto odfrézovaného povrchu je tudíž jemnější. Technologií jemného frézování docílíme k srovnání deformací vozovky, odstranění nečistot a zvětralých částí povrchu krytu. Současně slouží k přípravě povrchu komunikace pro navazující technologie jako například Remix nebo realizace mikrooberců. Mezi její další využití patří i schopnost odstranění vodorovného značení na vozovce silnic, dálnic, místních komunikací, mostů, ale i letištních ploch. Avšak její prioritní využití spočívá ve zdrsňení nebezpečných úseků komunikací.



Obrázek 8 – Standartní a jemný frézovací buben silniční frézy [22]

Přístup 3D technologií pomalu získává výrazné zastoupení při realizaci liniových staveb. Zejména v oblasti využití při rekonstrukci komunikace, kdy je nejprve nezbytné vytvořit 3D model zájmové komunikace. Prostřednictvím technologie TLS (terestrického laserového skenování) je detailně zaměřen povrch vozovky a proveden sběr naměřených dat, tyto data slouží k tvorbě podkladu pro vyrovnání nivelety vozovky v příčném i podélném směru. [19] Projektovaný 3D model je navržen s maximální možnou rovinatostí tak, aby nedošlo ke změně odtokových poměrů, oslabení konstrukce a zároveň byl zachován příčný a podélný profil zájmové komunikace v návaznosti na stávající povrchy a jiné inženýrské konstrukce. Principem této technologie je propojení silniční frézy a robotizované totální stanice, která nepřetržitě hlídá výšku a příčný sklon frézovacího válce. Propojení je docíleno vybavením frézy instalační sadou, která umožňuje připojit nivelační systém a provádět frézování dle stanoveného 3D projektu. Podoba instalační sady je jeden elektronicky výsuvný stožár, který je umístěn na boku frézovacího stroje těsně nad frézovacím válcem. Stožár obsahuje speciální komunikační hranol, který se neustále otáčí o 360°, tím je docíleno k nepřetržitému sledování a zaměřování pomocí totální stanice. [19] Využití 3D přístupu při realizaci rekonstrukce komunikace přináší celou řadu výhod. Dochází k úspoře nákladů na vyrovnávací vrstvy vozovek, eliminaci chyb vzniklých při ručním ovládním frézovaných tlouštěk a minimalizaci nákladu na geodetické práce, neboť práce jsou prováděny s milimetrovou přesností díky kontrole totální stanice. Avšak nemusí se jednat pouze o využití 3D technologie při realizace, ale i při kontrole úseku z hlediska kvality pokládky. Budoucnost ukáže, jak rychle se tyto moderní technologie stanou samozřejmostí výrobních a kontrolních procesů dopravního stavitelství.



Obrázek 9 – Využití 3D technologie při frézování krytu vozovky [23]

Díky výhodám frézování dokážeme odděleně získávat druhotný materiál z různých vrstev vozovky. Dostáváme tak neznečištěný materiál, u kterého je přesně stanovený jeho původ, což nám pomůže v jeho opětovném využití do konstrukce komunikace. Naopak nevýhodou frézování mohou být určité změny ve složení kamenné směsi starých materiálů, zejména zvýšený obsah filerů o 2 % až 4 %. To nám negativně ovlivňuje návrh výroby nové směsi, zhoršení přijímání vlhkosti, slepování i zvyšování potřebné energie při výrobě nové směsi. [17]

1.5 Stavební a demoliční odpad (SDO)

Stavební a demoliční odpady jsou produktem různých stavebních činností. Od výstavby, údržby a rekonstrukci staveb, přes různé stavební úpravy dokončených staveb až po kompletní odstranění staveb, kdy byla vyčerpána jejich životnost. Důležitým ukazatelem pro Českou republiku je fakt, že SDO tvoří přes jednu polovinu celkové produkce odpadů na našem území. Tato skutečnost ukazuje na významnost problematiky opětovného využití vybouraných materiálů při realizaci staveb. Ministerstvo životního prostředí uvádí, že až 98 % stavebního demoličního odpadu je v současnosti opět využito jako zdroj druhotných surovin. [2] Otázkou zůstává, zda je tento údaj pravdivý a jestli nakládání se stavebním odpadem je přínosné pro všechny atributy dnešní společnosti. Aktuálně existuje plán odpadového hospodářství České republiky pro léta 2015 až 2024 ve kterém jsou stanovené obecné cíle pro stavební a demoliční odpady:

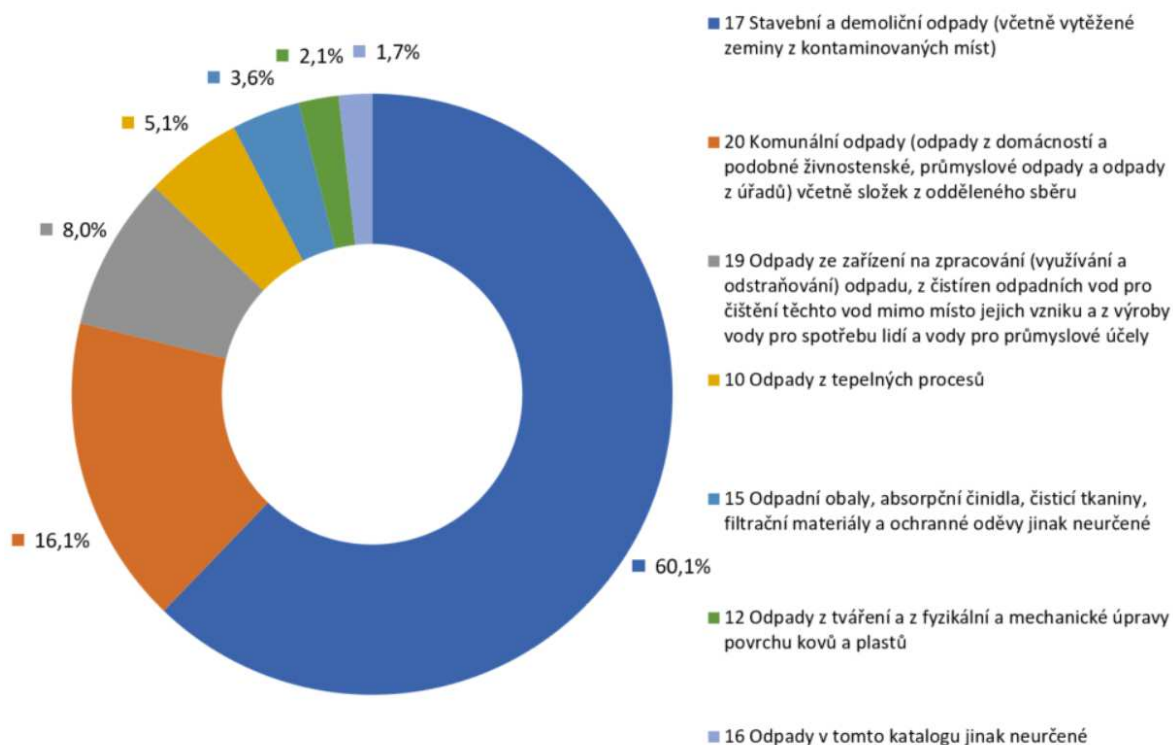
- Předcházení vzniku odpadů a snižování jejich produkce
- Minimalizace nežádoucích účinků na lidské zdraví a životní prostředí, které vzniká při jejich produkci a nakládání s nimi.
- Přiblížení se myšlenke evropské unie o recyklační společnosti
- Maximální využití stavebních odpadů jako alternativu za přírodní zdroje a přechod na oběhové hospodářství [2]

Cíle vycházejí ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech. Zajímavým ukazatelem je i to, jak s druhotnými materiály nakládají v zahraničí, jestli jsme v této oblasti konkurence schopní nebo nikoli. Z toho důvodu jsem se v jedné kapitole výše, zaměřím na poznatky ze zahraničí ohledně opětovného využití asfaltového recyklátu do konstrukčních vrstev vozovek.

Existuje také Metodický návod odporu odpadů pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi, které vydalo ministerstvo životního prostředí. Tento dokument je věnován hlavně zástupcům zhotovitele, stavebnímu dozoru, projektantovi, ale i osobám veřejné správy v rámci stavebního řízení. Řeší problematiku vzniku odpadů z činností stavebního charakteru, zejména staveb provedených z cihelného zdiva, betonových nebo železobetonových konstrukcí, živičných materiálů, kamene, šterkopísků a dalších obdobných materiálů. [24]

Mezi jeho hlavní cíle patří omezení množství nebezpečných odpadů vznikajících při zřizování staveb, jejich údržbě, změnách dokončených staveb a odstraňování staveb. Dále se zabývá sjednocením postupu pro přiřazování kategorie odpadu u vznikajících SDO. Kategorie jsou dvě, nebezpečný a ostatní odpad. Tato kategorie má pak zásadní vliv na možnosti opětovného zpracování druhotného materiálu. Usiluje o zabezpečení přednostního využívání stavebních a demoličních odpadů a stanovení jednotných podmínek pro přejímku odpadů. Všechny tyto výše uvedené skutečnosti směřují k vysoké úrovni ochrany lidského zdraví při nakládání s odpady a také ke snížení rizika znečištění životního prostředí.

Stavební demoliční odpad je odpad, který vzniká při zřizování staveb, během jejich údržby, při provádění změn stávajícího stavu nebo také při jejich kompletním odstranění. Aktuální legislativou je definován jako nečinný odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti z hlediska znečištění životního prostředí nebo lidského zdraví. Za normálních klimatických podmínek u něj nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám. Přesnější specifikace je uvedena ve vyhlášce č.294/2005 Sb., která stanovuje podmínky ukládání odpadů na skládky a jejich využití na povrchu terénu ve smyslu znění vyhlášky č.61/2010 Sb., § 2, písmenko a) inertní odpad. [15] Tento znovuzískaný materiál je dle Katalogu odpadů zařazen do kategorie číslo 17, tato kategorie je ještě rozdělena na odpady neobsahující nebezpečné látky, tudíž jsou vhodné pro využití při technologii recyklace. A druhou skupinu tvoří odpady, které jsou podmíněně vyloučeny z recyklace, protože obsahují zastoupení nebezpečných látek. Avšak pokud dojde při jejich úpravě k odstranění těchto nebezpečných složek, mohou být překvalifikovány na odpady vhodné k recyklaci. Odpady ze stavebně demoličních prací obsahující azbest jsou bezpodmínečně vyloučeny z možnosti opětovného zabudování materiálu do stavebních konstrukcí. Katalog odpadů se řídí přílohou č.1, Vyhlášky 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů. [24]



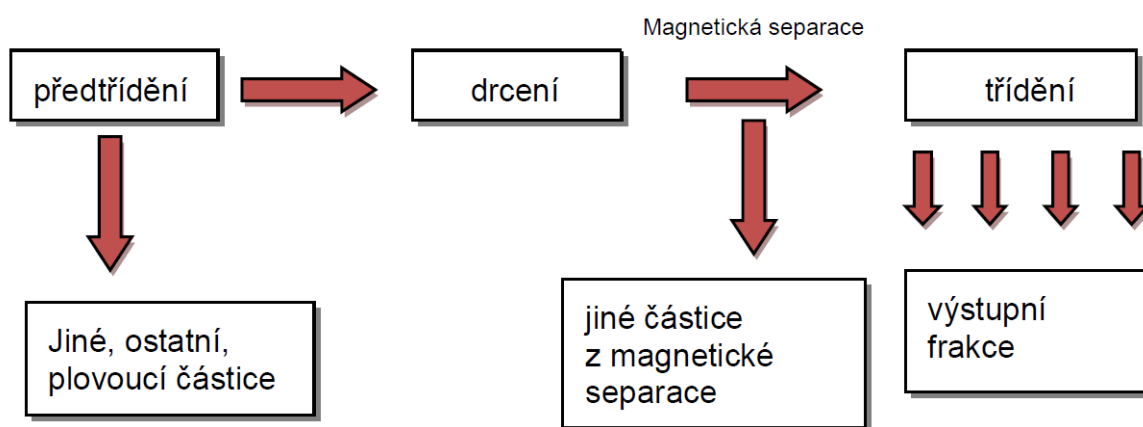
Obrázek 10- Graf produkce odpadů (skupina se zastoupením > 1%) za rok 2017 v ČR [25]

Skupina a název odpadu		Množství odpadů [t]	Podílové zastoupení [%]
17	Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst)	20 742 812	60,1%
20	Komunální odpady (odpady z domácností a podobně živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů) včetně složek z odděleného sběru	5 542 537	16,1%
19	Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely	2 771 043	8,0%
10	Odpady z tepelných procesů	1 755 342	5,1%
15	Odpadní obaly, absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené	1 228 846	3,6%
12	Odpady z tváření a z fyzikální a mechanické úpravy povrchu kovů a plastů	714 668	2,1%
16	Odpady v tomto katalogu jinak neurčené	597 030	1,7%
Celková produkce odpadů		34 512 615	100%

Tabulka 12 – Produkce skupin odpadů v zastoupení >1% na území ČR, za rok 2017 [25]

1.5.1 Výroba recyklovaných stavebních materiálů

Jako recyklovaný stavební materiál (RSM) lze chápat takový materiálový produkt, který vzniká při úpravě stavebně demoličního odpadu prostřednictvím zařízení určených k tomuto zpracování. Dochází ke změně zrnitosti a rozřídění na jednotlivé velikostní frakce. Výroba, třídění a skladování má zásadní vliv na vlastnosti vyrobeného recyklátu, proto pro získání kvalitního druhotného materiálu je nutné zvolit, nejen správnou technologii vyzískání, ale také promyslet logistiku celého chodu recyklační linky a následného uskladnění. Z hlediska získávání recyklátu v požadované kvalitě se za poslední roky na našem území postup konfigurace víceméně ustálil, jednotlivé kroky jsou vyobrazeny níže.



Obrázek 11 – Blokové schéma úpravy SDO na recyklovaný materiál [15]

Dle výše uvedeného schématu prací, je jasně vidět, že k docílení výroby kvalitního recyklačního materiálu nemůže být docíleno bez tří základních technologických operací. Těmito technologiemi jsou přetřídění, samotné drcení a třídění na jednotlivé frakce. V dnešní době existuje celá řada firem, které pro recyklaci stavebního demoličního odpadu využívá pouze část výše uvedeného výrobního řetězce. Tím je docíleno ke snížení nákladů na výrobu recyklátu, čím je docíleno i ke snížení výsledné ceny za kterou je materiál nabízen k odkupu. Jedná se o kombinace, kdy je provozován samotný drtič menších rozměrů bez procesu přetřídění a následného finálního třídění. Opačnou variantou je využití třídícího zařízení různých velikostí bez drtiče.

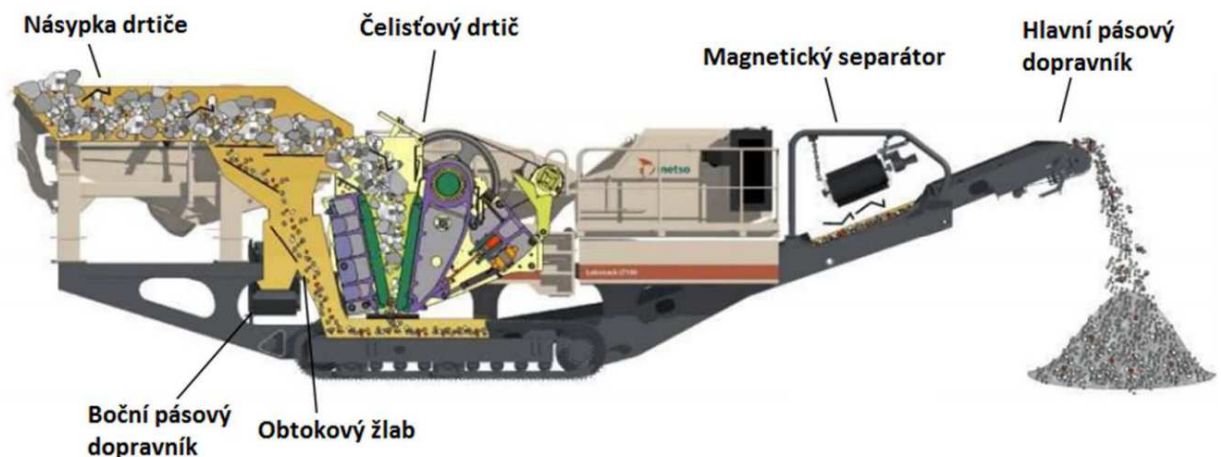
Efektivnost technologie recyklace stavebních odpadů a kvalita výstupního materiálu je přímo úměrná kvalitě třídění materiálu přímo na místě demolice.

Třídění stavebně demoličního odpadu probíhá dle následujících kategorií:

- Oddělení kontaminovaných materiálů od nekontaminovaných
- Oddělení cizorodých materiálů od minerálních sutí
- Roztřídění minerální suti na základní druhy, kterými jsou výkopové zeminy, keramická stavební suť, betonová suť a asfaltové suti. [26]

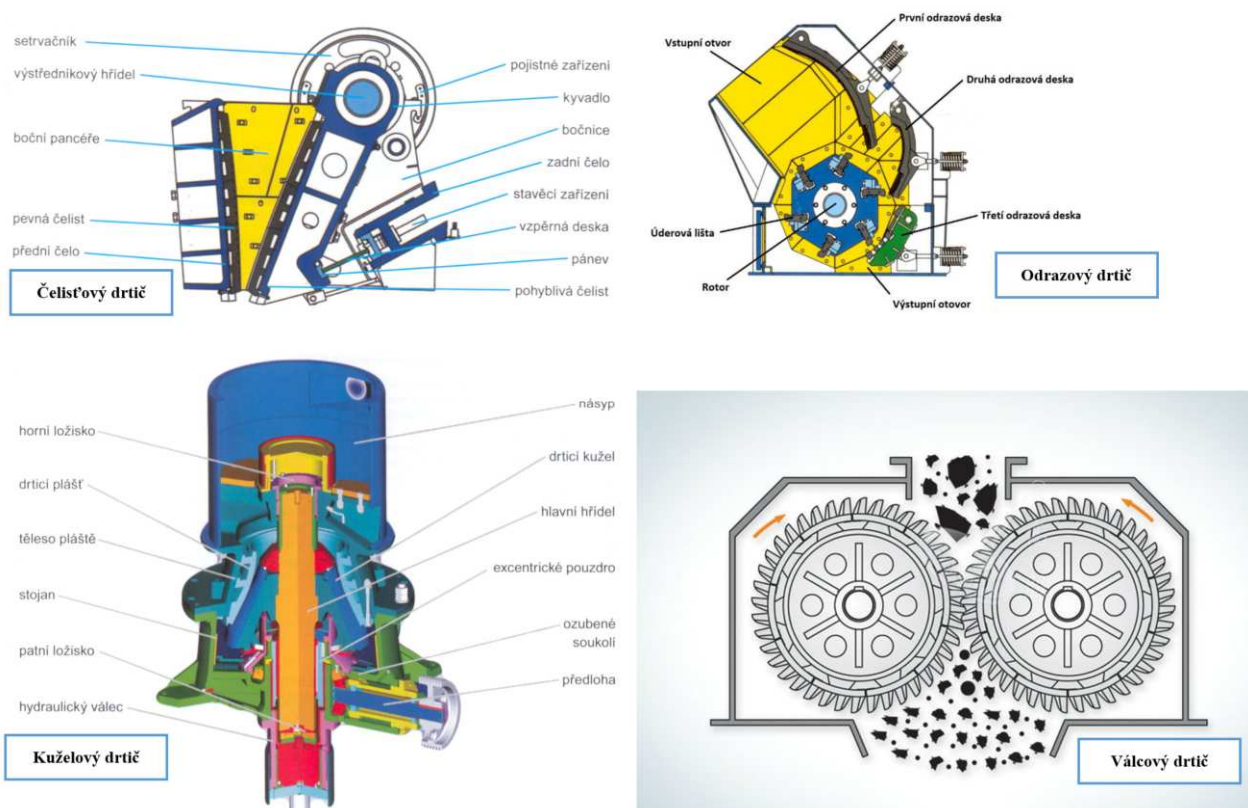
Během celého procesu recyklace stavebních sutí je možné využít celou řadu stavebních strojů. Výběr ovšem záleží na objemech materiálu určeného ke zpracování a také na možnostech realizační firmy. Mezi nejužívanější strojní zařízení patří drtiče, které slouží k výrobě recyklovaného kameniva. Proces drcení většinou probíhá ve více stupních, kdy konkrétní podoba a počet stupňů drcení je přímo závislé na požadovaných vlastnostech výsledného kameniva. Pro první stupeň drcení se většinou používají čelistové drtiče, mezi další stupně drcení patří využití drtičů kuželových, odrazových nebo válcových. Podle způsobu drcení materiálu jsou drtící jednotky rozděleny následovně:

- **Čelistové drtiče** – slouží hlavně ke zpracování betonu, železobetonu a cihelné suti. Velikost vstupního materiálu se pohybuje v rozmezí od 50 cm do 100 cm. Provozní vlastnosti těchto drtičů jsou velice spolehlivé, náklady na provoz a údržbu jsou velice nízké i při vysokém výkonu prací. Dále můžeme drtící jednotky rozlišovat podle pásového nebo kolového podvozku, ale také na jednovzpěrné a dvouvzpěrné. Jednovzpěrné dosahují vyššího stupně zdrobnění a lepší tvarové hodnoty zrn, zatímco dvouvzpěrné dokáží drtit extrémně pevné materiály stavební suti.



Obrázek 12 – Mobilní čelistový drtič na pásovému podvozku [26]

- **Kuželové drtiče** – slouží prioritně ke zpracování přírodního kameniva (vápence, pískovce, křemene a dalších podobných materiálů). Frakce výstupního materiálu se pohybuje od 5 cm do 25 cm. Tento typ má celou řadu výhod, ovšem mezi nejvýznamnější patří vysoká kvalita konečného produktu.
- **Odrázové drtiče** – zpracovávají celou řadu vybouraných materiálů od kameniva, přes živičné kry, beton, železobeton, ale i cihelnou suť. Tyto materiály ovšem musejí mít maximální vstupní rozměr do 80 cm.
- **Válcové drtiče** – jejich využití je hlavně při jemných až středních drcení velmi pevných materiálů. Během procesu dochází k drcení mezi dvěma protisměrně se otáčejícími válci, které mohou mít hladký, profilovaný nebo výstupkovitý povrch válce. [26]



Obrázek 13 – Typy drtičů pro různé druhy drcení [26]

Další technologickou operací nutnou k docílení získání kvalitního recyklátu je proces třídění, kdy třídící jednotky dělíme na mobilní, semimobilní nebo kontejnerové.

Dále potom na vibrační a rezonanční. Hlavním úkolem tohoto strojního zařízení je docílit k vytrídění materiálu na potřebné velikostní frakce.

Používají se pro vytrídění kameniva, štěrků, písků, cihelné sutě, drceného betonu, zeminy a dalších materiálů. Součástí třídícího zařízení mohou být i magnetické separátory, které slouží k odstranění výztuže z recyklované stavební suti, váhy, či síta. Síta slouží k roztřídění materiálu dle požadovaných frakcí. Tyto síta se dělí dle tvaru prostupů na čtvercové a harfové. Lehkou nevýhodu mají harfová síta, u kterých občas dochází i k propadu plochých nekubických zrn. Nekubické zrno je takové, u kterého převládá délkový rozměr více jak třináásobně oproti šířkovému.

Jak již bylo výše zmíněno, tak pro recyklaci materiálů se v dnešní době nejčastěji používají recyklační linky, neboť obsahující více technologických postupů nutných k získání kvalitního druhotného materiálu. Jejich složení tvoří drtiče, třídíče, magnetické separátory, případně další zařízení. Podle přemístitelnosti dělíme recyklační linky na stacionární, mobilní a semimobilní. U mobilních a semimobilních recyklačních linek dochází k přesunu recyklace na místo vzniku SDO. Pozitivní stránkou této technologie je snížení dopravního zatížení přídružené dopravní sítě a zároveň snížení nákladů investora. Mezi negativní vlivy zas patří zvýšená hladina hluku a prachu v blízkém okolí. Výkon těchto linek se pohybuje v rozmezí 30 až 150 tun za hodinu a využívá se pro recyklaci relativně menšího množství stavebního odpadu s výstupním produktem nižší kvality.

- Stacionární recyklační linky. Jejich největší předností je vytvoření kvalitního recyklátu při vysokém výkonu. Kvalita je docílena díky velikosti a vybavení stacionární recyklační linky víceúčelového areálu. Ovšem musí být docíleno k trvalému přísunu SDO a možnosti předzásobení na pozemku linky. Tato skutečnost při vysokých cenách za dopravu a nutnosti pozemků, snižuje ekonomickou efektivnost provozu.
- Mobilní recyklační linky se mohou při práci pohybovat. Využívají se hlavně ve složitém terénu, kde se pohybují pomocí pásového podvozku.

- Semimobilní recyklační linky při práci musejí stát na jednom místě, avšak po ukončení pracovního procesu se dají snadno a rychle přepravit. Přeprava je umožněna díky kolovému podvozku, ližinovému nebo kontejnerovému charakteru stroje. Jedná se o zařízení, které je možné rozebrat na jednotlivé díly a snadněji tak přemístit na určené místo. Osazení probíhá přímo na terén bez nutnosti betonového základu a pohon bývá vyřešen vestavěnou centrálou. [26]



Obrázek 14 – Mobilní a Stacionární recyklační linka [26]

1.5.2 Dělení recyklovaného stavebního materiálu

Stavební demoliční odpady mají jednu důležitou společnou vlastnost. Jsou převážně nebo zcela recyklovatelné a slouží jako zdroj vzniku druhotných surovin pro stavební výrobu. Recykláty se převážně uplatňují v dopravním stavitelství při rekonstrukci konstrukčních vrstev vozovek a terénních úpravách. Níže je uvedené členění recyklovaného stavebního materiálu dle TP 210:

- **Recyklát z betonu:** jedná se o recyklované kamenivo, které se získává drcením a tříděním betonových výrobků na požadovanou frakci. Jeho využití je jako zásyrových materiálů inženýrských sítí, do podkladních vrstev komunikací, pro stmelené i nestmelené směsi, dále se používá jako alternativa za přírodní kamenivo do asfaltových směsí nebo jako plnivo do betonu nižších tříd. Ovšem pevnosti betonu v tlaku jsou nižší než u přírodního kameniva. Další nevýhodou betonového recyklátu je skutečnost, že jeho jemnou složku tvoří frakce 0 až 4 mm a 0 až 8 mm, která není vhodná do betonu. Betonový recyklát obsahuje tyto složky:

- zastoupení $R_c \geq 90$ % z celkové hmotnosti
- obsah $(R_u+R_b) \leq 6$ % hmotnosti
- maximální obsah složky $R_g \leq 1$ % hmotnosti
- Maximální podíl jiných částic $(X+Y+ FL)$ je 3 %, kdy maximální množství plovoucích částic FL je 1 %, ověření probíhá objemově dle ČSN EN 933–11.

- **Recyklát z vozovek:** jde o recyklované kamenivo, které se získává prostřednictvím třídění a drcení betonu, vrstev stmelených asfaltem nebo hydraulickým pojivem. Dále ho získáváme z nestmelených vrstev a hrubozrnných zemin s celkovým zastoupením složek:

- $(R_c+R_b+R_u) \geq 95$ % celkové hmotnosti
- Zastoupení složky R_a může být nejvýše 30 % hmotnosti
- Obsah jiných, ostatních a plovoucích částí $(X+Y+FL)$ může být maximálně 5 % celkové hmotnosti materiálu.

Jeho opětovné využití je závislé na primárně zabudované surovině. Jedná-li se o nekvalitní kamenivo vyzískané z recyklace starých vozovek, tak jeho opětovné využití je vhodné pouze jako zásypový materiál. Pokud je ovšem recyklát získán z konstrukce, kde byl použit kvalitní materiál, tak lze tento recyklát použít do opětovného zabudování konstrukčních vrstev vozovek.

- **Recyklát ze zdiva:** je nejvíce recyklovaný stavební materiál, neboť jeho využití při opětovném použití je velmi široké. Využívá se hlavně v kombinaci s pojivem za účelem výroby cihelných výrobků. Získává se drcením a tříděním pálených a nepálených zdících prvků, zejména cihel, obkladaček, vápenopískových prvků a pórobetonových tvárnic s celkovým obsahem složek:

- $(R_b+R_c+R_u) \geq 90$ % z celkové hmotnosti
- Maximální podíl jiných částic $(X+Y+ FL)$ je 10 % celkové hmotnosti

Recyklát se většinou získává v zrnitosti do 80 mm, proto i stavební demoliční odpad, který vstupuje do třídícího zařízení musí být na to uzpůsoben. Běžně se třídí na tři frakce materiálu 0/16 mm, 16/32 mm a 32/80 mm.

- **Recyklát směsný:** tento materiál získáváme také technologií drcení a následného třídění SDO, avšak recyklát směsný není považováno za kamenivo dle platné legislativy. Jeho využití je převážně v oblasti úprav podloží pozemních komunikací, zásyp rýh, terénních úprav nebo jako náhrada za zeminu pro realizaci násypů.
U tohoto materiálu není podíl hlavních složek legislativně určen, legislativa stanovuje pouze obsah jiných, ostatních a plovoucích částic $(X+Y+FL) \leq 10 \%$ celkové hmotnosti.
- **R-materiál:** je asfaltová směs, která vzniká odfrézováním vrchních asfaltových vrstev vozovky, drcením velkých vybouraných desek a kusů asfaltové konstrukce nebo z nadbytečné nebo neshodné výroby. Jedná se o směs, kde víc jak 95 % zastoupení směsi tvoří asfaltový materiál (Ra) s maximálním obsahem 5 % hmotnosti ostatních recyklovaných materiálů $(Rc+Rb+Ru+X+Y+FL)$.
- **Recyklát asfaltový:** je takový materiál vyzískaný z vozovek pozemních komunikací, který má zastoupení asfaltového materiálu $30 \% < Ra \leq 95 \%$ celkové hmotnosti materiálu.
- **Jiné částice (X):** jedná se o přilnavé částice, různorodé částice jako kovy, neplovoucí dřevo, stavební plasty, pryž, sádrová omítka a podobně. Tyto stavební odpady definuje ČSN EN 933-11. Kovy mohou být železné nebo neželezné. Mezi přilnavé částice řadíme jemnozrnné jílovité zeminy a nečistoty.
- **Ostatní částice (Y):** jde o částice nestavebního charakteru, mezi které se řadí polyetylénové obaly, papír, textil, organické materiály jako humus a rašelina. Stanovování obsahu ostatních částic (Y) se provádí zároveň při stanovení složky jiných částic (X) dle ČSN EN 933-11.

- **Plovoucí částice (FL):** jedná se o takové částice, které plavou ve vodě. Mezi plovoucí částice patří dřevo, polystyrén a další podobné materiály. Stanovují se v souladu s ČSN EN 933-11. [15]

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

Tabulka 13 – Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva [28]

Jak už bylo výše zmíněno, tak kvalita recyklátů je přímo úměrná kvalitě technologií získávání stavebně demoličního materiálu a jeho zpracování. Vlastnosti recyklátů ověřují akreditované laboratoře pomocí laboratorních zkoušek. Druhy a postupy zkoušek jsou definovány v platných normových dokumentech. Na území České republiky se problematikou související s recyklací inertních stavebních a demoličních materiálů zabývá občanské sdružení právnických a fyzických osob ARSN (Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice). Tato organizace poukazuje na základní druhy recyklátu a možnosti jejich využití. Dále také poukazuje na existenci systému posuzování kvality recyklátů dle aktuálně závazných norem a předpisů, který má zásadní vliv na následné uplatňování recyklátů ve stavební výrobě. Tento systém má za následek širší uplatnění recyklátů v procesu výstavby, což vede ke snížení snahy o zbavení se SDO pololegální či zcela nelegální cestou. [27]

1.6 Asfaltový recyklát

Jedná se o stavební odpad, který vzniká při rekonstrukci komunikace. Záleží na technologii odstranění asfaltových povrchů, pokud odstranění probíhá frézou, tak vzniká druhotný materiál, který se vyznačuje jako homogenizovaná směs asfaltu a kameniva. Pokud odstranění asfaltové vrstvy probíhá trháním a vybouráním velkých desek asfaltu, jsou asfaltové kry následně drceny a tříděny na požadovanou frakci. Posledním zdrojem asfaltového recyklátu je z nadbytečné nebo neshodné výroby. Pod pojmem asfaltová směs se rozumí průmyslově vyráběná směs obalovaného kameniva asfaltem s případným podílem přísad a příměsí. Mezi nejvhodnější druhotné uplatnění patří opětovné využití asfaltového recyklátu při realizaci vrstev pozemních komunikací. Tím je umožněno využití pojiva,

jež asfaltový recyklát obsahuje. Při správném způsobu nakládání se stavebně demoličním materiálem lze tento materiál považovat za stejně hodnotný jako přírodní materiál. Využitím druhotných materiálů tím pádem nedochází k ovlivnění kvality díla. Současná legislativa TP 210 rozlišuje dva termíny pro zařazení asfaltového recyklátu:

- **R-materiál** – vznikl z anglického překladu Reclaimed Asphalt (Dále jen Ra), kdy se jedná o asfaltovou směs asfaltu a kameniva znovuzískanou z bourání nebo frézování asfaltových vrstev vozovek. Jedná se o asfaltovou směs, kde zastoupení asfaltového materiálu (Ra) je větší než 95 % celkové hmotnosti směsi. Zbytek směsi s maximálním obsahem 5 % celkové hmotnosti směsi tvoří ostatní materiály vzniklé při recyklaci. Jedná se o materiály betonové (Rc), cihelné (Rb), kamenité (Ru), jílovité a další přilnavé nečistoty (X), papír, polyetylenové obaly, textil a organické materiály (Y) a plovoucí částice (Fl) mezi které se řadí polystyrén nebo dřevo. [15]
- **Asfaltový recyklát** – je také asfaltová směs asfaltu a kameniva, kde podíl zastoupení asfaltového materiálu se pohybuje v rozmezí 30 % až 95 % celkové hmotnosti směsi. [15]

Využitím R-materiálu při realizaci liniových staveb se zabývá norma ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – část 8: R-materiál. Zatímco definice R-materiálu je popsána v TP 210, které se zabývají užitím recyklovaného stavebního demoličního materiálu do pozemních komunikací. Nejvyšší jakosti R-materiálu dosahujeme při frézování jednotlivých asfaltových vrstev odděleně. S tím je spojený i požadavek na oddělené skladování R-materiálu vyzískaného z frézování obrusné vrstvy a z vrstev ložných, podkladních, či R-materiálu získaného neselektivně jiným způsobem. Při frézování a úpravě R-materiálu dochází k jeho drcení, čím je způsobeno jiné zrnitostní složení, než které má původní asfaltová směs. S kvalitou R-materiálu dále úzce souvisí jeho skladování, protože vlhkost v materiálu je nežádoucí. Ideálním řešením je skladovat R-materiál v zastřešených prostorech se zpevněnou podkladní plochou, kde je zajištěn odvod vody díky vypádování. Pokud nejsou k dispozici, vhodnou alternativou se nabízejí nepromokavé plachty. Při zvýšené přítomnosti vlhkosti je R-materiál hůře zpracovatelný, díky tomu rostou požadavky na energetickou náročnost během výroby nových asfaltových směsí. Z tohoto důvodu je ekonomické skladovat R-materiál v suchém prostředí.



Obrázek 15 – Třídění a skladování R-materiálu [16]

1.7 Recyklace asfaltových vrstev liniových staveb

Troufnu si tvrdit, že oblast technologií a pracovních postupů, které se týkají recyklace pozemních komunikací. Patří k nezbytnostem moderního stavitelství. Z hlediska zachování udržitelného rozvoje je znovupoužití stavebních materiálů nedílnou součástí dnešního světa. Využití recyklace má celou řadu pozitivních dopadů na společnost, a to například snižování odpadů, snižování emisí, ochrana přírodních zdrojů a dalších nežádoucích vlivů jako je doba výstavby, zatížení okolních komunikací těžkou dopravou a hlučností. Avšak toto téma vzbuzuje celou řadu rozdílných názorů a postojů.

Nedílnou součástí každé recyklace je provedení diagnostického průzkumu, který stanoví vhodnost recyklace asfaltových vrstev a vhodnost prováděcí technologie. Diagnostický průzkum spadá do přípravných prací a slouží pro získání co nejpřesnějších dat o složení směsi určené k recyklaci. Nejprve musí být provedena vizuální kontrola komunikace, kde se zjistí a identifikují poruchy. Poté následuje odebrání vzorků z dané komunikace pomocí kopaných sond nebo jádrových vrtů. Odebrané vzorky nám pomohou zjistit skutečný stav komunikace, především tloušťku a druh konstrukčních vrstev, dále také únosnost a zbytkovou životnost konstrukce. Vzorky nám také poslouží k ideálnímu návrhu složení recyklované směsi. Odebrání vzorků je velice důležité, neboť kolikrát jejich rozbor ukáže na nedostatky konstrukce. Velmi často se stává, že do nové směsi se přidávají další materiály, které zlepšují parametry směsi na požadované vlastnosti. Je pravidlem, že výsledky diagnostického průzkumu jsou součástí zadávací dokumentace stavby a projektant tak může stanovit vhodnou alternativu opravy nebo údržby komunikace. [3]

1.7.1 Recyklace asfaltových směsí na místě za studena

Jedná se o technologii, která je založená na druhotném zpracování zabudovaného materiálu v konstrukci komunikace bez nutnosti ohřevu. Její využití je tam, kde je již vyčerpaná únosnost vozovky a porušení je v takovém rozsahu, že je nezbytná rekonstrukce více vrstev najednou. Hlavním ukazatelem typu tohoto poškození jsou síťové trhliny v krytu komunikace, které jsou často doprovázeny výtluky nebo četnými deformacemi povrchu. Deformace povrchu se nacházejí většinou při krajích komunikace nebo v místě stopy vozidel. [12] V posledním desetiletí došlo k výraznému rozvoji technologie recyklace vozovek za studena prováděné na místě. Z hlediska omezenosti přírodních zdrojů je myšlenka znovuvyužití původně zabudovaného materiálu velmi prospěšná. Nicméně aktuální technologie využívají vyfrézovaný R-materiál pouze jako alternativu za přírodní kamenivo. Tudíž vůbec není využito potenciálu pojiva, které vybouraný R-materiál obsahuje. Tento trend je pochopitelný, jedná se o vylepšení realizace z hlediska rychlosti provedení, flexibility, úspory za přepravu materiálu a zmenšení nežádoucího vlivu na životní prostředí.

Recyklací vozovek za studena na místě rozumíme soubor technologií, které využívají původní recyklované kamenivo dané komunikace s použitím přidaných komponentů směsi nebo bez nich. Recyklované kamenivo není během výrobního procesu zahříváno a v závislosti na vstupních materiálech a přidaném typu pojiva je výsledná nová asfaltová směs stmelená nebo nestmelená. V případě výroby nové směsi nestmelené dostáváme obdobné vlastnosti jako u ŠD, nebo MZK. U směsí stmelených přidanými pojivy získává recyklovaná vrstva srovnatelné vlastnosti jako SC, SH, ACL nebo ACP.

V České republice se technologie recyklace na místě nejčastěji používá zejména u komunikací II. a III. tříd, případně u místních komunikací, kde je nižší třída dopravního zatížení. I když je tato technologie použitelná pro všechny typy vozovek a třídy dopravního zatížení. Začátky využití recyklace za studena na místě v České republice se datují začátkem devadesátých let minulého století, kdy byla převzata ze zahraničí. V začátcích uplatňování této technologie byl nedostatek nejen se zkušenostmi z realizace, ale byla také absence technických předpisů, které neexistovaly. První recyklovaná vrstva na území ČR s využitím cementového pojiva se porušila trhlinami a následně došlo i k jejímu celkovému rozpadu. Postupným vývojem technologie docházelo i k tvorbě adekvátní legislativy, která se zaměřovala na danou problematiku.

Nejprve vznikly technické podmínky 162 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena na místě s použitím asfaltových pojiv a cementu, které byly v roce 2009 nahrazeny aktuálním předpisem TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena.

Dělení recyklace na místě za studena:

- **Celková recyklace** – jedná se o recyklaci krytu a podkladních vrstev, která je realizována společně nebo po částech. Recyklace se provádí o mocnosti 120 mm až 250 mm. Při celkové recyklaci je použito jako pojivo cement nebo kombinace cementu + asfaltové emulze. Lze použít i alternativní hydraulické pojivo místo cementu.
- **Částečná recyklace** – jde o recyklaci asfaltových vrstev krytu do hloubky maximálně 120 mm. Kde se jako hlavní složka pojiva nové směsi používají asfaltové emulze.

Další dělení technologie recyklace na místě za studena záleží dle použití pojiva:

- **Recyklace bez přidaného pojiva** – vznikají vrstvy nestmelené, kde z recyklovaného kameniva je realizovaná reprofilace nebo homogenizace stávající konstrukce. Recyklovaný materiál je považován za alternativu přírodního kameniva, tudíž výslednou vrstvou je šterkodrt' nebo mechanicky zpevněné kamenivo. Využití nestmelených směsí je převážně v podkladních vrstvách komunikace.
- **Recyklace s přidaným pojivem** – vznikají vrstvy stmelené, kde díky přidanému pojivu dochází ke zlepšení parametrů nové směsi. Hlavním smyslem stmelených směsí je zhodnocení původního materiálu za účelem lepších pevnostních parametrů směsi, tudíž větší únosnosti konstrukce. Mezi používané druhy pojiv se řadí cement, asfaltové emulze, zpěněný asfalt a další kombinace jednotlivých pojiv. Vhodnou alternativou za cement jsou jakákoliv hydraulická pojiva.

Níže jsou uvedeny jednotlivé technologie studené recyklace dle TP 208.

Rozdělení podle druhu pojiva	Technologie studené recyklace pro vrstvy vozovek	
	Recyklace na místě	Recyklace v centru
Bez pojiva	Reprofilace a homogenizace nestmelené vrstvy s možností přidání materiálu za účelem zlepšení zrnitosti	Použití recyklovaného materiálu pro nestmelené vrstvy
S cementem	Recyklace vrstev, které neobsahují asfaltové pojivo	Použití asfaltového asfaltového recyklátu, který neobsahuje asfaltové pojivo
Jiné hydraulické pojivo		
Asfaltová emulze a cement	Společná recyklace vrstev, které obsahují asfaltové pojivo a vrstev bez asfaltového pojiva	Použití směsi recyklovaného materiálu, obsahující složku s asfaltovým pojivem
Zpěněný asfalt a cement		
Asfaltová emulze a cement	Recyklace vrstev asfaltového krytu	Použití R-materiálu pro vrstvy asfaltového krytu
Zpěněný asfalt		

Tabulka 14 – Rozdělení technologií studené recyklace dle použitého pojiva [12]

Technologický postup:

Předpokladem úspěšné realizace opětovného využití základní směsi na místě za studena je aplikace vhodné strojní sestavy. Sestava strojů musí být dobře sladěná, což nám přímo ovlivňuje výkonnost práce. Nejdůležitějším článkem strojní sestavy je silniční fréza, která tlačí a táhne další nezbytné stroje pro recyklaci. Šířkový záběr u klasické frézy se pohybuje od 2,0 m do 2,5 m a maximální možná hloubka záběru frézy dosahuje až 500 mm. Recyklér nebo míchací a třídící jednotka okamžitě zpracovává odfrézovaný materiál a dle vstupních údajů dávkuje požadované množství pojiv. K dávkování dochází prostřednictvím vstřikovačů, které pomocí hadic dodávají tekuté pojivo ke vstřikovací liště nad mísící a frézovací komoru. Proces vstřikování je řízen softwarově, kde je kontrolováno množství přidaných pojiv, což zajišťuje stálou kvalitu požadované směsi. Lze současně přidávat i kombinaci jednotlivých doplněných komponentů, například vodu a asfaltovou emulzi nebo cementovou a asfaltovou emulzi zároveň. V případě, že je požadavek na doplnění křivky zrnitosti výsledné směsi. Je nezbytné, aby před recyklační kolonou došlo k přidání požadovaného kameniva přímo na vozovku. Pokud je zapotřebí, tak i rozprostření hydraulického pojiva, které je provedeno distributorem cementu. Dávkování hydraulického pojiva existuje i formou suspense, kdy je samotná suspense přidána přímo do míchacího prostoru recykléru, ale tato metoda se na území České republiky prakticky nepoužívá.

Na takto připravený povrch určený k recyklaci najede recyklační uskupení strojů, kdy v jednom pracovním cyklu dochází k rozpojení stávající vrstvy komunikace, pomocí frézovacího bubnu. Následuje kontinuální dávkování předem stanoveného množství pojiv a vody do míchací komory. A následná pokládka nové recyklované směsi na podklad vozovky. Pokud recyklér obsahuje i rovnací lištu, dochází k rovnoměrnému rozprostření směsi pomocí šneků před lištou, urovnání a předhutnění recyklované směsi. Pokud recyklér nedisponuje rovnací lištou, je nutné rozhrnutí a srovnání nové recyklované směsi provést pomocí grejdrů. Posledním krokem této technologie je provedení předepsaného zhutnění nové konstrukční vrstvy vozovky.

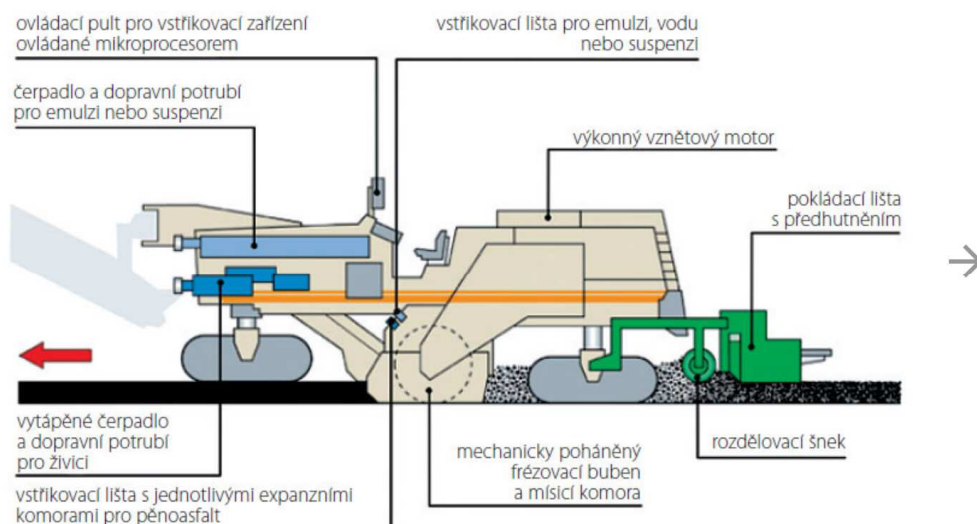
Strojní sestava recyklačního vlaku nutná k realizaci recyklace za studena na místě je závislá na nasazení uskupení strojů, které volí zhotovitel. Při nasazení silniční frézy je nutné, aby v recyklačním vlaku byly nasazeny stroje, které umožňují nutné kroky pracovního postupu. V případě nasazení recykléru, který dokáže realizovat více kroků najednou, dochází ke zmenšení strojního vlaku, což má své výhody. Níže jsou uvedeny jednotlivé stroje, které jsou používány při recyklaci za studena na místě:

- dávkovací zařízení na hydraulické pojivo, případně míchací jednotka
- cisterna s vodou
- recyklační fréza (recyklér)
- třídící, drtící a míchací jednotka
- dávkovací zařízení asfaltového pojiva (asfaltová emulze, zpeněný asfalt)
- finišer (v případě absence rovnací lišty u recykléru)
- grader (v případě absence rovnací lišty u recykléru)
- hutnicí sestava válců
- stroje na řezání spár
- kropící vůz



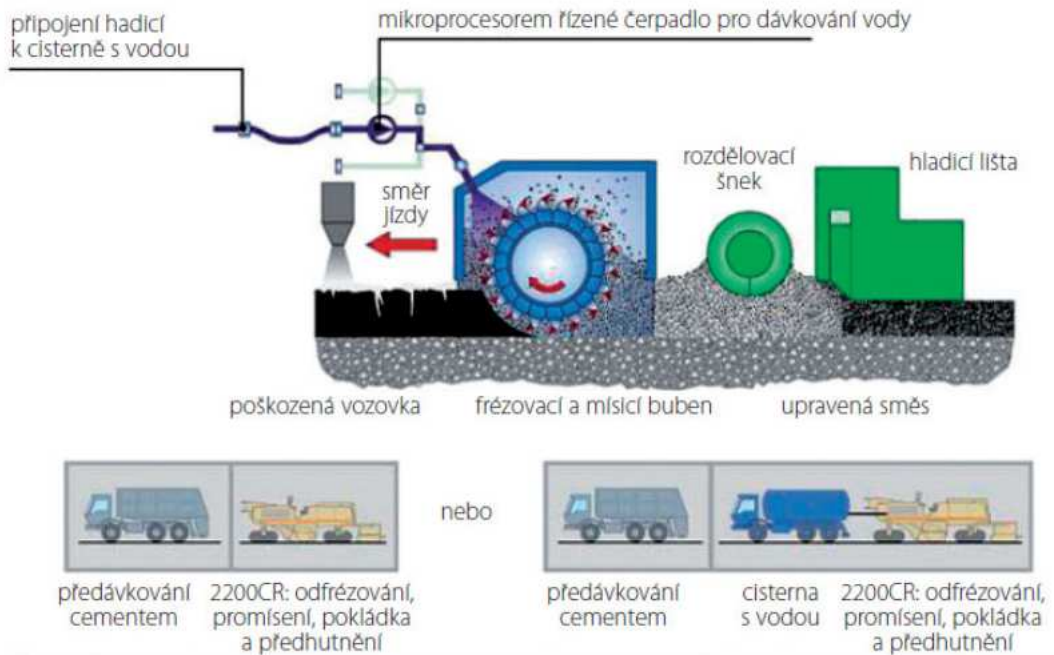
Obrázek 16 – Sestava strojů recyklačního vlaku s nasazením silniční frézy RX-900 [13]

Sestava strojů je závislá na použité technologii a na typu recyklační frézy, kterou má zhotovitel k dispozici. V současnosti existuje více druhů silničních fréz, které jsou odlišné jednotlivými strojními komponenty, které obsahují. Liší se pracovní šířkou jetí, přítomností nebo absencí rovnací lišty, druhem pásového nebo kolového podvozku. Každý typ frézy má své výhody a nevýhody a jejich použití záleží na zkušenostech zhotovitele a charakteru zájmové stavby.



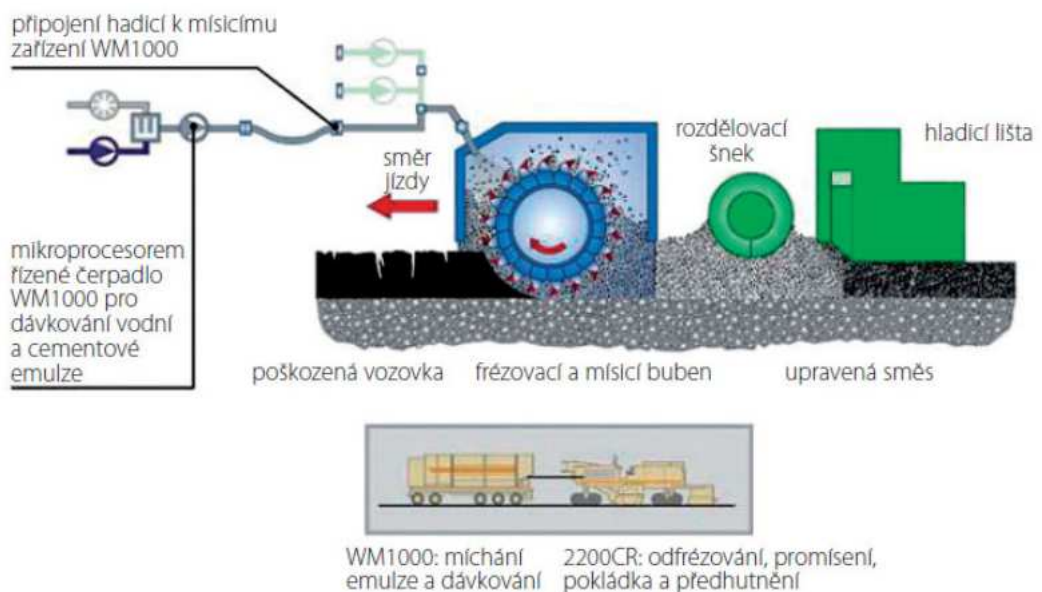
Obrázek 17 – Schéma vybavení recyklační frézy [14]

Varianta cementu dávkovaného před recyklérem, dávkování vody je realizováno pomocí cisterny na vodu nebo z nádrže na stroji recykléru 2200CR, které je vstříkováno do mísící komory pomocí vstříkovací lišty.



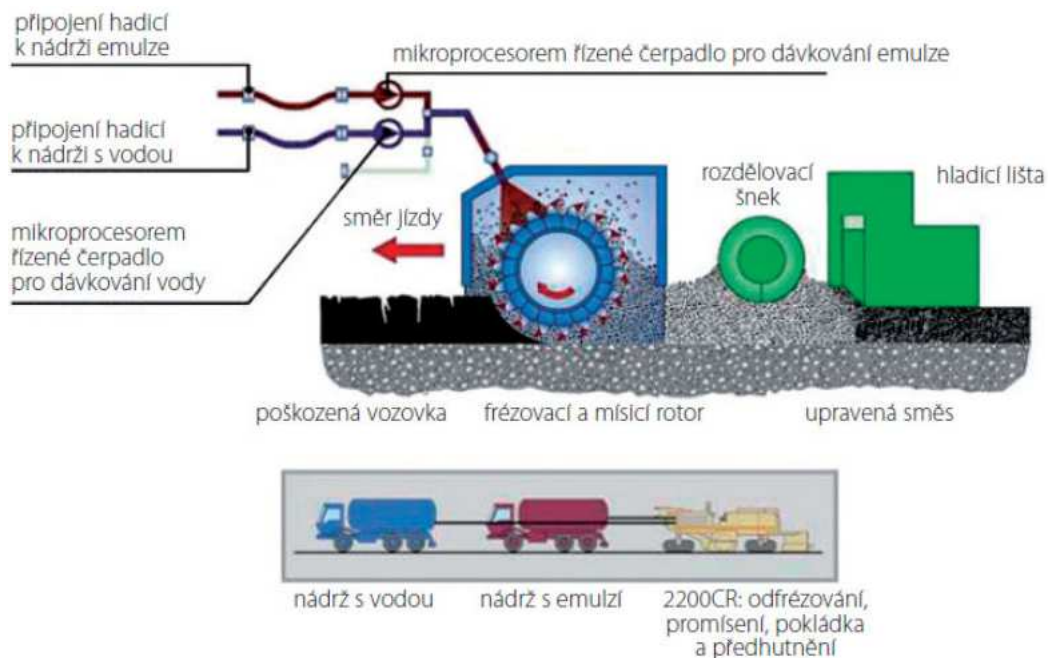
Obrázek 18 – Postup, kdy je do nové směsi dodáváno cementové pojivo [14]

Varianta mísení cementu a vody v mísícím stroji WM1000, kde je vyráběna nová směs, která je dávkována do mísící komory recykléru 2200CR.



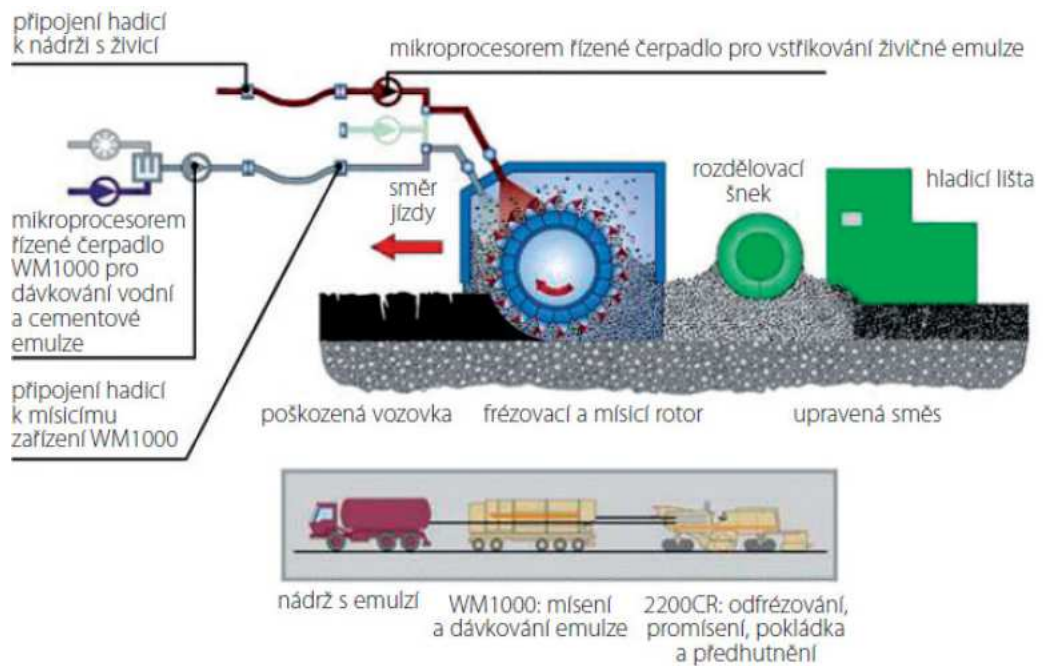
Obrázek 19 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána cementová suspenze [14]

Varianta dávkování a vstřikování asfaltové emulze prostřednictvím recykléru 2200CR, kdy je voda a emulze dopravována přes vstřikovací lištu do mísícího prostoru recykléru.



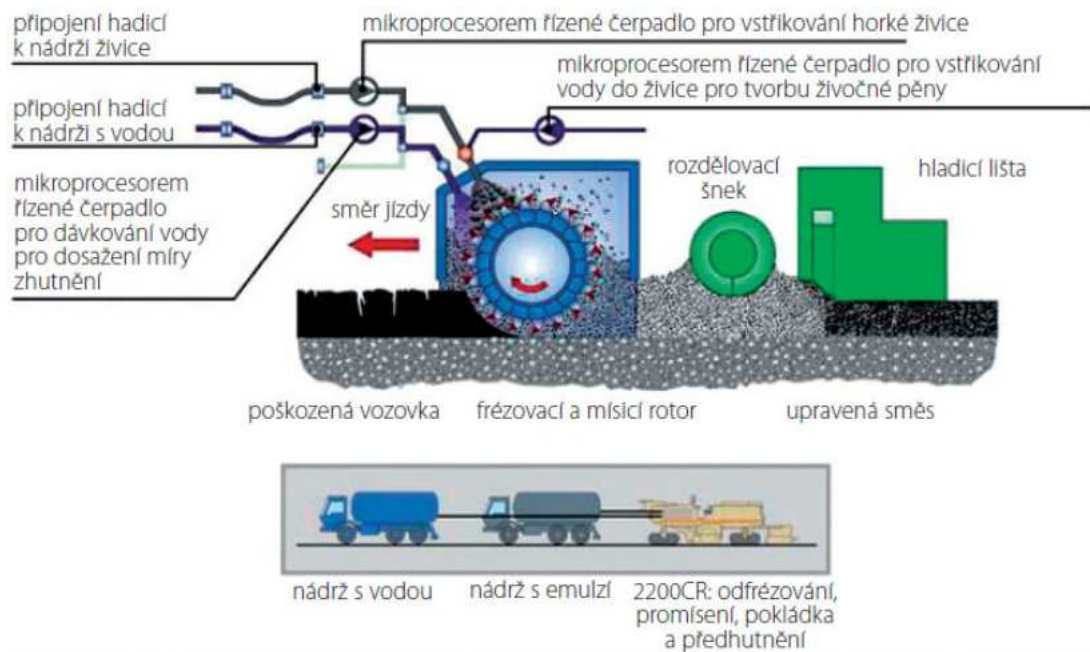
Obrázek 20 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána asfaltová emulze [14]

Varianta dávkování předem připravené cementové emulze pomocí dávkovacího stroje WM1000, které je následně dopravována k vstřikovací liště. Současně si zařízení recykléru samo řídí dávkování asfaltové emulze, které je z cisterny dopravováno do prostoru mísící komory.



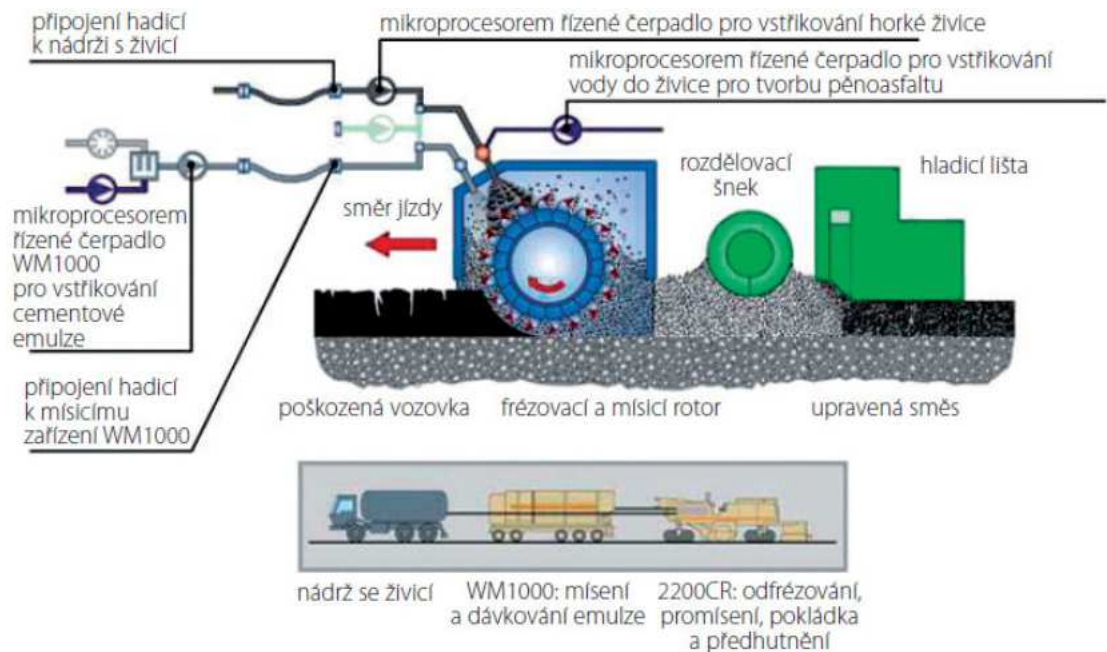
Obrázek 21 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána kombinace cementové a asfaltové emulze [14]

Varianta dávkování vody a horké živice od cisteren do mísicí komory recykléru. Kde je současně recyklérem řízen přívod vody pro tvorbu pěnoasfaltu. Tato voda je přiváděna z nádrže samotného recykléru.



Obrázek 22 – Postup, kdy do nové směsi je dodáván pěnoasfalt [14]

Varianta dávkování horké živice z cisterny, při současném dávkování cementové emulze z míchacího stroje WM1000. Přidávané komponenty jsou dopraveny do mísícího prostoru. Kde je zároveň při vstupu horké živice do mísící komory vstříkována voda z nádrže recykléru. Čímž dochází k tvorbě požadovaného pěnoasfaltu.



Obrázek 23 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána kombinace cementové emulze a pěnoasfaltu [14]

Výše uvedené varianty recyklace za studena na místě jsou závislé na druhu požadovaného pojiva, které vstupuje do nové směsi. Podle vstupního pojiva se odvíjí i uskupení strojního vlaku nutného k realizaci. Ovšem pokládkou nové recyklované vrstvy realizace nekončí. Součástí technologického postupu je i následné ošetřování nové vrstvy vozovky. Jako každý materiál obsahující hydraulické pojivo, je nezbytné recyklovanou vrstvu určitý čas ošetřovat vlhčením. Vlhčení je nutné provádět v letním období, zejména kdy teplota překročí hranici $+25^{\circ}\text{C}$ a také za větrného počasí. Opak silného větru je vydatný déšť, kdy se také nedovoluje provádět stavební práce tohoto charakteru. Posledním omezením je realizace v zimní části stavební sezóny. Stmelené vrstvy se nesmí provádět při teplotách nižších než $+5^{\circ}\text{C}$, materiál nesmí být zmrzlý a pokud teplota při ošetřování nově položené vrstvy klesne pod bod mrazu, je nezbytné zhodnotit aktuální stav vrstvy a případně provést její lokální opravy. [12]

Opak vlhčení je vysušení, které je potřeba, když při hutnění dochází k vytlačování vody na povrch vrstvy nebo po pojezdu válcem dochází k tvorbě kolejí. Tyto jevy mají za následek nadbytek vlhkosti vody ve směsi. V tomto případě se musí hutnění přerušit a pokračovat až po částečném vysušení vrstvy, ne však déle než do 24 hodin. Odstranění nadbytečné vlhkosti ze směsi je možné díky opakovanému promísení. Pokud nejsme schopni ani takto omezit zastoupení vlhkosti v nové recyklované vrstvě, je nutné provést její novou recyklaci. [12] Během letního období nastává také obrácený problém, kdy je potřeba doplňovat chybějící množství vody, které se provádí kropením povrchu vrstvy.

Jak už bylo výše zmíněno, jednotlivé technologie recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena se liší druhem použitého pojiva, které zajišťují požadované vlastnosti směsi. Dle platné legislativy využíváme tyto:

Cement nebo jiná hydraulická pojiva: mezi která spadají pomalu tuhnoucí pojiva nebo vápno. Díky zvyšujícímu zastoupení hydraulického pojiva ve směsi, dochází ke zvětšování pevnostních parametrů nové směsi. Se zvyšující pevností směsi dochází i ke zvětšenému nebezpečí vzniku trhlin. Proto je nutné laboratorně stanovit optimální množství dávkování hydraulického pojiva. V dnešní době se v závislosti na TDZ používá 3 % až 6 % zastoupení cementu v celkové hmotnosti směsi. Cement ve směsi zabezpečuje i zvýšenou odolnost proti mrazu a vodě, tudíž zvětšuje její využitelnost při zřizování podkladních vrstev vozovky. Dávkování cementu do směsi je provedeno buďto přímo nebo ve formě cementové suspense (cement+voda). Přidávaný cement musí splňovat požadavky ČSN EN 197-1, využívají se třídy pevnosti cementu 32,5 až 52,5 MPa dle přání investora. Většinou portlandský cement normálně nebo rychle tuhnoucí. [12]

Asfaltová emulze: používá se kationaktivná asfaltová emulze typu C60B7 nebo C65B7 s obsahem hmotnosti asfaltu 58 % až 63 %.

Zpěněný asfalt: jeho velkou předností je snadnější obalení jemnozrnného vlhkého materiálu. Vznik zpěněného asfaltu je zapříčiněn řízeným procesem dávkování malého množství vody do horkého asfaltu za zvýšeného tlaku. Proces probíhá speciálním postupem, kdy ke zhotovení a dávkování musí dojít současně při míchání směsi v míchacím centru nebo při recyklaci na místě.

Obvykle se pro výrobu zpeňeného asfaltu používají klasické třídy asfaltu 50/70, 70/100, 100/150 nebo 160/220. Avšak přítomnost modifikovaného asfaltu nebo některých přísad do asfaltu mohou významně omezit možnost asfaltu vytvářet zpeňený asfalt.

Kombinace výše uvedených pojiv: první kombinací je cement + vápno, kdy použití této kombinace snižuje riziko vzniku smršťovacích trhlin. Druhou kombinací je cement + asfaltové pojivo, kdy se volí hmotnostní poměr zastoupení těchto složek v celkové hmotnosti směsi okolo 4 % cementu a 2 %. Kombinací těchto složek docílíme požadovaných pevnostních parametrů a zároveň flexibilitu směsi. Asfaltová emulze musí splňovat požadovanou kompatibilitu vůči hydraulickému pojivu. Před začátkem tuhnutí cementu a následného hutnění nové směsi, musí bezpodmínečně dojít k vyštěpení asfaltové emulze. [12]

Další možností zlepšení vlastností směsi je přidáním vhodných přísad. Většinou se jedná o popílky, odprašky nebo prostředky pro regeneraci pojiva. Každá směs je jedinečná, její zastoupení jednotlivých složek záleží na jejím využití. Pokud ve směsi převažuje asfaltové pojivo, tak její využití je u stávajících materiálů s plynulou křivkou zrnitosti. Dále také u konstrukcí, kde je požadavek, aby byly netuhé. Zatímco dominantní zastoupení hydraulického pojiva ve směsi se používá v případech, kdy není možné zlepšit čáru zrnitosti R-materiálu. V případech, kdy očekáváme značné výkyvy v nehomogenitě vstupního materiálu a také tam, kde je nízká únosnost stávající vozovky.

Z environmentálního ohledu je recyklace za studena na místě velmi příznivou technologií, neboť její nároky na životní prostředí jsou zcela minimální. Současně je i naplňována strategie o bezodpadové společnosti vydaná evropskou unií, kdy odpad z konstrukčních vrstev vozovek získává status druhotného produktu a je opět zabudován do nových vrstev vozovek. Díky tomuto procesu nedochází k odvozu vybouraného materiálu stávajících konstrukčních vrstev a ukládání na skládky. Tím nedochází k nadměrnému zatěžování přírody a zároveň nejsou čerpány nové nerostné suroviny. S minimalizováním převozu stavebního materiálu je omezeno i zatížení životního prostředí výfukovými plyny. Pochopitelně při omezení dopravovaného objemu materiálu nejsou v takové míře zatěžovány okolní komunikace a poškození přilehlé silniční sítě je minimální. Nepřekonatelnou výhodou této technologie oproti konvenčním postupům je to, že recyklace za studena na místě dokáže eliminovat zastoupení dehtu v nové směsi na minimum.

Díky této skutečnosti není vybouraný materiál považován za nebezpečný odpad, tudíž nemusí být odvážen, ale naopak je po úpravě znovu zabudován do konstrukce vozovky.

Klady technologie recyklace na místě za studena:

- rychlá a kvalitní oprava komunikace
- až 100 % využití materiálu z vozovek
- zlepšení únosnosti konstrukčního systému
- homogenizace vrstvy v celé šíři
- vyloučení vzniku příčných trhlin
- finanční úspory
- výrazná časová úspora
- menší dopravní zatížení přilehlých komunikací
- menší zatížení životního prostředí

Z hlediska představy o časové náročnosti recyklace podkladních vrstev vozovky, pro názornost v šířce sedmi metrů a délce jednoho kilometrů. Je reálné zrecyklovat celou tuhle plochu při použití jedné strojní kolony za dvě pracovní směny. Pracovní směnou se rozumí osmihodinová pracovní doba, kdy se pracovní výkon recykléru pohybuje okolo 3500 m² až 5000 m² za den. [14] Z toho jasně vyplývá, že časová náročnost této technologie je mnohem menší oproti ostatním technologiím uvažovaným pro rekonstrukci pozemních komunikací. Díky časovému zkrácení realizace dochází k významné finanční úspoře, ale také k menší míře omezení provozu. Variantou provádění je i realizace za částečné uzavírky, kdy jsou práce realizovány po jednotlivých jízdách pruzích. Metoda recyklace vozovek za studena na místě se momentálně dostává do pozadí. Největší rozmach této technologie byl v letech 2000 až 2010. [14] Současnou situací upozadování recyklace za studena na místě ovlivňuje nejen nevypisování vhodných stavebních zakázek, ale i nedostatek informací z řad investorů a správců silničních sítí. Vliv má také ekonomické hledisko, kdy investor prosazuje technologie a postupy na první pohled levnější, ale z hlediska kvality a životnosti konstrukce vozovky nedostačující. Tento trend můžeme vidět hlavně v období voleb, kdy jde o estetické splnění slibu voličům. Z hlediska dnešní kvality a dostupnosti technologie recyklací za studena, kde většina procesů je zmechanizována. Mi přijde hloupé, že plýtváme nerostnými surovinami, které jsou vyčerpitelné (kámen, ropa, asfalt), než abychom prioritně přemýšleli o variantě druhotného využití materiálu, který se na stavbě nachází a při zabudování splňoval celou řadu pevnostních parametrů.

1.7.2 Recyklace asfaltových směsí v míchacím centru za studena

Jedná se o technologii opětovného zpracování R-materiálu, který je po odfrézování nebo vybourání odvezen do míchacího centra (stacionární, semimobilní, tak i mobilní), kde je deponován nebo okamžitě zpracován. Proběhne jeho drcení na požadovanou zrnitost. Následně se přidá požadované pojivo (cement, asfaltová emulze, zpěněný asfalt) a upraví se čára zrnitosti. Všechny komponenty směsi se dopraví do míchačky, kde je směs pečlivě promíchána. Po ukončení výrobního procesu je směs připravena k distribuci a dopravení zpátky na stavbu, kde je zhotovena recyklovaná vrstva vozovky. Pokládka probíhá za pomoci finišeru. Položená směs je zhutněna pomocí silničních tandemových válců a následně nastává zrání vrstvy, které je ovlivněno vlhkostí vzduchu, množstvím vody ve směsi a mezerovitostí směsi. Po vyzrání vrstvy je možné provést nátěr nebo pokládku běžné asfaltové směsi.

Recyklací za studena v míchacích centrech je možné vytvořit novou asfaltovou nebo cementovou směs. Vše záleží na typu vyfrézovaného materiálu z dotčené staré vozovky. Druhy základních směsí dle vybouraného materiálu, který je uvedený v závorce:

- **Směsi stmelené asfaltovým pojivem** (asfaltový beton, asfaltový koberec, obalované kamenivo, obalovaný šterkopísek)
- **Směsi stmelené hydraulickým pojivem** (stabilizace cementem, kamenivo zpevněné cementem, podkladní beton ...)
- **Nestmelené kamenivo** (šterk, šterkodř ...)
- **Částečně stmelené kamenivo** (penetrační makadam s použitím dehtového nebo asfaltového pojiva, vsypný makadam)
- **Kombinovaná stavební směs**, kde se nachází kombinace materiálů získaných ze stmelených vrstev asfaltem nebo hydraulickým pojivem, ale i z materiálů nestmelených směsí.

Výše uvedené základní směsi lze v míchacích centrech zpracovat za pomoci přidání pojiv. Jedná se například o asfaltové emulze nebo zpěněný asfalt. Tyto přísady jsou vhodné tam, kde byly směsi kameniva stmeleny dehtem.

Přidáním pojiv na bázi asfaltu je možné obalit zrna původní asfaltové směsi. Tyto směsi nacházejí uplatnění ve zhotovení podkladních vrstev u méně zatížených vozovek. Další variantou jsou hydraulická pojiva, ať už se jedná o cement, vápno nebo pomalu tuhnoucí pojivo. U použití těchto pojiv je nutné upravit i původní asfaltovou směs z hlediska doplnění křivky zrnitosti a dalších vlastností. K doplnění se používá písek, drť, ale i samotná voda. Díky přidání hydraulického pojiva ke zpracování původní směsi, dochází pro promíchání k tvorbě směsi vhodné do stmelených podkladních vrstev vozovky. Pevností parametry nové směsi jsou závislé na obsahu přidaného hydraulického pojiva. S narůstajícím obsahem pojiva, narůstají i pevnostní parametry dané směsi, ale současně vzniká nebezpečí větší tvorby trhlin. Ideální množství přidaného pojiva se pohybuje okolo 3 % až 5 % celkové hmotnosti směsi. Poslední skupinou přidávaných pojiv jsou asfaltové emulze nebo kombinace zpěněného asfaltu a cementu. U kterých je nutné, aby k vyštěpení asfaltové emulze došlo před začátkem tuhnutí cementu a před hutněním základní směsi. Využití této technologie u návrhu kompozitní stabilizace cementem se příznivě projeví při ochraně vozovky, kdy jsou omezeny nepříznivé účinky promrzání podloží. Dojde k redukci množství mrazových trhlin a zároveň je zamezeno jejich překopírování do krytových vrstev vozovky.



Obrázek 24 – Mobilní Obalovna ABM 240 – 320 BLACKMOVE [10]

1.8 Shrnutí současného stavu

Momentální přístup v České republice je takový, že vše, co je na stavbě vytěženo nebo vybouráno a následně odvezeno na deponii nebo skládku mimo staveniště. Je považováno za odpad. S tím je dle zákona spojena povinnost ohledně nakládání s odpadem, kde zhotoviteli vznikají další náklady na potřebnou administrativní činnost. Druhotný materiál klasifikovaný jako odpad je pak velmi náročné až nemožné znovu zabudovat do konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Díky těmto souvislostem dochází k hromadění asfaltového recyklátu na skládkách, což poukázalo na nezbytnou potřebu, umožnění výraznějšího zpětného využití tohoto druhotného materiálu při výrobě nových směsí. Musíme si uvědomit, že R-materiál je cenná surovina, kterou je třeba využít v maximální možné míře. Z těchto skutečností jasně vyplývá, že Česká republika postrádá legislativu, která by se podrobně zabývala klasifikací a opětovným využitím asfaltového recyklátu.

Recyklace za studena má celou řadu výhod, která jsou v mé práci omývání neustále dokola, ale musíme si uvědomit, že jen kvůli ekologii to nikdo dělat nebude a ani nemůže. Tato moderní metoda musí mít i značkou ekonomickou výhodnost a pokud budou existovat překážky bránící recyklaci vozovek ve formě nesmyslně přísné legislativy, tak bude rapidně snížena ekonomická efektivnost a tím pádem i atraktivnost pro zhotovitelské firmy. Z mého pohledu je největším problémem nedostatečné vzdělání a neinformovanost zastupitelů investora danou problematikou. Mezi další paradox určitě patří fakt, že největší překážky bránící recyklaci způsobují ochránci životního prostředí i přesto, že samotná recyklaci významně přispívá k ochraně životního prostředí. Možná to přeženu, ale už jsem se setkal i s názorem, že kolonie žab má větší cenu, než zdravý a život člověka.

Použití recyklovaného kameniva je věcí zhotovitele, nikoli projektanta. Ale navržený projekt by měl umožnit záměnu přírodního materiálu za druhotný materiál, samozřejmě pokud prokáže požadované parametry. Často nastává situace, že investor nechce povolit navrhovanou záměnu v podkladních vrstvách jen z důvodu, že to není uvedeno v projektu. Pochopitelně se recyklované kamenivo nemůže rovnat s přírodním kamenem v těch nejpřísnějších požadavcích, ale musíme si uvědomit, že jejich splnění není nutné všude. Proto si myslím, že využití recyklovaného kameniva do podkladních vrstev vozovek je ideální varianta pro jeho opětovné využití. Dále je nezbytné razantně odmítnout názor, že recyklace rovná se automaticky nižší kvalita díla.

Pokud recyklovaný materiál splní požadavky příslušných norem, stává se stejně hodnotným jako běžný materiál a jeho využití není na úkor kvality.

V každé evropské normě pro kamenivo se uvádí, že norma určuje vlastnosti kameniva, které je získáno zpracováním přírodního, umělého nebo recyklovaného kameniva. Z toho jasně vyplývá, že recyklované kamenivo může být plnohodnotným kamenivem, pokud splní normou předepsané hodnoty. Tyto neoprávněné pochyby o kvalitě bych chtěl vyvrátit ve své experimentální části diplomové práce, popsat výhody a nevýhody využití asfaltového recyklátu při výrobě stmelěných směsí. Najít takovou recepturu, která by měla požadované vlastnosti jako běžně vyráběné směsi a zároveň by obsahovala co největší zastoupení asfaltového recyklátu a její výroba by byla ekonomicky atraktivní.

2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavní cíl mé práce je prokázat, že asfaltový recyklát je možná náhrada za klasické materiály, které se v současnosti používají při výrobě stmelěných směsí. Zaměřit experimentální část na stmelěné směsi, které mohou být vyrobeny recyklací za studena. Informovat veřejnost o možnosti využití druhotných materiálů. Zhodnotit ekonomické hledisko, technologické, časové a vliv na životní prostředí. K tomuto vyhodnocení použít vlastní ukazatel, ve kterém budou tyto jednotlivé atributy zahrnuty. Výstupem práce by měla být směs, která má požadované pevnostní parametry dle platných předpisů. A je srovnatelnou náhradou za běžně vyráběné směsi.

V mé experimentální části diplomové práce se zaměřím především na:

- maximální využití R-materiálu do stmelěné směsi
- využití hydraulického pojiva o dvou třídách pevnosti a jeho vlivu na pevnost
v závislosti na samotném dávkování
- navrhnout takové směsi, které budou splňovat legislativní požadavky třídy pevnosti
C_{3/4} a C_{8/10}
- aplikovat v praxi získané poznatky u konkrétního stavebního díla
- zhodnotit výhody a nevýhody pokládky stmelěných směsí technologií recyklace
za studena na místě

3 PŘÍPRAVA A VYPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU

Samotný experiment bude spočívat ve využití R-materiálu při výrobě stmelových směsí, které by se v praxi daly realizovat za pomoci studené recyklace. Nejprve bude odebrán samotný R-materiál z obalovny Herink, kde je na deponiích uložen a připraven pro další zpracování. Původ tohoto R-materiálu je především dálniční síť v okolí hlavního města Prahy a komunikace I. třídy. Tento vstupní materiál bude podroben obecným požadavkům na vlastnosti recyklovaného kameniva pro stmelovou směs.

S tímto materiálem není prozatím moc zkušeností, tak bylo předběžně zvažováno cílit na požadované pevnostní třídy pro horní stmelené podkladní vrstvy dle ČSN 73 6124-1.

Horní vrstvy C_{3/4}, C_{5/6}, C_{8/10}

Dolní vrstvy C_{1,5/2}, C_{3/4}

Zkušenosti z dané oblasti výzkumu, z kterých jsem vycházel, byly od společnosti VIALAB CZ s.r.o., která se danou problematikou zabývá již necelé tři roky. Experiment byl ovlivněn lokálními zdroji a možnými technologiemi výroby, které jsou v současnosti k dispozici.

3.1 Použité vstupy, výroba směsi a hledané receptury

Mezi vstupy budou použity lokální materiály, které jsou levné a běžně k dispozici. Současně bude snaha o využití co největšího množství R-materiálu, který se nahromadil a jeho další využití je značně omezené. Posoudit jeho výhody, či nevýhody. Dále bude v mém zájmu využití cementu o různých třídách pevnosti a jeho dávkování na celkovou pevnost.

Předpoklad návrhu stmelené směsi:

- maximální využití asfaltového recyklátu
- použití nejrozšířenějších komponentů tak, aby je bylo co nejjednodušší použít v praxi
- zaměřit se na lokální dostupnost materiálů a ekonomickou výhodnost
- splnit požadavky aktuální legislativy

3.1.1 R-materiál

R-materiál je asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením asfaltových ker, případně vyzískaná z neshodné nebo nadbytečné výroby asfaltové směsi. Jedná se o takový materiál, který se skládá z více jak 95 % zastoupení asfaltového materiálu a zbývajících 5 % hmotnosti tvoří ostatní recyklované materiály, jako jsou betonové výrobky, cihelné výrobky, jiné částice a nečistoty. R-materiál je klasifikován dle ČSN EN 13 108-8 a je označen jako stavebně demoliční odpad, proto je nezbytné dle TP 210 sledovat obsah ostatních materiálů, aby nedocházelo k zabudování škodlivých složek do nových stavebních objektů. Opětovné využití R-materiálu se rozlišuje dle dvou přístupů. Prvním přístupem je využití takového materiálu, který je na stavbě vybourán, následně je uložen na mezideponii a opět zabudován do konstrukčních vrstev vozovky té samé stavby. Druhým přístupem je odvoz vybouraného materiálu, ten je přetříděn a uložen dle předpisů. Takto uložený materiál je připraven k opětovnému využití. [15]



Obrázek 25 – R-materiál volně ložený netříděný ve srovnání s tříděným R-materiálem [1]

3.1.2 Fluidní popílek

Jedná se o vedlejší energetický produkt, který vzniká v tepelných elektrárnách během procesu spalování uhlí. Tento jev a následné skladování popílku má negativní dopad na kvalitu ovzduší, zemědělské půdy, podpovrchovým, ale i povrchových vod. Během procesu konvenčního spalování vzniká popílek, který je definován jako odpadní materiál. Fluidní popílek je naopak produktem fluidního spalování, které je považováno za šetrnější variantu z hlediska životního prostředí. Uplatnění popílku je především v betonových výrobcích, kde zvyšuje nejen pevnost v tlaku, ale také odolnost proti průsaku tlakové vody a zlepšuje kvalitu povrchů.

Při zpracování fluidního popílku musíme dbát na jeho chemické vlastnosti, které mohou způsobovat větší bobtnání a pevnostní ztráty směsi, proto je nutné při jeho dávkování vycházet ze zkušeností, které jsou v dnešní době k dispozici. Samotný fluidní popílek obsahuje také větší množství síranu a volného vápna, než bývá stanoveno za přípustnou hodnotu v popílcích. Drtivé využití odpadního materiálu, vzniklého při spalování tepelných elektráren je jako pucolánová přísada do Portlanského cementu nebo k rekultivaci krajiny.

3.1.3 Cement

Jedná se o hydraulické pojivo, které je v současnosti ve stavebnictví nejvíce využívané. Lze jej charakterizovat jako jemně mletou anorganickou látku, která po smíchání s vodou vytváří kašovitou konzistenci. Vlivem hydratačních procesů dochází k tunutí a následnému zatvrdnutí hmoty, která vykazuje určitou pevnost a stálost nejen na vzduchu, ale i ve vodě. Mezi další hydraulická pojiva patří například hydraulické vápno, vysokopecní struska, popílek nebo silniční hydraulická pojiva, ovšem tyto pojiva nemají tak dobré vlastnosti jako cement, to však nebrání k jejich využití do stmelených směsí. Mezi jejich hlavní přednost patří nižší pořizovací cena nebo jejich specifické vlastnosti, které jsou pro dané využití žádoucí. Jedná se o omezení smršťování, urychlení nebo naopak zpomalení tvrdnutí směsi, ale také i zamezení vzniku reflexních trhlin. Obsah přidávaného pojiva do směsí stmelených hydraulickými pojivy se stanovuje na základě praktických zkušeností nebo je odvozen na základě postupu návrhu jednotlivé směsi, kdy dle velikosti zrn přidávaného kameniva lze stanovit minimální obsah pojiva. Ten se pohybuje v rozmezí od 3 % do 5 %. [8]

Mezi suroviny nezbytné k výrobě cementu patří vápenec, vápenaté jíly, slínovce a křemičité písky. U těchto surovin dojde nejprve k drcení, mletí a celkové homogenizaci, následně pak k vypálení při teplotě okolo 1450 °C, kde dochází ke vzniku takzvaného meziprojektu slínku. Slínková zrna mají většinou kulovitý tvar o průměru několika milimetrů až po 3 cm. Tato vychladnutá slínková zrna se v posledním kroku smíchají s přísadami a příměsí a dojde k jejich společnému rozemletí, pak dochází ke vzniku výsledného produktu – cementu.

Existuje celá řada cementů, které se liší dle vstupních surovin, příměsí, přísad, chemických látek a mineralogického složení. Na základě příměsí, které cement obsahuje, ho lze rozdělit do následujících skupin:

- CEM I – Portlandský cement, který se vyznačuje vysokým obsahem portlandského slínku (90 % až 100 %). Tento cement má vysoký počáteční nárůst pevnosti a celkovou pevnost.
- CEM II – Portlandský cement směsný má také rychlý počáteční nárůst pevnosti, navíc je odolný vůči agresivnímu prostředí.
Dle druhu příměsí rozeznáváme tyto cementy:
 - Portlandský struskový cement
 - Portlandský cement s křemičitým úletem
 - Portlandský pucolánový cement
 - Portlandský popílkový cement
 - Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí
 - Portlandský cement s vápencem
 - Portlandský směsný cement
- CEM III – Vysokopeční cement, který se vyznačuje pozvolným nárůstem počáteční pevnosti a také odolností proti agresivnímu prostředí.
- CEM IV – Pucolánový cement
- CEM V – Směsný cement

Cementy se dále dělí dle jejich normalizované pevnosti, která jednoznačně definuje jejich mechanické vlastnosti. V dnešní době se používá rozdělení dle tří tříd normalizované pevnosti a to: 32,5; 42,5 a 52,5 uváděné v MPa. Pro další specifikaci se používá označení pomocí písmen R nebo N, kdy R značí vlastnost vysoké počáteční pevnosti, zatímco N označuje normální počáteční pevnost. [8] V experimentu mé práce bude určitě použit cement CEM II 32,5 R, kde se jedná o označení Portlandského cementu směšného, s třídou normalizované pevnosti 32,5 MPa a s vlastností vysoké počáteční pevnosti.

3.1.4 Přírodní drcené kamenivo

Do směsí stmelných hydraulickými pojivy lze přidat kamenivo různých frakcí a druhů. V drtivé většině se do podkladních vrstev používá těžené kamenivo, neboť smyková pevnost vrstvy je zajištěna převážně díky použitému pojivu. Pro návrh těchto směsí platí také nižší požadavky na zrnitost a na velikost maximálního zrna D_{max} . Nesmírně důležitý je obsah drobného kameniva, který přímo ovlivňuje působení pojiva a zpracovatelnost dané směsi. V současné době se do směsí používá kamenivo frakce 0/22, 0/32, případně vhodná alternativa z místního materiálu, což bude zkoumáno i v mém experimentu. Přidávané kamenivo musí splňovat normu ČSN EN 13 242, která doporučuje jednotlivé obory zrnitosti kameniva dle předepsaných křivek zrnitosti. Samotné kamenivo nesmí obsahovat škodlivé jemné částice v takovém množství, které by negativně ovlivňovaly tvrdnutí, pevnost nebo trvanlivost směsí. Vhodnost výběru použití daného kameniva do směsí stmelných hydraulickými pojivy je závislá na dopravním zatížení a způsobu funkce, kterou stmelená vrstva musí vykonávat. Norma také stanovuje, že by kamenivo mělo být objemově stálé.[31]

3.1.5 Voda

Dalším vstupním materiálem, který je zcela nezbytný pro zpracování směsi, je voda. Bez vody by se nová směs nedala zhutnit a také by nebylo docíleno k požadovaným chemickým reakcím. Příměsová voda nesmí obsahovat takové složky, které by negativně ovlivňovaly chování a tvrdnutí směsí stmelných hydraulickými pojivy a tím by docházelo ke znehodnocení parametrů finální směsi. [31]

3.1.6 Výroba směsi a hledané receptury

Mým záměrem bylo vytvořit takovou recepturu směsi, která bude obsahovat většinovou část z R-materiálu, doplněnou o další přísady a příměsi. Zároveň bude možnou náhradou za běžně používané receptury. Z tohoto důvodu jsem vycházel z poznatků, které společnost VIALAB CZ s.r.o. nasbírala během svého tříletého výzkumu a tím pádem jsem měl povědomí o určitých nevýhodách výroby směsi s kostrou z R-materiálu. Obecně samotný R-materiál nesplňuje požadavky na požadovanou zrnitost, problém je v nedostatku obsahu jemných částic v uvažovaném materiálu. Z tohoto důvodu se experimentovalo s materiály, které by doplnily jemnou část křivky zrnitosti. Jako první materiál byl zkoumán písek frakce 0/2 mm z Otradovic. Nicméně byl po stanovení zrnitosti vyloučen, neboť obsahoval jen 1,24 % jemných částic a problém s doplněním požadované křivky zrnitosti nijak neřešil. Jako druhý byl podroben zkoumání popílek z elektrárny Opatovice.

Z kterého byla navržena směs R-materiálu a popílku, která svou zrnitostí splňovala požadavky příslušné legislativy. Zkoumané směsi budou vyráběny, zkoumány a posuzovány dle TP 208, která stanovuje požadavky na fyzikálně mechanické vlastnosti.

V mé práci budou hledány takové receptury, v kterých bude využito, co největší zastoupení R-materiálu. Předpokládané zastoupení se pohybuje mezi 80 % a 90 % suché směsi. Záměr bude vytvořit recepturu na směs pevnostní třídy $SC_{3/4}$ a $SC_{8/10}$, která bude stmelená cementem, neboť je uvažováno, že nalezená receptura bude realizována technologií za studena na místě. Cementu budou využity dvě pevnostní třídy, kdy pro třídu $SC_{3/4}$ je zvolen 32,5 R, protože cement o nižší pevnosti se nevyrábí certifikovanými výrobky a pro třídu $SC_{8/10}$ cement 42,5 R. Cement bude použit z toho důvodu, že při případné recyklaci na místě je jeho doprava na místo a dávkování poměrně jednoduché. Samotný R-materiál bude odebrán z deponie Herink, kde je uložen na mezideponii. Budou zkoumány dva vzorky, jeden zcela čistý R-materiál a druhý s příměsí podkladní SC, který vzniká při 3D frézování vozovky. Tento materiál vzniká při posledním jetí frézy, která bere podkladní asfaltovou vrstvu a zároveň dle nahraného projektu v softwaru frézy, rovná budoucí niveletu vozovky.

V rámci experimentu budou zkoumány tyto směsi:

- Receptura č.1. bude cílit na třídu pevnosti $C_{3/4}$. Složení bude z 90 % R-materiálu, 10 % popílku a 6 % cementu 32,5 R.
- Receptura č. 2. bude cílit na vyšší pevnostní třídu $C_{8/10}$, proto bude použit cement vyšší pevnosti o vyšším množství, a to 8% 42,5 R, dále směs bude obsahovat také 90 % R-materiálu a 10 % popílku.
- Receptura č. 3. bude alternativou k receptuře č. 2, protože není jasné, zda bude směs disponovat požadovanými vlastnostmi. Její složení bude 80 % R-materiálu, 10 % popílku, 10 % drobného přírodního kameniva frakce 0/4 mm a také 8 % cementu 42,5 R.

Dle zjištěných výsledků laboratorního měření, může nastat situace, že navrhované receptury směsí budou ještě dále upravovány, aby se našla ideální receptura.

Hlavní záměr experimentu je najít takovou recepturu, kde bude kostra směsi tvořena R-materiálem, v co největším množství. Budou využity lokální materiály, které jsou na trhu běžně dostupné a návrh této směsi bude ekonomicky výhodný. Zároveň bude možné tuto recepturu zhotovit studenou recyklací na místě dle TP 208.

Vlastnost		Požadavky pro směsi s použitím pojiva		
		cement nebo jiné hydr. Pojivo	cement + asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt	asfaltová emulzenebo zpěněný asfalt
Označení směsi	recyklace na místě	0/32; 0/45		0/32
	recyklace v centru	0/16; 0/22; 0/32; 0/45		0/16; 0/22; 0/32
Požadavky na zrnitost směsi ^{1) 2)}		viz. tab. A.1		viz. tab. A.2
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost		deklarovaná hodnota		
Vlhkost ³⁾		-3% až +2%		
Min. pevnost v tlaku Rc po 28 dnech ⁴⁾ Odolnost proti mrazu a vodě		$C_{3/4}$ 85 % Pevnost Rc	-	-
Min. pevnost v příčném tahu Rit ⁵⁾ po 7dnech		0,30 až 0,70 MPa	0,30 až 0,70 MPa	0,30 MPa
Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě)		75 % pevnosti Rit	75 % pevnosti Rit	60 % pevnosti Rit
Mezerovitost		-	-	6% až 14 %
¹⁾ Doporučené požadavky pro směs kameniva před přidáním pojiva. ²⁾ U složky R-materiálu se uvažuje kusová zrnitost. ³⁾ Doporučené max. odchylky od deklarované hodnoty. ⁴⁾ Zkouší se jako směs stmelená cementem podle ČSN EN 14227-1, další zkouška pevnosti v příčném tahu (Rit) a odolnosti proti vodě se pak neprovádí. Je možno navrhovat směsi i vyšších tříd pevnosti. ⁵⁾ Pro TDZ IV, V a VI a směsi odpovídající třídě pevnosti C3/4 podle ČSN EN 14227-1 je možno nahradit zkoušku pevnosti v tlaku (Rc) a odolnosti proti mrazu a vodě.				

Tabulka 15 – Požadavky na recyklované stmelené směsi [12]

Velikost síta (mm)	Propad zrn v % hmotnosti
63	90 - 100
45	70 - 100
31,5	53 - 100
16	33 - 100
8	20 - 76
2	7 - 54
0,063	0 - 15 ¹⁾
¹⁾ Při použití asfaltové pěny 5 - 15	

Tabulka 16 – A.1.- Doporučené požadavky zrnitosti směsí [12]

3.2 Požadované zkušební metody

Jedná se o laboratorní zkoušky, které budou přesně definovat jednotlivé parametry zkoušených materiálů. Tyto naměřená data budou následně použita k porovnání s hodnotami nezbytnými dle platné legislativy a určení dalšího směru experimentu. Dílčí zkoušky budou realizovány v centrální laboratoři společnosti VIALAB CZ s.r.o. a bude použito jejich laboratorní vybavení.

Článek normy 73 6124-1	Vlastnost	Požadavek pro třídy pevnosti				Četnost zkoušek
		C _{1,5/2}	C _{3/4}	C _{5/6}	C _{8/10 a vyšší}	
6.2.2	Zrnitost vstupních materiálů ^a Obsah jemných částic ^a	Tabulka č. 3 ČSN 73 6124-1		Tabulka č. 4 a 5 ČSN 73 6124-1		1000 m ³ min. 1 x týdně
6.2.3	Laboratorní srovnání objemové hmotnosti	Objemová hmotnost zkušební tělesa použitého při zkoušce pevnosti v tlaku podle 6.2.6 tabulky 6				1 x denně
6.2.3	Vlhkost	Povolené odchylky vlhkosti směsi od deklarované hodnoty: - 2 % až + 2 %				2 x denně
6.2.6 tabulka 6	Minimální pevnost v tlaku Rc nebo v příčném tahu Rit (Mpa)	Pevnost v tlaku pro předepsanou třídu, respektive 85 % hodnoty pevnosti v příčném tahu, zjištěné při průkazní zkoušce				1 x denně
6.2.7	Odolnost proti mrazu a vodě	Maximální snížení o 15 % vůči výsledku kontrolní zkoušky pevnosti v tlaku ze stejného odběru směsi		Bez požadavku		1 x týdně
B.2.1	Konzistence popílkové suspenze podle přílohy B	160 mm až 220 mm				1 x denně
7.4	Doba zpracovatelnosti (pokud se požaduje)	Deklarovaná hodnota				1 x za 30 dní výroby

Tabulka 17 – Kontrolní zkoušky směsí stmelených hydraulickými pojivy [32]

Maximální doba od okamžiku vyrobení čerstvé směsi po zhotovení zkušební tělesa je dle TP 208 stanovena na 1 hodinu. Pokud by tento požadavek nemohl být v praxi splněn, je nezbytné, zhotovit zkušební tělesa přímo na místě odběru. U stmelených směsí cementem se kontroluje vlhkost, pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě nebo pevnost v příčném tahu a odolnost proti. V mé experimentální části budou navržené směsi zkoušeny na pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech. Následně na odolnost proti mrazu a vodě po 28 dnech + 13 cyklech mrazů dle stanovených požadavků v ČSN 73 6124-1.

Postup laboratorního ověření se skládá z těchto jednotlivých kroků:

- 1) Stanovení kusové zrnitosti, kde kusovou zrnitost je možné případně upravovat přidáním dalšího vhodného materiálu.
- 2) Stanovení suché laboratorní objemové hmotnosti a optimální vlhkosti směsi. Obecně směsi obsahující rozpojenou asfaltovou vrstvu a vesměs hrubé kamenivo jsou málo citlivé z hlediska vlhkosti a stanovení jejího optima při hutnění. V praxi se můžeme setkat i s přístupem, kdy se optimální vlhkost směsi odhaduje hnětením v ruce, kdy se posuzuje soudržnost a zpracovatelnost. Suchá laboratorní srovnávací objemová hmotnost se stanovuje zkouškou Proctor-modifikovaný při stanovením optimální vlhkost na jediném zkušebním vzorku.
- 3) Výroba zkušebních těles pro stanovení pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě. Pro jednu směs je v mém případě nutné zhotovit sadu min. 9 zkušebních těles, která budou následně podrobena požadovaným zkouškám. Výsledná pevnost směsi je stanovena na základě průměru ze tří zkušebních těles, pokud se ovšem jedna hodnota odchýlí o více než 20 % od průměru hodnot všech zkoušených těles, je nutné tuto hodnotu vyloučit a průměr vypočítat ze dvou zbývajících hodnot. [12]

3.2.1 Zkušební metody vstupních materiálů

Zkouška zrnitosti

Zrnitost kameniva je stanovena pomocí normy ČSN EN 933-1, doplněného o změnu A1. Norma ke stanovení zrnitosti využívá sadu zkušebních sít, která jsou sestupně seřazena dle velikosti otvorů jednotlivých sít a slouží nám z roztrídění zkoušeného kameniva do jednotlivých frakcí. Síta jsou na sebe naskládána od nejhrubšího horního síta až po spodní nejjemnější síto a uzavřena dnem a víkem. Velikost jednotlivých otvorů a počet použitých sít je závislý na požadované přesnosti rozboru.

Postup provádění zkoušky zrnitosti je následující. Nejprve musí být odebráno suché kamenivo, aby se mezi jednotlivými zrny netvořily slepence, které by zkreslovaly výsledky na jednotlivých sítích. Samotná navážka je stanovena na základě normy, která nám přesně předepisuje minimální množství, které je nezbytné k provedení rozboru. Připravené kamenivo je nasypano do horní soustavy, následně je celá soustava uzavřena poklopem a v závislosti na druhu stroje se s ní začne ručně nebo mechanicky třást.

Pro důkladném prosetí jsou odebírána jednotlivá síta a včetně dna, která jsou následně ještě ručně prosévána tak, aby materiál, co propadne, byl přidán do následujícího síta. Minimální hmotnost kameniva pro provedení síťového rozboru je stanoven dle maximálního zrna, který se ve zkušební navážce vyskytuje. Po prosetí se zaznamenává hmotnost zůstatku na jednotlivém síti, která je následně převedena výpočtem na procentuální hodnotu zůstatku z původní hmotnosti navážky. Odečtem procenta zůstatku od 100 % získáme procento propadu u síta s největšími otvory. Takto identicky postupujeme u každého síta, kdy odečítáme procento zůstatku od procenta propadu na předchozím síti. Pro grafické zaznamenání naměřených dat nám slouží křivka zrnitosti, která nám vyobrazuje závislost procenta propadu na velikosti síta a tvoří tak graf, který slouží pro zařídění prosévaného materiálu.



Obrázek 26 – Sušárna Memmert [1]

Může nastat situace, že zkoušené kamenivo je znečištěno například jíly nebo hlínou. Pak samotnému síťovému rozboru předchází praní kameniva. Při praní dochází k důkladnému promíchání s vodou, kdy dojde k oddělení jemných částic, následně je kamenivo uloženo na síto 0,063 mm a promýváno vodou tak dlouho, dokud voda odtékající z horního síta není zcela čirá. [4]

Norma 73 6124-1 stanovuje požadavky na zrnitost kameniva, které může být použito pro výrobu směsí o požadovaných pevnostech s tou poznámkou, že minimální hodnoty propadu na sítích 0,063; 0,125 a 0,250 podle přiložených tabulek, nejsou závazné. Pouze se jedná o doporučené hodnoty. [32]

Velikost sítá (mm)	Propad zrn v % hmotnosti	
	Minimum	Maximum
45	100	100
31,5	80	100
16	40	100
8	28	100
4	20	100
2	15	100
1	11	88
0,5	8	75
0,25	5	60
0,125	2	40
0,063	0	15

Tabulka 18 – Zrnitost kameniva pro třídu pevnosti C_{1,5/2} a C_{3/4} [32]

Velikost sítá (mm)	Propad zrn v % hmotnosti	
	Minimum	Maximum
45	100	100
31,5	85	100
16	60	90
8	40	73
4	27	61
2	18	51
1	12	41
0,5	9	32
0,25	7	24
0,125	5	16
0,063	3	11

Tabulka 19 – Zrnitost kameniva pro třídu pevnosti C_{5/6} a vyšší [32]



Obrázek 27 – Příprava sady sít pro zkoušku zrnitost na třepačce HAVER [1]

Prosévání proudem vzduchu

Jedná se o zkoušku pro určování zrnitosti fileru podle ČSN EN 933-10, kdy samotná zkouška spočívá v rozčlenění a oddělení zrn fileru. Pojmem filer rozumíme takový produkt, který obsahuje minimálně 70 % svého obsahu jemné částice menší než 0,063 mm. Filer vzniká jako odpadní produkt při drcení a třídění kameniva. Oddělení zrn fileru docílíme pomocí řady sít, které jsou následně zařazeny do několika zrnitostních skupin se sestupnou velikostí. Používají se zkušební síta s kruhovým rámem jmenovitého průměru 200 mm a s čtvercovými otvory 0,063; 0,125 a 2 mm. Tato zkouška je vhodná pro takové materiály, které když jsou suché, tak nemají sklon ke shlukování ani k elektrostatickým nábojům. Jedná se o metodu prosévání za sucha proudem vzduchu, kdy hmotnost částic propadlých každým sítem, je vztažena k původní hmotnosti zkoušeného materiálu. Získaná procenta se prezentují buď v číselné podobě nebo v grafickém znázornění. [6]

Mezi zkušební zařízení nutné k vyhotovení zkoušky patří především zkušební síta, přístroj pro prosévání proudem vzduchu, který disponuje rozdílem tlaku napříč sítem během zkoušky v rozmezí $3,0 \pm 0,5$ kPa. Dále je nezbytná sušárna s nucenou cirkulací vzduchu, váhy s přesností $\pm 0,1$ %, jemný kartáč a plastové kladívko.

Zkušební postup začíná přípravou zkušebních navážek, kdy hmotnost zkušební navážky se pohybuje v rozmezí $50 \pm 1,0$ g. Následně se zkušební navážka vysuší při teplotě okolo 110 °C do ustálené hmotnosti. Nechá se vychladnout, zváží se a navážená hmotnost se zaznamená jako hodnota m_1 . Takto připravená směs se umístí na předem připevněné síto 0,063 mm. Síto je následně nutné přikrýt plastovým víkem z plexiskla a nechá se stroj pracovat na prosévání proudem do té doby, dokud není dosaženo úplného prosetí.

Trvání zkoušky se požaduje nejméně v délce 3 minuty. Během prosévání, na rozdíl od normálního tlaku vzduchu, musí být v přístroji zvýšený tlak na přibližně 3,0 kPa. V průběhu zkoušky je nutné dbát na jakékoliv shlukování zrn, které může být zmírněno opatrným poklepáním plastovým kladívkem na střed víka z plexiskla. Samotné prosévání je ukončeno, když se hmotnost zůstatku na sítu v rozmezí jedné minuty nemění o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky nebo po vypršení předem stanoveného časového intervalu.

Po ukončení zkoušky proséváním se stanoví hmotnost materiálu, který zůstal na sítu včetně fileru setřeného ze síta za pomoci kartáče a zaznamenán jako hmotnost R_1 s přesností na 0,1 g. Výše uvedený zkušební postup se opakuje i se sítem 0,125 mm a pak se sítem 2 mm. Přičemž se každém případě použije zůstatek ze síta předchozího a zaznamenávají se jednotlivé hmotnosti zůstatků jako R_2 a R_3 s přesností na 0,1 g.

Výsledky jsou vypočteny na základě zaznamenaných jednotlivých hmotností do formuláře. Z kterých je vypočtena hmotnost zůstatku na každém síti jako procento z původní suché hmotnosti m_1 a zaokrouhlí se na nejbližší celé číslo. Nakonec se vypočte součtové procento původní suché hmotnosti, které propadlo každým sítem na síto 0,063 mm. Tyto hodnoty jsou zaneseny do protokolu a interpretovány jako výsledky. [6]

3.2.2 Zkušební metody čerstvě stmelené směsi

Proctorova zkouška

Podstatou této laboratorní zkoušky je stanovení vztahu mezi objemovou hmotností a vlhkostí zhutněných nestmelených nebo hydraulicky stmelených směsí. Provádí se dle ČSN EN 13 286-2, ve které je popsáno šest podobných zkoušek zhutnitelnosti v návaznosti na maximální velikosti částic zkoušené směsi k požadovanému množství vzorků a velikosti formy. V mém experimentu budou tělesa zkoušena dle Proctorovy metody modifikované. Tato metoda dosahuje mnohem větší míry zhutnění důsledku užití různých pěchů (4,5 kg a 15 kg). Nebo v důsledku většího dopadu na slabší vrstvu zkoušeného materiálu, než je tomu u klasické Proctorovy zkoušky. Mezi nezbytné pomůcky Proctorovy zkoušky patří pěch a formy, bez těchto předmětů by nebylo možné zkoušku realizovat. Forma je po vrstvách plněna směsí, která je vzápětí po vrstvách hutněna pěchem. Počet vrstev, které jsou hutněny, hmotnost pěchu, výška dopadu pěchu a počet úderů na jednotlivé vrstvy určené ke zhutnění.

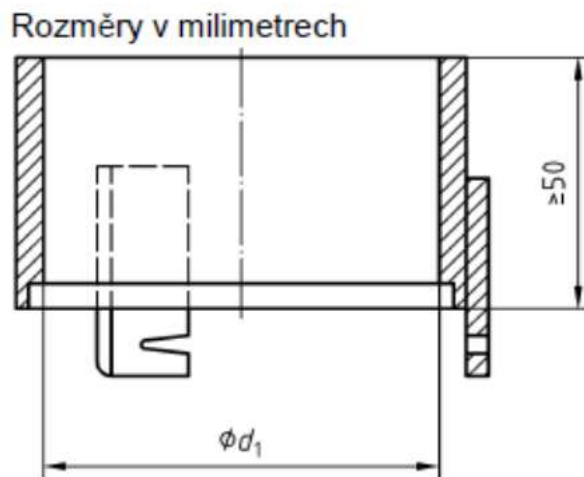
Tyto všechny skutečnosti jsou stanoveny na základě výběru druhu Proctorovy zkoušky, jestli se jedná o Proctorovu zkoušku standardní nebo modifikovanou.

Mezi zkušební zařízení a pomůcky patří zejména:

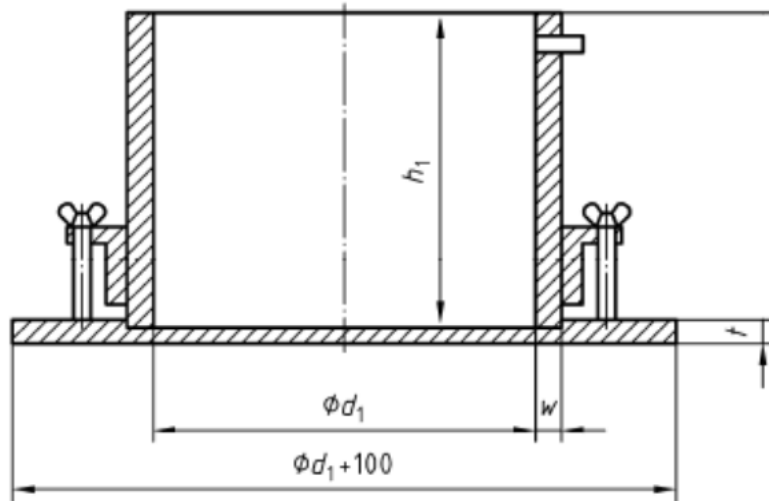
- **Moždíře**, kdy jejich velikost se volí na základě maximální velikosti zrna zkoušeného vzorku. Moždíř je vybaven snímatelným nástavcem o výšce nejméně 50 mm a snímatelnou ocelovou základní deskou. Vnitřní povrch moždíře musí být hladký. Rozměry nových moždířů stanovuje tabulka níže, kdy průměr moždíře musí být minimálně čtyřnásobkem hodnoty horního síta.

Proctorův moždíř	Průměr d_1 [mm]	Výška h_1 [mm]	Tloušťka	
			stěna t_w	základní deska t [mm]
A	100,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	7,5 ± 0,5	11,0 ± 0,5
B	150,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	9,0 ± 0,5	14,0 ± 0,5
C	250,0 ± 1,0	200,0 ± 1,0	14,0 ± 0,5	20,0 ± 0,5

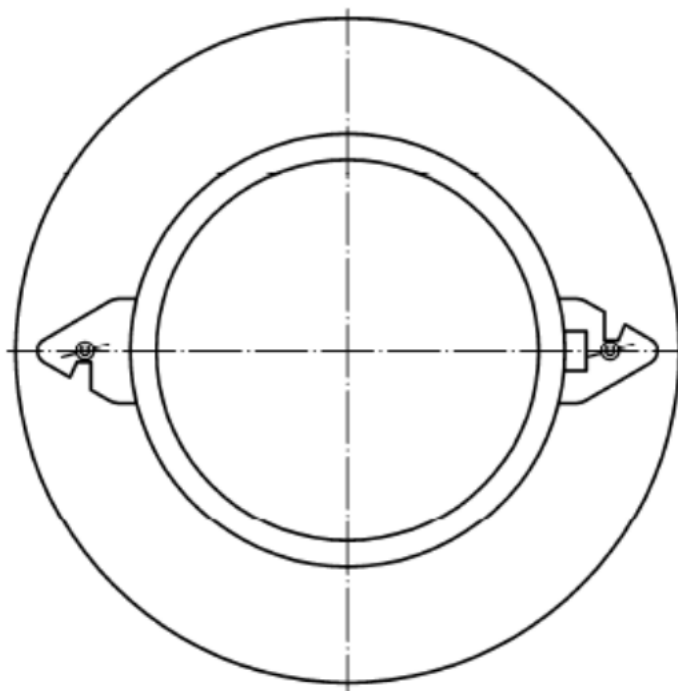
Tabulka 20 – Rozměry nových moždířů [5]



Obrázek 28 – Rozměry nástavce Proctorova moždíře [5]



Obrázek 29 – Rozměry úložné desky [5]

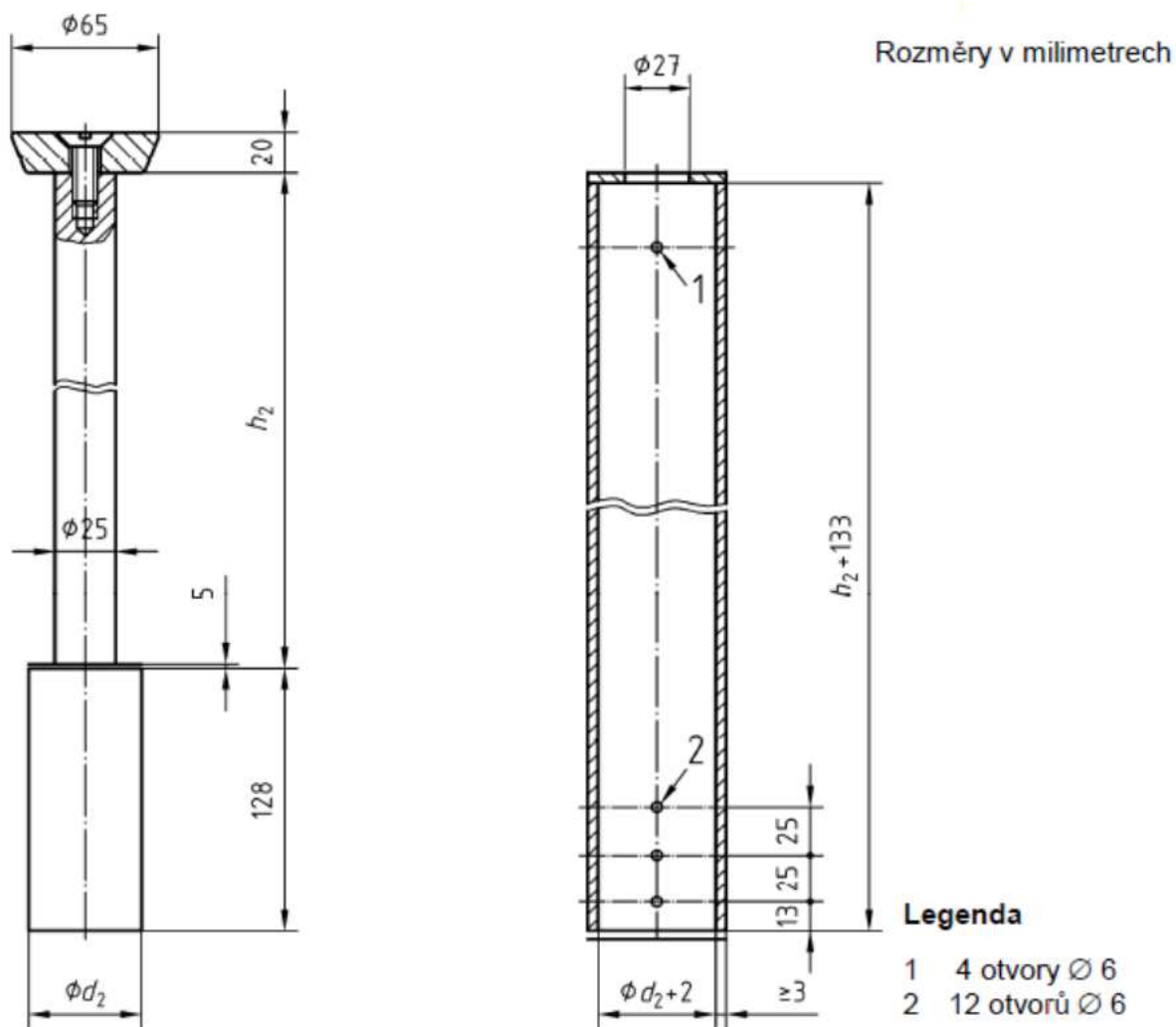


Obrázek 30 – Půdorysný pohled na sestavu [5]



Obrázek 31 – Proctorovy moždíře typu A a B [1]

- **Hutnicí zařízení**, které se skládá z pěchu. Pěch volně dopadá na definovanou vrchní část směsi v moždíři. Pěchy se od sebe odlišují nejen svojí hmotností, ale i průměrem základu a výškou dopadu. U modifikované zkoušky se používají pěchy o hmotnosti 4,5 kg nebo 15 kg. Samotný pěch je vybaven takovým zařízením, které umožňuje rektifikaci předepsané výšky dopadu podle úrovně horního povrchu směsi v moždíři.



Obrázek 32 – Schéma pěchu a vodící tyče [5]

Pěch	Hlavní požadavky		
	Hmotnost pěchu mR [kg]	Průměr základu d2 [mm]	Výška dopadu h2 [mm]
A	$2,5 \pm 0,02$	$50,0 \pm 0,05$	305 ± 3
B	$4,5 \pm 0,04$	$50,0 \pm 0,05$	457 ± 3
C	$15,0 \pm 0,04$	$125,0 \pm 0,05$	600 ± 3

Tabulka 21 – Hlavní požadavky na nové pěchy [5]



Obrázek 33 – Automatický přístroj pro výrobu těles dle Proctorovy zkoušky [1]

- **Ocelová deska**, která má rozměry viz. tabulka níže. Uvádí se, že je možné pro poslední vrstvu použít na hutnění právě tuto ocelovou desku.

Proctorův mozdíř	Průměr d_3 [mm]	Tloušťka S_2 [mm]
A	$d_1 - 0,5$	$10,0 \pm 0,1$
B		
C		$20,0 \pm 0,1$

Tabulka 22 – Rozměry ocelové desky [5]

Mezi další zařízení a pomůcky nezbytné z realizaci Proctorovy zkoušky patří:

- **Zkušební síta**
- **Váhy**, které váží s přesností na 0,1 g hmotnosti zkoušeného vzorku. Často se vyžadují i dvě váhy, aby se eliminovala chyba ve vážení. Přičemž jedna váha s váživostí do 1 kg a druhá s váživostí do 30 kg.
- **Nerezový plech nebo plastová mísící nádoba**, kdy její rozměry odpovídají množství zkoušeného vzorku.
- **Ploché hladítko, špachtle nebo obdobný nástroj**
- **Ocelové pravítko**, sloužící na urovnání. Používá se o délce 200 mm nebo i větší.
- **Zařízení na stanovení vlhkosti**
- **Hloubkoměr** s přesností 0,02 mm.

- **Laboratorní míchačka** disponující objemem minimálně 0,01 m³
- **Betonový blok**, který se používá jako podklad pro hutnění za pomoci ručně ovládaného pěchu. Hmotnost bloku se pohybuje okolo 50 kg.

Samotná příprava zkoušky pak je stanovena tabulkou níže, kde jsou uvedeny jednotlivé alternativy v závislosti na maximální velikosti zrna, které zkoušená směs obsahuje. Hutnění směsi se provádí v moždíři typu A, B nebo C. Ovšem při sérii zkoušek je nezbytné používat pouze jednu velikost moždíře, neboť by mohlo dojít ke zkreslení výsledků objemové hmotnosti, zkoumané ve dvou odlišných formát. Je to zapříčiněno proměnným účinkem tření na bočních stranách moždíře. [5]

Procento propadu zkušebními sítí			Hmotnost vzorku [kg]	Proctorův moždíř
16 mm	31,5 mm	63 mm		
100	-	-	15	A
			40	B
75 až 100	100	-	40	B
< 100	75 až 100	100	40	B
-	< 75	75 až 100	200	C

Tabulka 23 – Přehled metod přípravy vzorku [5]



Obrázek 34 – Příprava pro zkoušení vzorků za pomoci dvou vah KERN [1]

Modifikovaná Proctorova zkouška

Při této zkoušce je síla hutnění větší oproti standardní Proctorově zkoušce. Jedná se o větší hutnicí energii z důvodu použití zvýšené hmotnosti pěchu (B) na 4,5 kg, který dopadá do širokého moždíře (B) z výšky dopadu 457 mm. A počet hutnicích vrstev je zvětšen z pouhých třech na pět.

Před započítáním samotné zkoušky je nejprve nutné samotný moždíř připevnit k základní desce a zvážit na s přesností na 5 g. Každá navážená hmotnost se zaznamenává do záznamu jako m_1 . Pokud nejsou známy vnitřní rozměry moždíře, změří se s přesností na 0,5 mm. Následně se nástavec připevní na moždíř a celá sestava se umístí na pevný podklad. Většinou se jedná o podlahu, sokl nebo speciální laboratorní základ. U nástavce se jeho vnitřní strany namažou separačním prostředkem. Po takto připravené sestavě se z jednoho připraveného vzorku do moždíře vloží takové množství zavlhlé směsi, aby po ztuhnutí byla vyplněna více jak jedna pětina výšky tělesa moždíře. U modifikované metody hutníme každou vrstvu 56 údery o hmotnosti pěchu 4,5 kg, který na zkoušený vzorek dopadá pomocí vodící tyče z výšky 457 mm. Jednotlivé údery jsou rozděleny rovnoměrně po celém obvodu moždíře a je nezbytně nutné během zkoušky sledovat, zda pěch dopadá vždy volně na zkoušený vzorek a není nijak limitován směsí ve vodící tyči nebo na ní. Mezi možné metody, jak zajistit, aby údery dopadaly rovnoměrně na povrch zkoušené směsi. Je aplikace osmi sérií o sedmi úderech, kdy šest úderů se rozmístí rovnoměrně po obvodu a poslední sedmý úder se umístí do přesného středu. Tento postup opakujeme ještě čtyřikrát, aby množství směsi naplnilo celé těleso moždíře a horní povrch směsi nebyl více jak 10 mm nad horním okrajem tělesa moždíře. Pozor ovšem na regulování objemu zkoušené směsi, nesmí docházet k tomu, aby bylo nutné odstraňovat velké množství směsi po sejmutí nástavce. Tato skutečnost pak může vést ke zkreslenému výsledku. Po odstranění přebytečné vrstvy se ztuhlý povrch zkoušené směsi, pečlivě zarovná pravítkem s okrajem moždíře. Po takto upraveném tělese se komplet (materiál a moždíř se základní deskou) zváží s přesností na 5 g a zaznamená se hmotnost m_2 . Takto ztuhlá směs se vyjme z moždíře a umístí se do kovové nádoby ke stanovení vlhkosti w . Tento postup se následně provede s každým zbývajícím vzorkem a získá se nejméně pět stanovených hodnot. Výjimkou je případ u směsi se známými vlastnosti, tam se požadují pouze tři hodnoty. Zvolené vlhkosti musí být takové, aby optimální vlhkost, při které se dosáhne maximální objemové hmotnosti suché směsi, ležela blízko středu rozmezí. [5]

Druh zkoušky	Charakteristika zkoušky	Symbol	Jednotky	Proctorův moždíř		
				A	B	C
Modifikovaná Proctorova zkouška	Hmotnost pěchu	m_R	kg	4,5	4,5	15
	Průměr pěchu	d_2	mm	50	50	125
	Výška dopadu	h_2	mm	457	457	600
	Počet vrstev	-	-	5	5	3
	Počet úderů na vrstvu	-	-	25	56	98

Tabulka 24 – Přehled modifikované Proctorovy zkoušky [5]

Vyhodnocení měření je zakončeno výpočtem:

- Vnitřního objemu moždíře V [cm^3]
- Objemové hmotnosti vlhké směsi ρ [kg/m^3] každého zhutněného tělesa

Stanovení objemové hmotnosti zhutněné vlhké směsi:

$$\rho = (m_2 - m_1) \times 1000 / V$$

Kde: ρ ... objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi (kg/m^3)
 m_1 ... hmotnost moždíře a základní desky v gramech
 m_2 ... hmotnost moždíře, základní desky a zhutněné směsi v gramech
 V ... objem moždíře (cm^3)

Rovnice 1 – Objemová hmotnost vlhké směsi [5]

Stanovení objemové hmotnosti zhutněné suché směsi

$$\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + W)$$

Kde: ρ_d ... objemová hmotnost zhutněné suché směsi (kg/m^3)

W ... optimální vlhkost zeminy [%]

Rovnice 2 – Objemová hmotnost suché směsi [5]

Stanovení vlhkosti:

$$W = m_w / m_0$$

Kde: W ... optimální vlhkost zeminy
 m_w ... hmotnost vody odstraněné ze vzorku sušením
 m_0 ... hmotnost vysušené zeminy

$$m_w = m_2 - m_3$$

Kde: m_2 ... hmotnost váženky s vlhkou zeminou
 m_3 ... hmotnost váženky se suchou zeminou

$$m_0 = m_3 - m_1$$

m_1 ... hmotnost váženky

Rovnice 3 – Stanovení vlhkosti [5]

Celkové vyhodnocení zkoušky se provádí nejen numericky, ale i grafickou formou. Kde je přesně definovaná závislost mezi objemovou hmotností suché zeminy a odpovídající vlhkosti zkoušeného vzorku.

Získaným bodem se proloží křivka, kde v maximum této křivky jsou námi zjišťované hodnoty maximální objemové hmotnosti a optimální vlhkosti. Do stejného grafu se vynáší i křivka odpovídající 0 % mezerovitosti = 100 % saturace směsi, která je stanovena ze vztahu:

$$\rho_d = (1 - 0,01 * V_a) / (\rho_s^{-1} + 0,01 * w * \rho_w^{-1})$$

Kde: ρ_d ... objemová hmotnost zhutněné suché směsi (kg/m³)
 ρ_s ... zdánlivá hustota pevných částic (kg/m³)
 ρ_w ... objemová hmotnost vody (kg/m³), předpokládá se rovna 1000
 V_a ... mezerovitost směsi v procentech (pro účely vynesení = 0)
 W ... vlhkost v procentech

Rovnice 4 – Určující mezerovitost směsi [5]

3.2.3 Popis výroby zkušebních těles

Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu určuje norma ČSN en 13 286-50, která stanovuje výrobu zkušebních těles ve tvaru válce z hydraulicky stmelených směsí, které mají předem stanovenou objemovou hmotností hutněním Proctorovým zkušebním zařízením nebo vibračním stolem. Tato metoda je vhodná pro směsi, které obsahují kamenivo do maximálního zrna 31,5 mm.

Pro použití této normy je nezbytně nutné vzít na vědomí propojení s EN 13 286-2, která stanovuje zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti dle Proctorovy zkoušky. Podstata zkoušky pak spočívá ve vyrobení válcových zkušebních těles ze směsi za použití Proctorových forem uvedených v EN 13 286-2. Následně je směs nutné vložit do formy a zhutnit na předem stanovenou objemovou hmotnost pomocí Proctorova pěchu nebo vibračního stolu. Do doby požadované zkoušky se zhutněná zkušební tělesa, která jsou vyjmutá z forem nebo jsou stále ve formách. Uloží na stanovenou dobu za stanovených teplotních a vlhkostních podmínek do určené místnosti. [44]

d [mm]	h [mm]	Vhodné pro směsi kameniva s maximální velikostí zrn [mm]
100,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	16 ^a
150,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	31,5
^a nebo 22,4 mm na základě zkušeností		

Tabulka 25 – Rozměry zkušebních těles [44]

Pro výrobu zkušebních těles jsou nezbytné tyto pomůcky:

- **Formy**, které jsou definovány tabulkou uvedenou v ČSN EN 13 286-2 a jsou zvoleny na základě nutných rozměrů zkušebních těles. Formy musí obsahovat nastavné plnicí objímky o minimální výšce 100 mm, které umožňují plnění. Pro lepší odstraňování forem existuje varianta dělené formy.
- **Pěchy**, typu A, B nebo C stanovené normou ČSN EN 13 286-2.
- **Vibrační stůl** spolu se zatěžovacími trny, které mají hmotnost pohybující se okolo 12 kg. Ta je ovšem závislá na druhu materiálu a velikosti formy. Zatěžovací trn musí přesně zapadat do nastavné plnicí objímky a musí být opatřen stupnicí. Tato stupnice umožňuje dosažení požadované výšky zkušebního tělesa.



Obrázek 35 – Vibrační stůl se zatěžovacími trny [1]

Postup přípravy zkušebního tělesa se odvíjí od vzorce, který stanovuje potřebnou hmotnost směsi nutnou k výrobě zkušebního tělesa viz. následující vzorec:

$$m = V * \rho_d \left[1 + \frac{w}{100} \right]$$

Kde:

m ... hmotnost zkušebního tělesa (g)

V ... objem zkušebního tělesa (cm³)

ρ_d ... objemová hmotnost vysušené směsi (g/cm³)

w ... vlhkost vztažená k hmotnosti směsive vysušeném stavu [%]

Rovnice 5 – Hmotnost zkušebního tělesa [44]

Hutnění je realizováno pomocí hutnického pění, kdy se zkušební těleso připraví dle pokynů v ČSN EN 13 286-2, zvolí se vhodná kombinace formy a pění potřebné k dosažení požadované objemové hmotnosti. S tím souvisí i stanovení odpovídající metody tak, aby bylo docíleno požadované objemové hmotnosti v celé výšce zkušební tělesa. Nezbytným poznatkem je požadavek na narušení povrchu zhutněné vrstvy, než se přidá další vrstva. Tím je docíleno k adhezi mezi jednotlivými vrstvami vzorku.

Druhou variantou je hutnění pomocí vibračního stolu, tato metoda spočívá v naplnění formy požadovaným množstvím směsi díky nastavné objímky. Během samotného plnění je materiál pravidelně jemně udusán dusadlem. Poté je nahoru umístěna zatěžovací hlavice a směs se následně zhutní vibracemi na požadovanou výšku.

Takto vyrobená zkušební tělesa jsou skladována při pokojové teplotě, která se pohybuje v rozmezí 20 ± 5 °C bez ztráty vlhkosti. Zhruba po 20 hodinách dochází k dostatečnému vytvrnutí tělesa a je možné tělesa odformovat. Odformované těleso se následně uloží do doby jeho zkoušení. Při uložení tělesa jsou požadavky na jeho vertikální polohu, minimální ztrátu vlhkosti, nelišící se teplotu o více než ± 2 °C a po dobu, která je stanovena v příslušném dokumentu. [44]

3.2.4 Zkušební metody ztvrdlé směsi

Stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelých hydraulickými pojivy

Tuto zkoušku provádíme na základě normy ČSN EN 13 286-41. Podstatou této zkušební metody je vystavení zkušební tělesa takové tlakové síle, která zapříčiní jeho porušení. Během zkoušky se zaznamenává maximální zatížení při porušení zkoušeného tělesa a vypočítává z toho pevnost v tlaku. Tělesa jsou zhotovena ze směsi stmelé hydraulickým pojivem, které tvrdnou na základě hydraulické reakce, jejíž zpracovatelnost obvykle vyhovuje hutnění válcováním. Tento materiál se používá převážně do podkladních vrstev konstrukce komunikace.

Nedílnou součástí této zkoušky je zkušební lis. U kterého je nezbytná jeho přesnost a indikace zatížení musí zajišťovat zatěžování a měření s přesností ± 1 %. Samotný lis pak musí obsahovat dvě ocelové tlačné desky s povrchy, které mají tvrdost stanovenou dle Rockwella nejméně 55 HRC do hloubky přibližně 5 mm. Tlačné desky musejí být minimálně tak velké, jakou jsou povrchy tělesa, které je podrobena zatížení.

V lepším případě jsou desky větší, než je zatěžovaný povrch tělesa. Rovnost povrchu tlačných desek a povrchu na které desky dosedají, musí být 0,03 mm nebo lepší. Alternativou je i použití takových přídavných desek o minimální tloušťce 25 mm, které splňují požadavky jako originální desky. Horní tlačná deska musí mít dosedací plochu takového rozměru, aby deformace desky při běžném zatížení nepřekročila tolerance rovnosti. Kombinace sférické dosedací plochy a horní desky musí být navržena tak, aby umožňovala snadné nastavení desky k samotnému tělesu. A zároveň aby nedocházelo k jejímu pohybu při procesu zatěžování. Střed dosedací plochy musí být ve středu povrchu desky nebo v takovém bodě, jehož vzdálenost od desky je menší než 1 mm. Ovšem průměr sférické desky nesmí být větší než 150 mm. Uložení těles je zcela zásadní pro korektní provedení zkoušky. Tělesa musí být uložena přesně ve středu spodní desky.

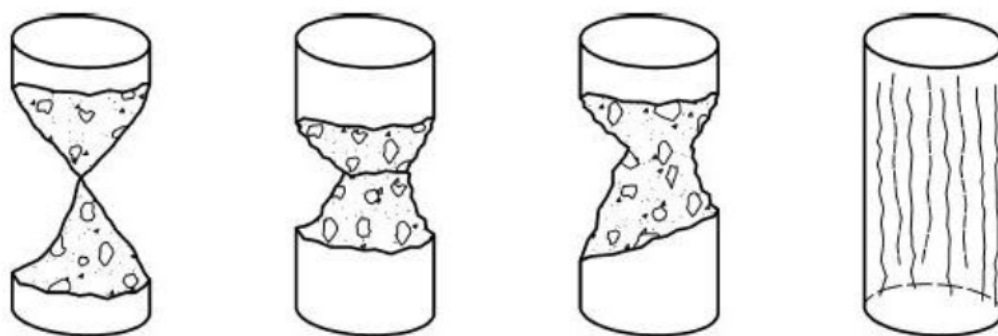


Obrázek 36 – Zkušební lis ELE Autotest 3000 [1]

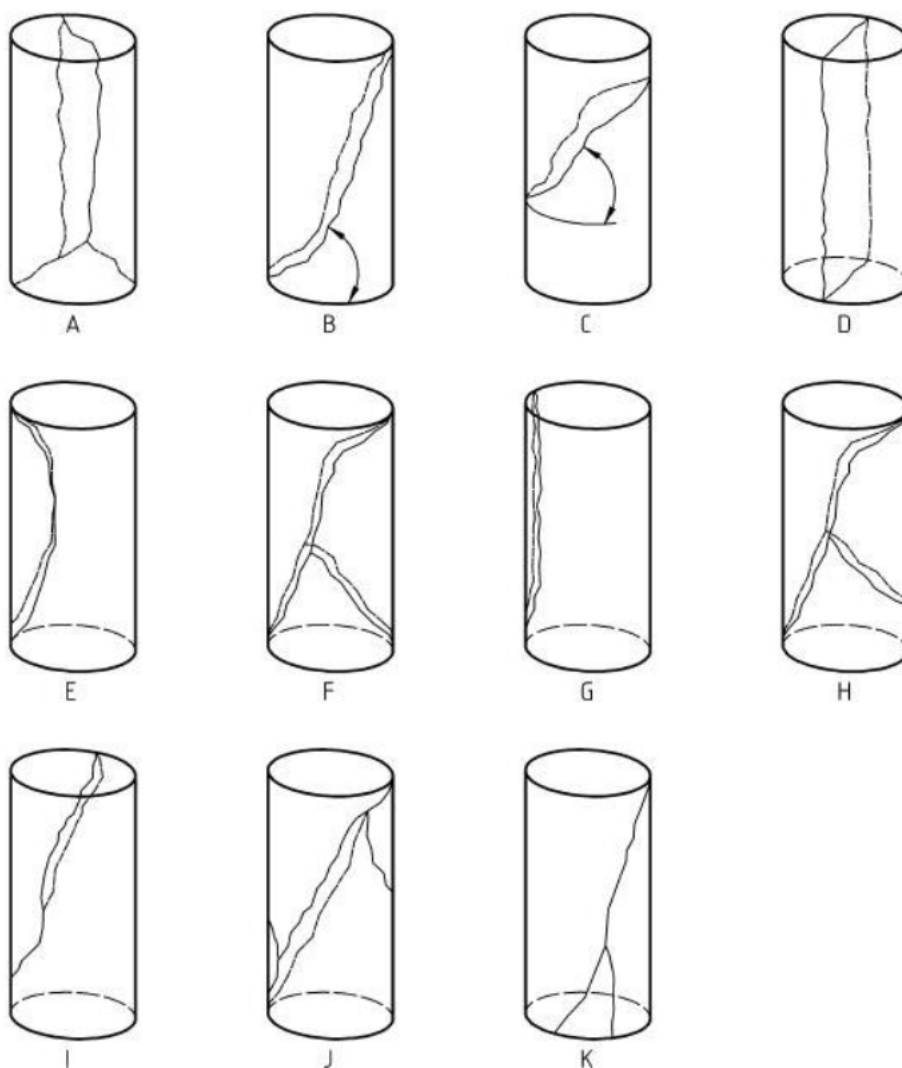
Postup zkoušky začíná výrobou zkušebního tělesa, která vychází z požadavků legislativy ČSN EN 13 286-50. Zvolená metoda zhutňování a zrání tělesa musí být uvedeno v příslušném protokolu o zkoušce. Po výrobě zkušebních těles je nutné, změřit tělesa s přesností 0,5 %. Změřená tělesa je dále nutné zvážit s přesností $\pm 0,25$ % a výsledná hodnota se porovná s hmotností v době výroby. Případná změna hmotnosti se musí zaznamenat a vyjádřit procentuálně.

Samotná změna hmotnosti nesmí být větší než $\pm 2 \%$, pak by nezbytné, výslednou pevnost v tlaku přezkoumat, protože by nemusela být pro zkoušenou směs reprezentativní. Požadavky na horní a dolní plochy zkušební tělesa musí mít toleranci v rovnoběžnosti maximálně 2 mm na 100 mm. Tělesa, která nesplňují tyto kritéria musejí být upravena broušením nebo opatřena krycí vrstvou. Kdyby při úpravě došlo k jejich poškození, je nezbytné toto těleso vyřadit ze zkoušení, neboť porušená tělesa se nesmějí zkoušet. Neporušená tělesa mohou být uložena do zkušební lisu, před uložením je nutné z povrchu zkoušeného tělesa setřít přebytečnou vodu. Obecně všechny povrchy lisu, které dosedají na zkušební těleso, musejí být vytřeny tak, aby byly čisté. Dále musí být z povrch zkušebních těles odstraněn veškerý uvolněný nebo cizorodný materiál, který by mohl být ve styku s tlačnými deskami. Také mezi tlačnými deskami a zkušebním tělesem nesmí být umístěn žádný těsnicí materiál. Zkušební těleso musí být uloženo ve středu spodní desky s přesností 1 % délky hrany krychle nebo průměru válcových těles.

Takto připravené a umístěné zkušební těleso může být zatěžováno. Zatížení se musí zvyšovat stálým a plynulým způsobem bez rázů tak, aby k porušení došlo v průběhu 30 až 60 sekund po zahájení zatěžování. Pokud je využito automaticky řízeného zatěžování zkušební lisu, je nezbytné rychlost zatěžování kontrolovat periodicky s cílem zajištění konstantní rychlosti zatěžování. Maximální síla F , při které dojde k porušení vzorku, musí být zaznamenána. Současně se zaznamenáním hodnoty maximální síly při porušení, musí být posouzen i typ porušení, který se zatřídí dle obrázku níže. Porušení dělíme na čtyři typy. Pokud je porušení z hlediska zkoušejícího uspokojivé, zaznamená se typ porušení. Jestliže porušení uspokojivé není, musí se tato skutečnost taky zaznamenat a přiřadit k ní druh porušení použitím čísla typu, jestli se jedná o krychelný vzorek nebo použitím písmena, když se jedná o vzorek válcovitého tvaru. Ve většině případů jsou neuspokojivá porušení způsobena nedostatečnou pozorností věnovanou při výrobě, vyrovnání povrchu a zkoušení těles. V krajním případě může být i příčinou neuspokojivého typu porušení vada lisu. [45]



Obrázek 37 – Příklady uspokojivého porušení válcových zkušebních těles [45]



Obrázek 38 – Příklady neuspokojivého porušení válcovitých těles [45]

Výsledky se vyjadřují na základě zjištěné pevnosti v tlaku, která je dána následujícím vztahem:

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

Kde:

R_c ... je pevnost v tlaku zkušebního tělesa směsi
stmelené hydraulickým pojivem [MPa]

F ... maximální síla při porušení zkušebního tělesa [N]

A_c ... plocha průřezu zkušebního tělesa [mm²]

Rovnice 6 – Pevnost v tlaku R_c zkušebního tělesa [45]

Zkoumaná pevnost v tlaku musí být vyjádřena s přesností:

- 0,1 MPa pro hodnoty pevnosti v tlaku do 5 MPa
- 0,5 MPa pro hodnoty pevnosti v tlaku vyšší než 5 MPa

Výslednou pevností v tlaku je aritmetický průměr měření na třech laboratorně připravených zkušebních tělesech. Přičemž se jednotlivé výsledky nesmí lišit o více jak 15 %.

Zkouška odolnosti směsí stmelěných hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě

Postup této zkoušky je stanoven v ČSN 73 6124-1; příloha A, kdy pomůcky nezbytné k vyhotovení této zkoušky jsou stejné jako u zkoušky pevnosti v tlaku podle ČSN EN 13 286-41 krom jedné výjimky, kterou je mrazicí skříň. Mrazicí skříň musí být schopna dosáhnout teploty alespoň -20 ± 2 °C.



Obrázek 39 – Mrazicí skříně WEISS [1]

Příprava směsi, výroba zkušebních těles a způsob zrání jsou naprosto totožné jako u zkoušky pevnosti v tlaku, která je uvedena výše. Po skončení 28denního zrání se zkušební tělesa umístí na plstěnou podložku, která je částečně ponořená ve vodě a nechají se kapilárně nasytit do ustálené hmotnosti tak, aby přírůstek hmotnosti po dobu nejméně 1 hodiny nepřekročil 1 %. Během nasycování nesmějí tělesa přijít do přímého kontaktu s vodou. Když jsou zkušební tělesa zcela nasycena, mohou se uložit do mrazicí skříně na dobu $6 \pm 0,5$ hodin při takové teplotě, kterou uvádí tabulka níže. Po zmrazení se zkušební tělesa z mrazicí skříně vyndají a uloží na dobu $18 \pm 0,5$ hodin opět na plstěnou podložku, která je částečně ponořena ve vodě tak, aby bylo umožněno jejich další kapilární nasycování. Současně s tím probíhá rozmrazování při teplotě $+ 20$ °C až $+ 25$ °C. Následně zkouška pokračuje novým zmrazením a opakuje se v předepsaném počtu cyklů nejméně na třech zkušebních tělesech. Po skončení posledního cyklu se zkouší na tělesech pevnost v tlaku podle ČSN EN 13 286-41. [32]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování [°C]	Počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti [°C x den] ^a		
		do 350	350 až 600	nad 600
Horní podkladí vrstva	-20 ± 2	10	13	16
Dolní podkladní vrstva ^b	-15 ± 2	7	10	13

^a Index mrazu dle ČSN 73 6114;
^b Platí i pro ochrannou vrstvu, je-li použita

Tabulka 26 – Teplota zmrazování a počty cyklů zmrazování [32]



Obrázek 40 – Zkušební tělesa během nasycování u zkoušky odolnosti proti mrazu a vodě [1]

3.3 Výsledky laboratorních zkoušek

3.3.1 Výsledky zkoušek jednotlivých vstupních složek

- **R-materiál**

Nejdůležitější částí nově zkoumané směsi byl samotný R-materiál, který nahrazuje přírodní drcené kamenivo v běžně vyráběných směsích. Proto došlo ke zkoušení dvou vzorků R-materiálu, které byly odebrány na deponii obalovny Herink v množství 75 kg, aby se prokázala jejich vhodnost. Tento materiál byl přepravován v papírových pytlích do nedaleké laboratoře, kde byl uchován v suchém prostředí za pokojové teploty.

Vzorek č. 1: R-materiál s příměsí betonové stabilizace cementem

Vzorek č. 2: R-materiál zcela čistý



Obrázek 41 –Zleva čistý R-materiál a vpravo s příměsí betonové stabilizace cementem [1]



Obrázek 42 – Přeprava a skladování zkoušeného materiálu v pokojové teplotě [1]

• **VZOREK č.1:**

Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti zemín

Zkoušený materiál:	R-materiál s příměsí betonu		
Receptura:	C 3/4; C8/10		
Celková hmotnost vzorku:	10 059,60	[g]	
Hmotnost vzorku pro jemnou část:	1 176,60	[g]	

Prosevání (více než 90 % zrn je nad sítím 0,063 mm)			
Označení měřidla	Velikost síta [mm]	Zbytek na síti [g]	Propad [%]
A/237	125	-	100,00
A/238	63	-	100,00
A/193	31,5	614,26	93,89
A/244	16	2 579,71	68,25
A/245	8	2 826,09	40,16
A/246	4	1 911,45	21,15
A/234	2	951,51	11,70
A/233	1	545,56	6,27
A/232	0,5	243,92	3,85
A/231	0,25	149,47	2,36
A/473	0,125	97,24	1,40
A/227	0,063	59,82	0,80
	<i>Podsítné</i>	<i>80,57</i>	

Použitá zkušební zařízení:

Sada sítí označených zeleným proužkem

Hustoměr kalibrační

Váhy ARTORIUS (A/148)

Váhy KERN (A/533)

Sušárna MEMMERT (A/36)

Třepačka HAVER

Teploměr (A/526)

Datum: 16.11.2018

Zkoušku Provedl: D. Hořák

Tabulka 27 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti vzorek 1. [1]

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 16.11.2018	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	LOKALITA Praha
	MATERIÁL R-materiál s příměsí betonu
	ČÍSLO VZORKU: 1.
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál z deponie Herink

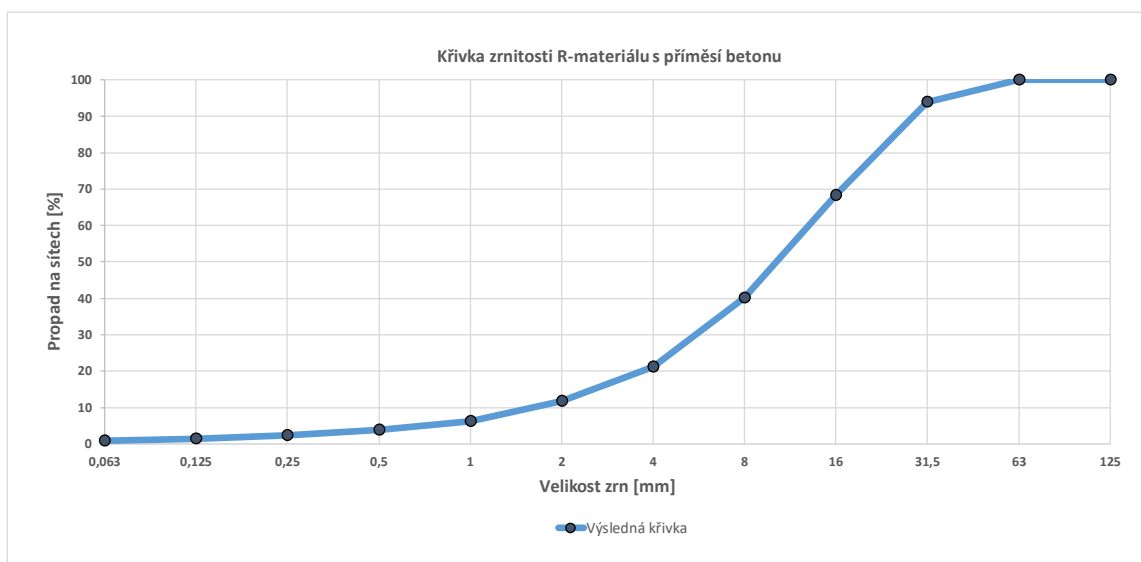
Síta	Propad zkoušeného materiálu [%]
63	100,00
31,5	93,89
16	68,25
8	40,16
4	21,15
2	11,70
1	6,27
0,5	3,85
0,25	2,36
0,125	1,40
0,063	0,80

Číslo nestejnozrnosti: c_u **8,1**
(ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Číslo křivost: c_c **1,5**
(ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Zatřídění zeminy: **G1 GW**
(ČSN 73 6133:2010)

Namrzavost : **materiál příliš hrubozrný**



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 43 – Protokol o zkoušce zrnitosti R-materiálu s příměsí betonu [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C3/4		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	93,89	80	100	ANO
16	68,25	40	100	ANO
8	40,16	28	100	ANO
4	21,15	20	100	ANO
2	11,70	15	100	NE
1	6,27	11	88	NE
0,5	3,85	8	75	NE
0,25	2,36	5	60	NE
0,125	1,40	2	40	NE
0,063	0,80	0	15	ANO

Tabulka 28 – Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C_{3/4} [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C5/6 a vyšší		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	93,89	85	100	ANO
16	68,25	60	90	ANO
8	40,16	40	73	ANO
4	21,15	27	61	NE
2	11,70	18	51	NE
1	6,27	12	41	NE
0,5	3,85	9	32	NE
0,25	2,36	7	24	NE
0,125	1,40	5	16	NE
0,063	0,80	3	11	NE

Tabulka 29 – Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C_{5/6} a vyšší [1]

Z uvedených tabulek jasně vyplývá, že samotný R-materiál s příměsí betonu nesplňuje obecné požadavky na zrnitost kameniva tříd pevnosti C_{3/4} a C_{8/10} uvedených v ČSN 73 6124-1. Proto je nezbytně nutné doplnit jeho nedostatek jemných částic jiným materiálem.

• **VZOREK č.2:**

Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti zemín

Zkoušený materiál:	R-materiál
Receptura:	C 3/4; C8/10
Celková hmotnost vzorku:	10 079,80 [g]
Hmotnost vzorku pro jemnou část:	166,20 [g]

Prosevání (více než 90 % zrn je nad sítím 0,063 mm)			
Označení měřidla	Velikost síta [mm]	Zbytek na síti [g]	Propad [%]
A/237	125	-	100,00
A/238	63	-	100,00
A/193	31,5	178,31	98,23
A/244	16	2 513,80	73,29
A/245	8	5 188,32	21,82
A/246	4	1 670,15	5,25
A/234	2	363,03	1,65
A/233	1	88,20	0,77
A/232	0,5	28,31	0,49
A/231	0,25	19,45	0,30
A/473	0,125	14,86	0,15
A/227	0,063	10,28	0,05
	<i>Podsítné</i>	5,09	

Použitá zkušební zařízení:

Sada sítí označených zeleným proužkem

Hustoměr kalibrační

Váhy ARTORIUS (A/148)

Váhy KERN (A/533)

Sušárna MEMMERT (A/36)

Třepačka HAVER

Teploměr (A/526)

Datum: 16.11.2018

Zkoušku Provedl: D. Hořák

Tabulka 30 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti vzorek 2 . [1]

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 16.11.2018	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	LOKALITA Praha
	MATERIÁL R-materiál
	ČÍSLO VZORKU: 2.
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř	
VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál z deponie Herink	

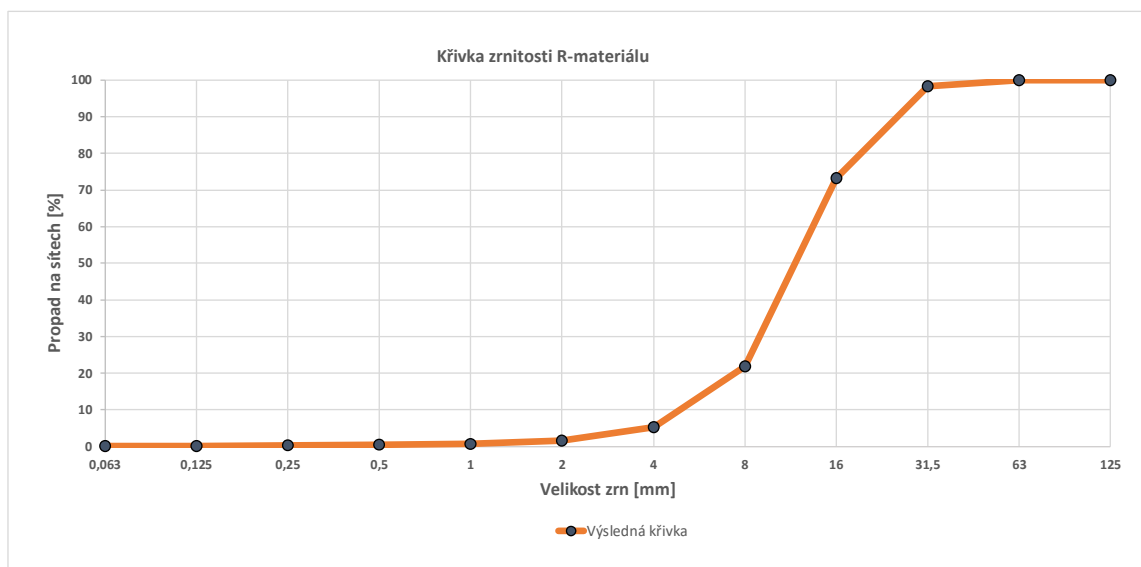
Síta	Propad zkoušeného materiálu [%]
63	100,00
31,5	98,23
16	73,29
8	21,82
4	5,25
2	1,65
1	0,77
0,5	0,49
0,25	0,30
0,125	0,15
0,063	0,05

Číslo nestejnozrnosti: C_u **2,7**
(ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Číslo křivost: C_c **1,2**
(ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Zatřídění zeminy: **G2 GP**
(ČSN 73 6133:2010)

Namrzavost : **materiál příliš hrubozrný**



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 44 – Protokol o zkoušce zrnitosti R-materiálu [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C3/4		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	98,23	80	100	ANO
16	73,29	40	100	ANO
8	21,82	28	100	ANO
4	5,25	20	100	NE
2	1,65	15	100	NE
1	0,77	11	88	NE
0,5	0,49	8	75	NE
0,25	0,30	5	60	NE
0,125	0,15	2	40	NE
0,063	0,05	0	15	ANO

Tabulka 31 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C_{3/4} [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C5/6 a vyšší		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	98,23	85	100	ANO
16	73,29	60	90	ANO
8	21,82	40	73	NE
4	5,25	27	61	NE
2	1,65	18	51	NE
1	0,77	12	41	NE
0,5	0,49	9	32	NE
0,25	0,30	7	24	NE
0,125	0,15	5	16	NE
0,063	0,05	3	11	NE

Tabulka 32 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C5/6 a vyšší [1]

Z uvedených tabulek jasně vyplývá, že samotný R-materiál nespĺňuje obecné požadavky na zrnitost kameniva tříd pevnosti C_{3/4} a C_{8/10} uvedených v ČSN 73 6124-1. Proto je nezbytně nutné doplnit jeho nedostatek jemných částic jiným materiálem.

Po odzkoušení obou materiálů se ukázalo, že jako vhodnější materiál pro využití výroby směsí je R-materiál s příměsí betonové stabilizace cementem oproti zcela čistému R-materiálu. Proto byl dále v experimentu využívám jen R-materiál s příměsí podkladní SC.

- **Popílek**

Tato složka nově zkoumaných směsí byla dovezena v množství 50 kg, za použití plastových obalů z elektrárny Chvaletice. Dle ČSN EN 933-10: 2010 bylo nutné provést zkoušku zrnitosti popílku díky prosévání proudem vzduchu. Kontrolně byl vzorek popílku podroben i zkoušce vlhkosti dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1, kde do vysoušecí nádoby o hmotnosti 426,6 g, byl přidán vzorek popílky. Spolu s nádobou vzorek vážil 2305,1 g. Po následném vysušení v troubě vážil spolu s nádobou 2304,2 g, tudíž vlhkost vzorku byla zcela nulová a vzorek byl považován za zcela suchý.

Dle ČSN EN 933-10 je stanovena hodnota suché zkušební navážky na 50 ± 1 g, což bylo splněno, neboť hmotnost zkoušeného popílku byla 50,23 g.

PROTOKOL O ZKOUŠCE ZRNITOSTI POPÍLKU PROSÉVÁNÍM PROUDEM VZDUCHU	
strana 1/1	číslo:
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ: 11.02.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu OBJEKT: Konstrukční vrstva VZOREK: Popílek Chvaletice DODAVATEL POPÍLKU: Elektrárna Chvaletice a.s. TŘÍDA SMĚSI: C 3/4; C 8/10

Zkouška provedena dle: **ČSN EN 933-10:2010**
Doba prosévání na jednotlivých sítích: **3 minuty**

Výsledek zkoušek:

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zkušební navážky popílku [g]	Hmotnost zůstatku popílku na sítu [g]	Procento hmotnosti zůstatku popílku na sítu [%]	Součtové procento hmotnosti zkušební navážky popílku propadlé sítím [%]
0,063	50,23	7,93	15,8	84,2
0,125		2,50	5,0	95,0
0,25		0,54	1,1	98,9
0,5		0,08	0,2	99,8
1		0,02	0,0	100,0
2		-	0,0	100,0

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

zkoušku

provedl: **D. Hořák**

datum vyhotovení: **11.02.2019**

Obrázek 45 – Protokol o zkoušce zrnitosti popílku proséváním proudem vzduchu [1]

84,2 % \geq 70 % \rightarrow VYHOVUJE

Zkoušený vzorek splňuje kritérium minimálního propadu sítem o velikosti 0,063 mm o hodnotě min. 70 % svého obsahu, tudíž vzorek vyhovuje.

- **Cement**

V mém experimentu bylo uvažováno s pevnostní třídou volně loženého cementu CEM II 32,5 R a 42,5 R z Radotína, kde bylo vycházeno z technických listů Českomoravského cementu, a.s. uváděného požadované fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti dle ČSN EN 197-1. Cement byl do laboratoře dopravován v plastových pytlích. Volný ložený cement byl vybrán z jednoduchého důvodu, šlo o možnost dovozu cementu přímo na místo realizace studené recyklace, kdy cisterna doplní dávkovač cementu v blízkosti zájmové stavby.

Cement CEM II 32,5 R obsahuje 65-79 % Portlanského slínku, 21-35 % Vysokopecní strusky a 0-5 % doplňujících složek.

CEM II/B-S 32,5 R

Portlandský struskový cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Radotín

Technický list

březen 2019

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti				
Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka			
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	9	EN 196-1	CaO	57,2	EN 196-2		
	2 dny	18	EN 196-1	SiO ₂	24,6	EN 196-2		
	7 dní	33	EN 196-1	Al ₂ O ₃	5,6	EN 196-2		
	28 dní	48	EN 196-1	Fe ₂ O ₃	2,1	EN 196-2		
	56 dní	56	EN 196-1	MgO	4,2	EN 196-2		
	90 dní	60	EN 196-1	SO ₃	2,1	EN 196-2		
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	2	EN 196-1	Cl ⁻	0,081	EN 196-2		
	2 dny	4	EN 196-1	K ₂ O	0,81	EN 196-2		
	7 dní	6	EN 196-1	Na ₂ O	0,22	EN 196-2		
	28 dní	9	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]	0,76	EN 196-2		
	56 dní	10	EN 196-1	Nerozpuštěný zbytek [%]	1,2	EN 196-2		
	90 dní	10	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,1	EN 196-2		
Normální konzistence [%]	28,7	EN 196-3						
Počátek tuhnutí [min]	245	EN 196-3						
Konec tuhnutí [min]	317	EN 196-3						
Objemová stálost [mm]	1,2	EN 196-3, Le Chatelier						
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	333	EN 196-6, Blaine						
Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]	3010	EN 196-6						
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v autocisterně	955	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.						
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v síle	1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.						
Hydratační teplo [J·g ⁻¹]	7 dní	260	EN 196-8					

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatácí				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

Obrázek 46 – Technický list cementu CEM II 32,5 R [7]

CEM II 42,5 R obsahuje naprosto totožné složení zastoupených hlavních složek jako CEM II 32,5 R. Jako jeho hlavní přednost vidím, rychlejší nárůst počáteční pevnosti.

CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N Portlandský směsný cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Radotín

Technický list

březen 2019

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti		
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	13	EN 196-1	CaO	59,5	EN 196-2
	2 dny	23	EN 196-1	SiO ₂	23,0	EN 196-2
	7 dní	38	EN 196-1	Al ₂ O ₃	5,1	EN 196-2
	28 dní	53	EN 196-1	Fe ₂ O ₃	2,2	EN 196-2
	56 dní	58	EN 196-1	MgO	3,4	EN 196-2
	90 dní	61	EN 196-1	SO ₃	2,1	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	3	EN 196-1	Cl ⁻	0,082	EN 196-2
	2 dny	5	EN 196-1	K ₂ O	0,77	EN 196-2
	7 dní	9	EN 196-1	Na ₂ O	0,19	EN 196-2
	28 dní	9	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]	0,70	EN 196-2
	56 dní	9	EN 196-1	Nerozpuštěný zbytek [%]	2,3	EN 196-2
	90 dní	9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	4,7	EN 196-2
Normální konzistence [%]		29,2	EN 196-3			
Počátek tuhnutí [min]		233	EN 196-3			
Konec tuhnutí [min]		306	EN 196-3			
Objemová stálost [mm]		1,2	EN 196-3, Le Chatelier			
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]		379	EN 196-6, Blaine			
Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]		2950	EN 196-6			
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v autocisterně		960	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.			
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v síle		1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.			
Hydratační teplo [J·g ⁻¹]	7 dní	280	EN 196-8			

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonátací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓ ^{b)}	✓	✓ ^{a)c)}	✓ ^{a)c)}	✓	✓ ^{d)}	✓ ^{b)}

Obrázek 47 – Technický list cementu CEM II 42,5 R [7]

- **Drobné kamenivo**

Jednalo se o přírodní drcené kamenivo frakce 0/4 mm, které pocházelo z provozovny Chomutovice, spadající pod firmu EUROVIA Kamenolomy, a.s. Hlavní využití spočívalo v doplnění drobné složky křivky zrnitosti samotného R-materiálu. Kamenný prach byl dovezen přímo z lomu v papírových pytlích o celkové hmotnosti 300 kg a uložen ve skladu laboratoře za běžné pokojové teploty. Požadavkem laboratorních zkoušek bylo stanovení přirozené vlhkosti materiálu, čísla nestejnozrnosti, čísla křivosti a namrzavosti, kde tyto zjištěné parametry vedly k zařazení materiálu dle ČSN 73 6133:2010.



Obrázek 48 – Skladování drobného kameniva frakce 0/4 mm [1]

Přirozená vlhkost zeminy byla stanovena za pomoci vysoušecí nádoby, která váží 390,01 g. Celková hmotnost zavlhlého vzorku spolu s vysoušecí nádobou vážila 1698,1 g. Po vysušení v peci byl vzorek i s nádobou opětovně zvážen a stanovil hmotnost suchého vzorku s nádobou na 1688,93 g.

Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti zemín

Zkoušený materiál:	PDK 0/4, Chomutovice	
Receptura:	C 3/4; C8/10	
Celková hmotnost vzorku:	772,61	[g]
Hmotnost vzorku pro jemnou část:	100,00	[g]

Prosevání (více než 90 % zrn je nad sítím 0,063 mm)			
Označení měřidla	Velikost síta [mm]	Zbytek na síti [g]	Propad [%]
A/237	125	-	100,00
A/238	63	-	100,00
A/193	31,5	0,00	100,00
A/244	16	0,00	100,00
A/245	8	0,00	100,00
A/246	4	25,00	96,76
A/234	2	158,84	76,21
A/233	1	118,25	60,90
A/232	0,5	108,60	46,84
A/231	0,25	107,45	32,94
A/473	0,125	89,50	21,35
A/227	0,063	70,40	12,24
	<i>Podsítné</i>	94,57	

Použité zkušební zařízení:

- Sada sítí označených zeleným proužkem*
- Hustoměr kalibrační*
- Váhy ARTORIUS (A/148)*
- Váhy KERN (A/533)*
- Sušárna MEMMERT (A/36)*
- Třepačka HAVER*
- Teploměr (A/526)*

Datum: 12.02.2019 Zkoušku Provedl: D. Hořák
 Tabulka 33 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti PDK 0/4 mm [1]

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 13.02.2019
STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
OBJEKT: Konstrukční vrstva
LOKALITA: Praha
MATERIÁL: 0/4 - Chomutovice
ČÍSLO VZORKU: 3.
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
VSTUPNÍ MATERIÁLY: PDK 0/4 - Chomutovice

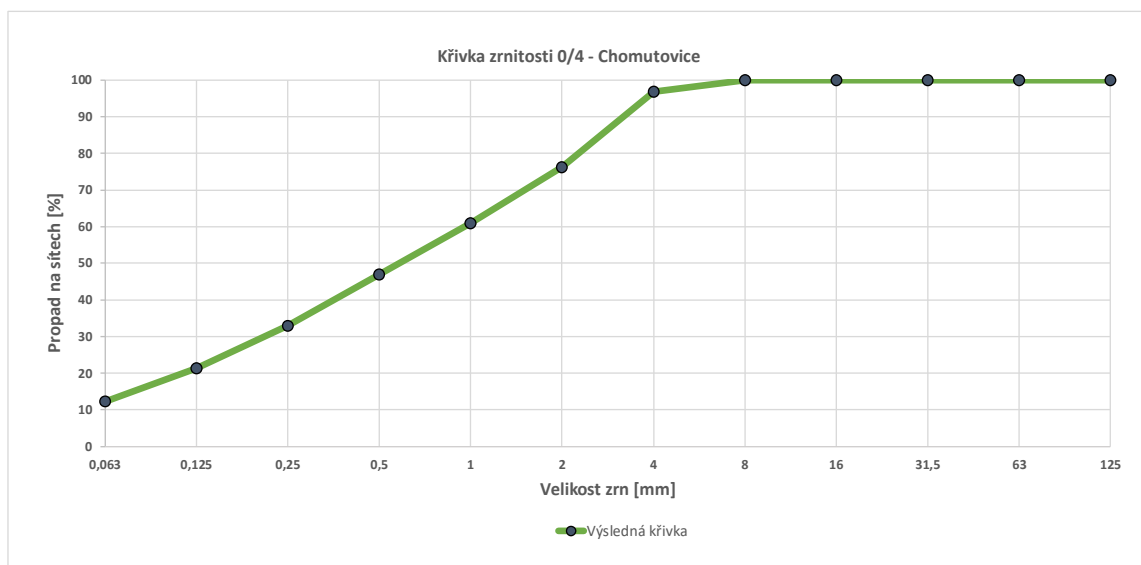
Síta	Propad zkoušeného materiálu [%]
63	100,00
31,5	100,00
16	100,00
8	100,00
4	96,76
2	76,21
1	60,90
0,5	46,84
0,25	32,94
0,125	21,35
0,063	12,24

Číslo nestejnozrnosti: C_u 18,0
 (ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Číslo křivost: C_c 0,9
 (ČSN CEN ISO TS 17892-4:2005)

Zatřídění zeminy: S3 S-F
 (ČSN 73 6133:2010)

Namrzavost: materiál namrzavý



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 49 - Protokol o zkoušce zrnitosti PDK 0/4 - Chomutovice [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C3/4		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	100,00	80	100	ANO
16	100,00	40	100	ANO
8	100,00	28	100	ANO
4	96,76	20	100	ANO
2	76,21	15	100	ANO
1	60,90	11	88	ANO
0,5	46,84	8	75	ANO
0,25	32,94	5	60	ANO
0,125	21,35	2	40	ANO
0,063	12,24	0	15	ANO

Tabulka 34 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C_{3/4} [1]

Velikost síta (mm)	Propad zkoušeného materiálu	Požadovaný propad zrn pro směs C5/6 a vyšší		Splňuje požadavek
		Minimum	Maximum	
45	100,00	100	100	ANO
31,5	100,00	85	100	ANO
16	100,00	60	90	NE
8	100,00	40	73	NE
4	96,76	27	61	NE
2	76,21	18	51	NE
1	60,90	12	41	NE
0,5	46,84	9	32	NE
0,25	32,94	7	24	NE
0,125	21,35	5	16	NE
0,063	12,24	3	11	NE

Tabulka 35 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C5/6 a vyšší [1]

Je zajímavé, že přírodní materiál frakce 0/4 mm splňuje požadavky na zrnitost kameniva tříd pevnosti C_{3/4} dle požadavku ČSN 73 6124-4. Pro vyšší třídu pevnosti C_{8/10} požadavky pochopitelně nesplňuje. Nicméně tento materiál bude plnit funkci doplňkovou, kdy bude R-materiálu doplňovat jemnou část křivky zrnitosti tak, aby jejich směs vyhovovala požadavkům ČSN 73 6124-4.

3.3.2 *Výsledky zkoušek stmelené směsi*

- REC 1

Tato navržená receptura SC_{3/4} se skládala z 90 % R-materiálu, dále z 10 % popílku a 6 % cementu 32,5 R a bylo nezbytné zjistit, zda směs splňuje obor křivky zrnitosti C_{1,5/2} a C_{3/4} a také stanovit její objemovou hmotnost při optimální vlhkosti dle zkoušky Proctor standart – modifikovaný.

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI PRO SMĚS ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 1,5/2 a C 3/4 podle ČSN 73 6124-1 Tab.3

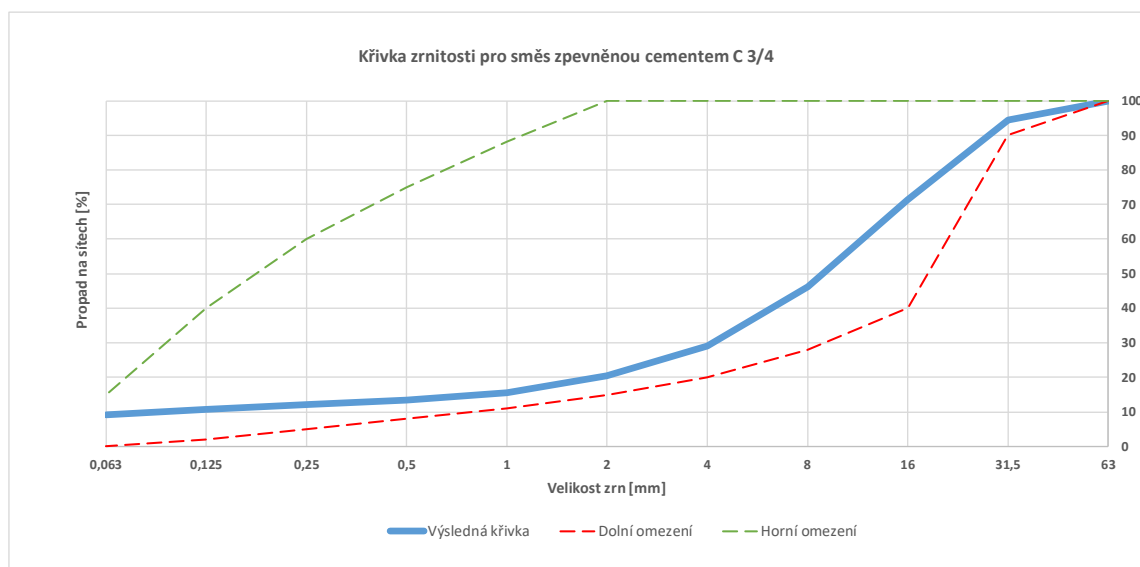
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 27.02.2019
STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
OBJEKT: Konstrukční vrstva
LOKALITA: Praha
MATERIÁL: Směs stmelená cementem C 3/4
ČÍSLO VZORKU: REC 1
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál, popílek, PDK 0/4 Chomutovice

Síta	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Výsledná křivka	Rozmezí pro C3/4		Vyhodnocení směsi	
					Dolní omezení	Horní omezení	Dolní omezení	Horní omezení
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	Splňuje	Splňuje
31,5	93,89	100,00	100,00	94,50	90	100	Splňuje	Splňuje
16	68,25	100,00	100,00	71,43	40	100	Splňuje	Splňuje
8	40,16	100,00	100,00	46,14	28	100	Splňuje	Splňuje
4	21,15	96,76	100,00	29,04	20	100	Splňuje	Splňuje
2	11,70	76,21	100,00	20,53	15	100	Splňuje	Splňuje
1	6,27	60,90	100,00	15,64	11	88	Splňuje	Splňuje
0,5	3,85	46,84	99,80	13,45	8	75	Splňuje	Splňuje
0,25	2,36	32,94	98,90	12,01	5	60	Splňuje	Splňuje
0,125	1,40	21,35	95,00	10,76	2	40	Splňuje	Splňuje
0,063	0,80	12,24	84,20	9,14	0	15	Splňuje	Splňuje

Pozn.: Dle ČSN 73 6124-1 JSOU MINIMÁLNÍ HODNOTY PROPADU NA SÍTECH 0,063, 0,125 A 0,250 JEN ORIENTAČNÍ A NEJSOU ZÁVAZNÉ

Podíl jednotlivých složek ve výsledné směsi v [%]					
Vzorek	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Směs	Vyhovuje
	90	0	10	100	ANO



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

Navržená směs splňuje požadavky ČSN 73 6124-1 Tab.3 na obor zrnitosti C1,5/2 a C3/4

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 50 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 1 [1]

Navržená suchá směs REC 1 splňuje požadavky ČSN 73 6124-1, Tab. 3 na obor zrnitosti C_{1,5/2} a C_{3/4}, tudíž směs vyhovuje.

Záznam o stanovení srovnání objemové hmotnosti a vlhkosti

Proctorova zkouška

Zkouška provedena podle ČSN EN 13 286-2:2011

Postup a sestava podle: č. 7.1 standard - pěch A, moždíř A
 č. 7.2 standard - pěch A, moždíř B
 č. 7.4 modifikovaný - pěch B, moždíř A
 č. 7.5 modifikovaný - pěch B, moždíř B

Hmotnost moždíře [g]:	9 569,00				
Objem moždíře [cm ³]:	2 120,58				
Počet hutněných vrstev:	5				
Počet úderů na vrstvu:	56				
Číslo válce:	1	2	3	4	5
Hmotnost válce + vlhké zeminy [g]	13 877,00	14 092,60	14 180,10	14 198,60	14 127,20
Hmotnost váženky + vlhké zeminy [g]	1 087,70	911,80	943,30	863,70	1 034,80
Hmotnost váženky + suché zeminy [g]	1 045,10	867,60	889,10	806,40	953,40
Číslo váženky/hmotnost prázdné váženky [g]	17/62,0	9/64,2	18/56,6	21/62,5	7/60,6

Použité zkušební zařízení: *Automatický přístroj infraTest (ZZ 643)*
 Váhy KERN (A/523; A/533)
 Sušárna Memmert (A/36)
 Zkušební síto 16 mm (A/244)
 Zkušební síto 31,5 mm (A/193)

Zkoušku provedl: **D. Hořák**

Datum provedení: 26.2.2019

Tabulka 36 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 1 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	m _o [g]	m _w [g]	W [%]
1	62	1087,7	1045,1	983,1	42,6	4,33
2	64,2	911,8	867,6	803,4	44,2	5,50
3	56,6	943,3	889,1	832,5	54,2	6,51
4	62,5	863,7	806,4	743,9	57,3	7,70
5	60,6	1034,8	953,4	892,8	81,4	9,12

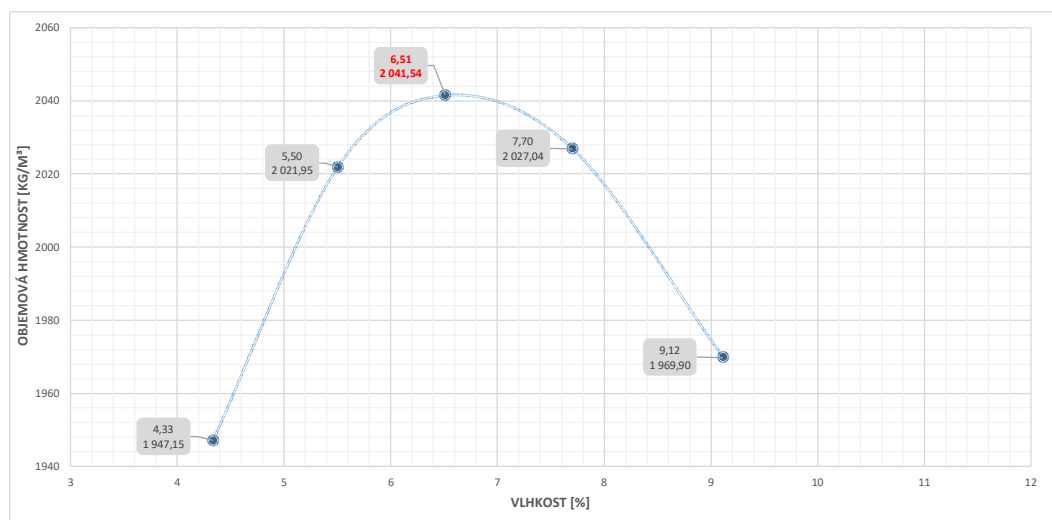
Tabulka 37 – Stanovení vlhkosti těles REC 1 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]	ρd [kg/m ³]
1	9 569,00	13 877,00	2 120,58	2 031,52	1 947,15
2	9 569,00	14 092,60	2 120,58	2 133,19	2 021,95
3	9 569,00	14 180,10	2 120,58	2 174,45	2 041,54
4	9 569,00	14 198,60	2 120,58	2 183,18	2 027,04
5	9 569,00	14 127,20	2 120,58	2 149,51	1 969,90

Tabulka 38 – Stanovení objemové hmotnosti těles REC 1 [1]

PROTOKOL O ZHUTNITELNOSTI SMĚSI ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 3/4	
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ:	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
27.02.2019	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	LOKALITA Praha
	MATERIÁL Směs stmelená cementem C 3/4
	ČÍSLO VZORKU: REC 1
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 6 % CEMENTU 32,5 R

Zkoušky byly provedeny podle: ČSN EN 13 286-2 OPRAVA 1 08/2014 ČL. 7.5 MODIFIKOVANÝ – PĚCH B, MOŽDÍŘ B
Maximální objemová hmotnost: **2041,54 [kg/m³]**
Při optimální vlhkosti: **6,51 [%]**



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 51 – Protokol o zhutnitelnosti směsi REC 1 [1]

Zkouškou Proctor-modifikovaný byly zjištěny tyto parametry směsi REC 1. Maximální objemová hmotnost 2041,54 kg/m³ a optimální vlhkost 6,51 %.

Receptura (REC 1) na výrobu 1 m³ směsi ve váhovém vyjádření:

- R-materiál (90 %)	1727,14 kg
- Popílek (10 %)	191,9 kg
- Cement 32,5 R (6 %)	122,5 kg
- Suchá směs (100 %)	2041,54 kg
- Voda (6,51 %)	132,9 litrů

- REC 2

Navržená receptura č.2 se skládala z 90 % R-materiálu, dále 10 % popílku a 8 % cementu 42,5 R. Dávkování cementu bylo záměrně navýšeno a zároveň byla zvolena i vyšší pevnost cementu z důvodu cílení na směs C_{8/10}. Rovněž bylo nejprve nezbytné zjistit, zda směs splňuje požadované křivky zrnitosti, dále stanovit její objemovou pevnost při optimální vlhkosti a prověřit materiál z hlediska pevnosti v tlaku.

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI PRO SMĚS ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 8/10 podle ČSN 73 6124-1 Tab.4

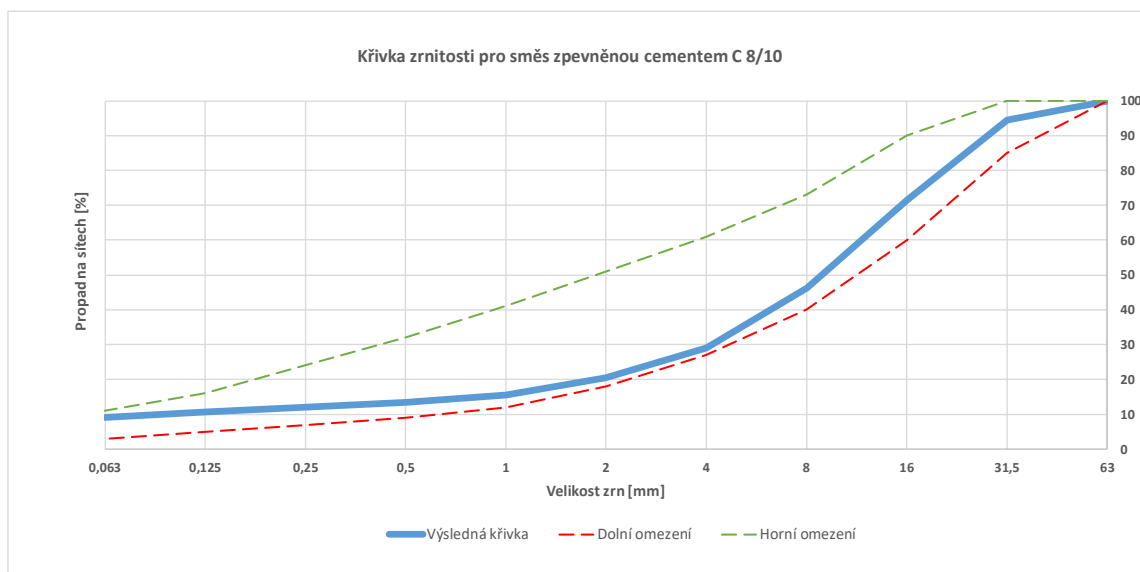
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 27.02.2019
STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
OBJEKT: Konstrukční vrstva
LOKALITA: Praha
MATERIÁL: Směs stmelená cementem C 8/10
ČÍSLO VZORKU: REC 2
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál, popílek, PDK 0/4 Chomutovice

Síta	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Výsledná křivka	Rozmezí pro C5/6 a vyšší		Vyhodnocení směsi	
					Dolní omezení	Horní omezení	Dolní omezení	Horní omezení
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	Splňuje	Splňuje
31,5	93,89	100,00	100,00	94,50	85	100	Splňuje	Splňuje
16	68,25	100,00	100,00	71,43	60	90	Splňuje	Splňuje
8	40,16	100,00	100,00	46,14	40	73	Splňuje	Splňuje
4	21,15	96,76	100,00	29,04	27	61	Splňuje	Splňuje
2	11,70	76,21	100,00	20,53	18	51	Splňuje	Splňuje
1	6,27	60,90	100,00	15,64	12	41	Splňuje	Splňuje
0,5	3,85	46,84	99,80	13,45	9	32	Splňuje	Splňuje
0,25	2,36	32,94	98,90	12,01	7	24	Splňuje	Splňuje
0,125	1,40	21,35	95,00	10,76	5	16	Splňuje	Splňuje
0,063	0,80	12,24	84,20	9,14	3	11	Splňuje	Splňuje

Pozn.: Dle ČSN 73 6124-1 JSOU MINIMÁLNÍ HODNOTY PROPADU NA SÍTECH 0,063, 0,125 A 0,250 JEN ORIENTAČNÍ A NEJSOU ZÁVAZNÉ

Podíl jednotlivých složek ve výsledné směsi v [%]					
Vzorek	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Směs	Vyhovuje
	90	0	10	100	ANO



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

Navržená směs splňuje požadavky ČSN 73 6124-1 Tab.4 na obor zrnitosti C5/6 0/32 a vyšší.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 52 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 2 [1]

Navržená suchá směs REC 2 splňuje požadavky ČSN 73 6124-1, Tab. 3 na obor zrnitosti C_{5/6} a vyšší, tudíž směs vyhovuje.

Záznam o stanovení srovnání objemové hmotnosti a vlhkosti

Proctorova zkouška

Zkouška provedena podle ČSN EN 13 286-2:2011

Postup a sestava podle: č. 7.1 standard - pěch A, moždíř A
 č. 7.2 standard - pěch A, moždíř B
 č. 7.4 modifikovaný - pěch B, moždíř A
 č. 7.5 modifikovaný - pěch B, moždíř B

Hmotnost moždíře [g]:	9 569,00				
Objem moždíře [cm ³]:	2 120,58				
Počet hutněných vrstev:	5				
Počet úderů na vrstvu:	56				
Číslo válce:	1	2	3	4	5
Hmotnost válce + vlhké zeminy [g]	13 806,50	14 032,80	14 180,20	14 218,40	14 146,70
Hmotnost váženky + vlhké zeminy [g]	1 117,70	911,80	946,30	863,70	1 003,00
Hmotnost váženky + suché zeminy [g]	1 088,70	875,60	892,10	805,90	929,70
Číslo váženky/hmotnost prázdné váženky [g]	7/58,9	8/61,5	28/56,9	11/61,1	16/59,1

Použité zkušební zařízení: *Automatický přístroj infraTest (ZZ 643)*
 Váhy KERN (A/523; A/533)
 Sušárna Memmert (A/36)
 Zkušební síto 16 mm (A/244)
 Zkušební síto 31,5 mm (A/193)

Zkoušku provedl: **D. Hořák**

Datum provedení: 27.2.2019

Obrázek 53 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 2 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	m _o [g]	m _w [g]	W [%]
1	58,9	1 117,70	1 088,70	1029,8	29	2,82
2	61,5	911,80	875,60	814,1	36,2	4,45
3	56,9	946,30	892,10	835,2	54,2	6,49
4	61,1	863,70	805,90	744,8	57,8	7,76
5	59,1	1 003,00	929,70	870,6	73,3	8,42

Tabulka 39 – Stanovení vlhkosti těles REC 2 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]	ρ _d [kg/m ³]
1	9 569,00	13 806,50	2 120,58	1 998,27	1 943,54
2	9 569,00	14 032,80	2 120,58	2 104,99	2 015,37
3	9 569,00	14 180,20	2 120,58	2 174,50	2 041,99
4	9 569,00	14 218,40	2 120,58	2 192,51	2 034,62
5	9 569,00	14 146,70	2 120,58	2 158,70	1 991,06

Tabulka 40 – Stanovení objemové hmotnosti REC 2 [1]

PROTOKOL O ZHUTNITELNOSTI SMĚSI ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 8/10

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera

STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu

DATUM ZKOUŠENÍ: OBJEKT: Konstrukční vrstva

27.02.2019 LOKALITA Praha

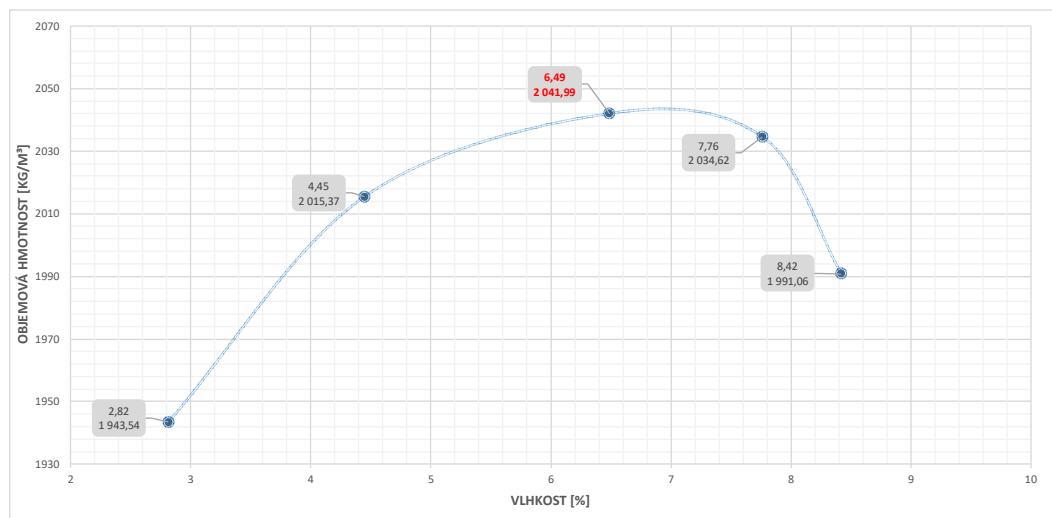
MATERIÁL Směs stmelená cementem C 8/10

ČÍSLO VZORKU: REC 2

MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř

VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 8 % CEMENTU 42,5 R

Zkoušky byly provedeny podle: ČSN EN 13 286-2 OPRAVA 1 08/2014 ČL. 7.5 MODIFIKOVANÝ - PĚCH B, MOŽDÍŘ B
 Maximální objemová hmotnost: **2 041,99 [kg/m³]**
 Při optimální vlhkosti: **6,49 [%]**



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 54 – Protokol o zhutnitelnosti směsi REC 2 [1]

Zkouškou Proctor-modifikovaný byly zjištěny tyto parametry směsi REC 2. Maximální objemová hmotnost 2041,99 kg/m³ a optimální vlhkost 6,49 %.

Receptura (REC 2) na výrobu 1 m³ směsi ve váhovém vyjádření:

- R-materiál (90 %)	1690,77 kg
- Popílek (10 %)	187,86 kg
- Cement 42,5 R (8 %)	163,36 kg
- Suchá směs (100 %)	2041,99 kg
- Voda (6,49 %)	132,53 litrů

- REC 3

Z důvodu nesplnění požadavků na třídu C_{8/10} u REC 2, bylo nutné upravit složení směsi a provést opět kontrolní laboratorní zkoušky. Navrhovaná receptura č. 3 se skládala z 80 % R-materiálu, 10 % popílku, 10 %, PDK frakce 0/4 mm a opět 8 % cementu 42,5 R. Opět byl použit cement 42,5 R z důvodu dosažení vyšší pevnosti a předpokladu splnění kritérií na třídu C_{8/10}.

SESTAVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI PRO SMĚS ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 8/10 podle ČSN 73 6124-1 Tab.4

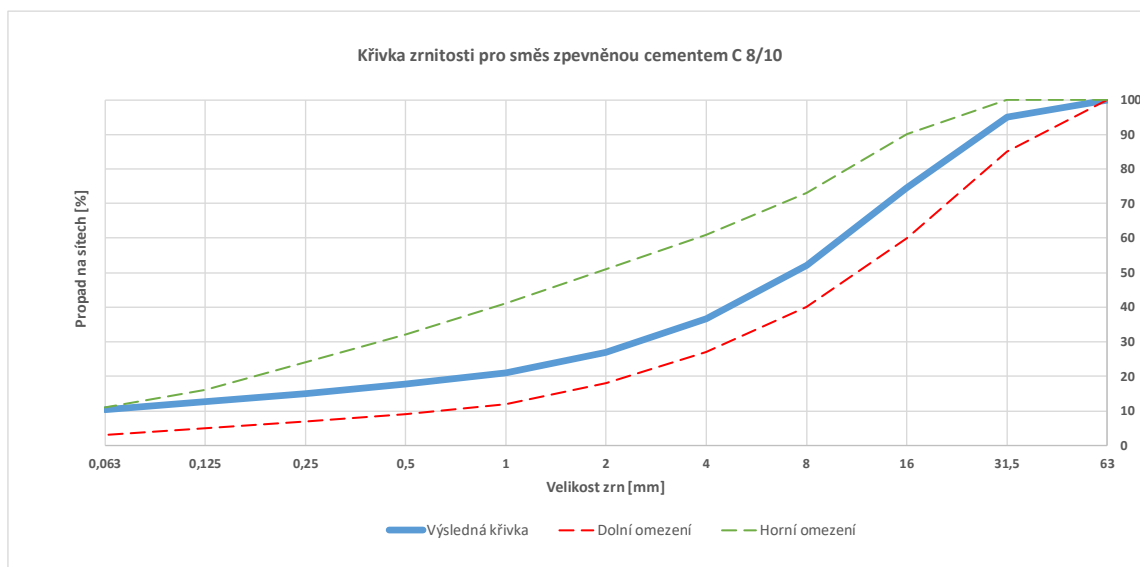
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 27.02.2019
STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
OBJEKT: Konstrukční vrstva
LOKALITA: Praha
MATERIÁL: Směs stmelená cementem C 8/10
ČÍSLO VZORKU: REC 3
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál, popílek, PDK 0/4 Chomutovice

Síta	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Výsledná křivka	Rozmezí pro C5/6 a vyšší		Vyhodnocení směsi	
					Dolní omezení	Horní omezení	Dolní omezení	Horní omezení
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	Splňuje	Splňuje
31,5	93,89	100,00	100,00	95,11	85	100	Splňuje	Splňuje
16	68,25	100,00	100,00	74,60	60	90	Splňuje	Splňuje
8	40,16	100,00	100,00	52,13	40	73	Splňuje	Splňuje
4	21,15	96,76	100,00	36,60	27	61	Splňuje	Splňuje
2	11,70	76,21	100,00	26,98	18	51	Splňuje	Splňuje
1	6,27	60,90	100,00	21,11	12	41	Splňuje	Splňuje
0,5	3,85	46,84	99,80	17,74	9	32	Splňuje	Splňuje
0,25	2,36	32,94	98,90	15,07	7	24	Splňuje	Splňuje
0,125	1,40	21,35	95,00	12,76	5	16	Splňuje	Splňuje
0,063	0,80	12,24	84,20	10,28	3	11	Splňuje	Splňuje

Pozn.: Dle ČSN 73 6124-1 JSOU MINIMÁLNÍ HODNOTY PROPADU NA SÍTECH 0,063, 0,125 A 0,250 JEN ORIENTAČNÍ A NEJSOU ZÁVAZNÉ

Podíl jednotlivých složek ve výsledné směsi v [%]					
Vzorek	R-materiál	PDK 0/4	Popílek	Směs	Vyhovuje
	80	10	10	100	ANO



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušený vzorek.

Navržená směs splňuje požadavky ČSN 73 6124-1 Tab.4 na obor zrnitosti C5/6 0/32 a vyšší.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 55 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 3 [1]

Navržená suchá směs REC 3 splňuje požadavky ČSN 73 6124-1, Tab. 3 na obor zrnitosti C5/6 a vyšší, tudíž směs vyhovuje.

Záznam o stanovení srovnání objemové hmotnosti a vlhkosti

Proctorova zkouška

Zkouška provedena podle ČSN EN 13 286-2:2011

Postup a sestava podle:

č. 7.1 standard - pěch A, moždíř A

č. 7.2 standard - pěch A, moždíř B

č. 7.4 modifikovaný - pěch B, moždíř A

č. 7.5 modifikovaný - pěch B, moždíř B

Hmotnost moždíře [g]:	9 568,70				
Objem moždíře [cm ³]:	2 120,58				
Počet hutněných vrstev:	5				
Počet úderů na vrstvu:	56				
Číslo válce:	1	2	3	4	5
Hmotnost válce + vlhké zeminy [g]	13 879,60	14 069,90	14 221,60	14 242,60	14 219,70
Hmotnost váženky + vlhké zeminy [g]	842,30	911,80	895,90	818,20	1 051,40
Hmotnost váženky + suché zeminy [g]	818,80	875,60	844,90	765,90	976,90
Číslo váženky/hmotnost prázdné váženky [g]	14/57,2	20/63,7	1/61,7	25/58,5	4/63,0

Použité zkušební zařízení:

Automatický přístroj infraTest (ZZ 643)

Váhy KERN (A/523; A/533)

Sušárna Memmert (A/36)

Zkušební síto 16 mm (A/244)

Zkušební síto 31,5 mm (A/193)

Zkoušku provedl: **D. Hořák**

Datum provedení: 28.2.2019

Obrázek 56 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 3 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	m _o [g]	m _w [g]	W [%]
1	58,9	842,30	818,80	759,9	23,5	3,09
2	61,5	911,80	875,60	814,1	36,2	4,45
3	56,9	895,90	844,90	788,0	51,0	6,47
4	61,1	818,20	765,90	704,8	52,3	7,42
5	59,1	1 051,40	976,90	917,8	74,5	8,12

Tabulka 41 – Stanovení vlhkosti těles REC 3 [1]

Těleso	m1 [g]	m2 [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]	ρ _d [kg/m ³]
1	9 568,70	13 879,60	2 120,58	2 032,89	1 971,91
2	9 568,70	14 069,90	2 120,58	2 122,63	2 032,26
3	9 568,70	14 221,60	2 120,58	2 194,16	2 060,79
4	9 568,70	14 242,60	2 120,58	2 204,07	2 051,81
5	9 568,70	14 219,70	2 120,58	2 193,27	2 028,60

Tabulka 42 – Stanovení objemové hmotnosti REC 3 [1]

PROTOKOL O ZHUTNITELNOSTI SMĚSI ZPEVNĚNOU CEMENTEM C 8/10

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera

STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu

DATUM ZKOUŠENÍ: OBJEKT: Konstrukční vrstva

28.02.2019

LOKALITA Praha

MATERIÁL Směs stmelená cementem C 8/10

ČÍSLO VZORKU: REC 3

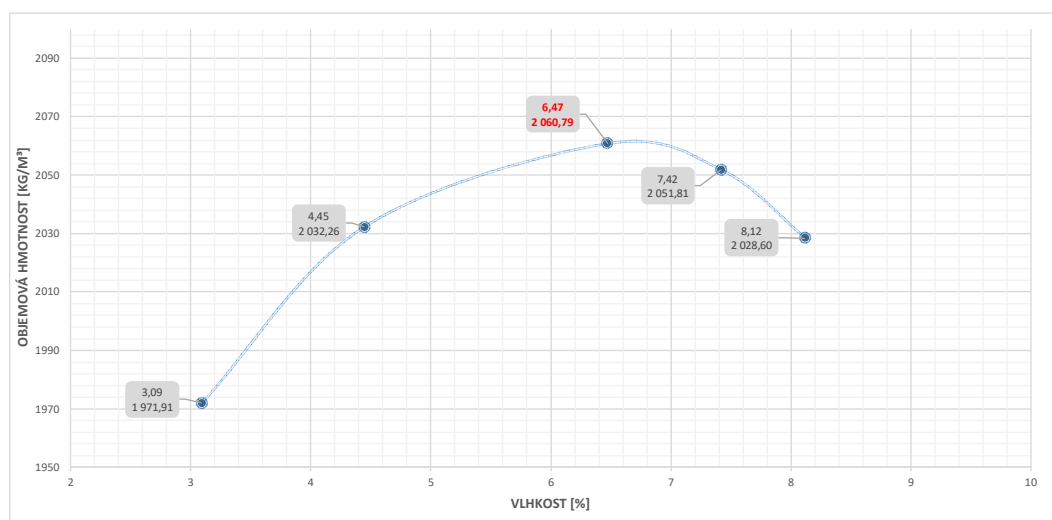
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř

VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 80 %, POPÍLEK 10 %, 10 % PDK 0/4 mm A 8 % CEMENTU 42,5 R

Zkoušky byly provedeny podle: ČSN EN 13 286-2 OPRAVA 1 08/2014 ČL. 7.5 MODIFIKOVANÝ - PĚCH B, MOŽDÍŘ B

Maximální objemová hmotnost: 2 060,79 [kg/m³]

Při optimální vlhkosti: 6,47 [%]



prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 57 – Protokol o zhutnitelnosti směsi stmelené cementem REC 3 [1]

Zkouškou Proctor-modifikovaný byly zjištěny tyto parametry směsi REC 3. Maximální objemová hmotnost 2060,79 kg/m³ a optimální vlhkost 6,47 %.

Receptura (REC 3) na výrobu 1 m³ směsi ve váhovém vyjádření:

- R-materiál (80 %)	1516,75 kg
- Popílek (10 %)	189,59 kg
- PDK frakce 0/4 (10 %)	189,59 kg
- Cement 42,5 R (8 %)	164,86 kg
- Suchá směs (100 %)	2060,79 kg
- Voda (6,47 %)	133,33 litrů

- REC 4

Tato směs vychází z návrhu receptury REC 1, která je z ekonomického hlediska upravena obsahem cementu 32,5 na 5 %.

Zkouškou Proctor-modifikovaný byly zjištěny tyto parametry směsi. Maximální objemová hmotnost 2041,54 kg/m³ a optimální vlhkost 6,51 %.

Receptura (REC 4) na výrobu 1 m³ směsi ve váhovém vyjádření:

- R-materiál (90 %)	1745,52 kg
- Popílek (10 %)	193,95 kg
- Cement 32,5 R (5 %)	102,07 kg
- Suchá směs (100 %)	2041,54 kg
- Voda (6,51 %)	132,9 litrů

3.3.3 Výsledky zkoušek ztvrdlé směsi

- REC 1

Z ideálně zavlhle konzistence směsi byla vyrobena vždy jedna sada zkušebních válců Ø 150 mm dle ČSN EN 13286-50:2005. Jedna sada obsahovala minimálně 9 zkušebních těles, které byly následně zkoušeny z hlediska pevnosti v tlaku po 7 dnech a 28 dnech. A následně po 42 dnech na odolnost proti mrazu a vodě. Na základě předešlých zkoušek a zkušeností, které laboratoř měla, bylo stanoveno, že pro vytvoření REC 1, C_{3/4} použijeme tyto vstupy:

- 90 % R-materiálu	(5094 g)
- 10 % popílku	(566 g)
- 6 % cementu 32,5 R	(340 g)
- Celková suchá směs	(6000 g)
- Uvažovaná vlhkost 7,6 %	(456 ml)

Záznam o zkoušení těles ze směsí stmelných hydraulickými pojivy

Odběr vzorku a výroba těles dle ČSN EN 13 286-50/ TP 208									
Označení směsi:	SC 3/4			Obj. hmotnost suché směsi:	1 969 kg/m ³				
Vlhkost směsi:	7,60%			Obj. hmotnost vlhké směsi:	2 119 kg/m ³				
Datum a čas odběru vzorku:	27.2.2019 v 9:30 Hod.								
Číslo formy:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost formy [kg :]	A - 10,088	B - 10,093	A	B	A	B	A	B	A
Hmotnost naplněné formy [kg]	14,534	14,523	14,595	14,515	14,631	14,558	14,591	14,587	14,699
Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg/m ³]	2098	2090	2126	2086	2143	2107	2125	2120	2176

Tabulka 43 – Záznam zkoušení těles REC 1 [1]

Těleso po odformování Ø 150 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,429	4,436	4,507	4,43	4,536	4,464	4,491	4,485	4,589
Výška 1 [mm]	121,00	120,90	120,80	120,70	121,40	119,90	121,70	120,80	122,60
Výška 2 [mm]	120,50	120,30	120,70	120,70	120,90	120,30	120,70	120,30	121,00
Výška 3 [mm]	121,10	120,20	121,60	120,20	120,60	120,10	120,80	120,50	121,80
Výška 4 [mm]	121,20	120,70	120,50	120,90	121,50	120,00	120,80	121,40	120,70
Průměrná výška tělesa [mm]	120,95	120,53	120,90	120,63	121,10	120,08	121,00	120,75	121,53
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 067	2 077	2 104	2 073	2 114	2 098	2 095	2 096	2 131

Tabulka 44 – Tělesa po odformování REC 1 [1]

Zkouška odolnosti směsi proti mrazu a vodě									
Datum zahájení zkoušky:	28.03.2019								
Datum ukončení zkoušky	10.04.2019								
Zkouška pevnosti v tlaku	Po 7 dnech			Po 28 dnech			Po zkoušce odolnosti		
Datum zkoušky:	06.03.2019			27.03.2019			10.04.2019		
Stáří těles [den]:	7			28			42		
Tělesa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,468	4,469	4,534	4,475	4,562	4,496	4,548	4,541	4,633
Změna hmotnosti tělesa [%], tolerance ≤ - 2 %	0,88	0,74	0,60	1,02	0,57	0,72	1,27	1,25	0,96
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 085	2 093	2 117	2 094	2 126	2 113	2 121	2 122	2 151
Maximální síla F [kN]	85,8	77,9	84,6	110,9	120,4	120,6	107,4	99,5	106,4
Pevnost v tlaku tělesa Rc [MPa]	4,9	4,4	4,8	6,3	6,8	6,8	6,1	5,6	6
Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	4,7			6,63			5,9		
Kontrola: jednotlivé výsledky pevnosti v tlaku se od průměru nesmí lišit o více než ± 15 %	3,995 MPa - 5,405 MPa			5,635 MPa - 7,625 MPa			5,015 MPa - 6,785 MPa		
Vyhovuje dle ČSN EN 13286-41	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 45 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě REC 1 [1]

**PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU
SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY**

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 06.03.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu	DATUM VÝROBY: 27.02.2019
	OBJEKT: Konstrukční vrstva	ČAS VÝROBY: 9:30
	LOKALITA Praha	ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm
	MATERIÁL Směs stmelená cementem C 3/4	ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost
	ČÍSLO VZORKU: REC 1	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1969 kg/m³
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE: 7 DNÍ	VLHKOST SMĚSI W: 7,60%
MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 6 % CEMENTU 32,5 R	

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po zhutnění ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změřená výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Průměrná pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)
Jednotky	kg/m ³	kg	mm	kg	%	kg/m ³	kN	MPa	MPa
1	2098	4,429	121	4,468	0,88	2085	85,8	4,9	4,7
2	2090	4,436	120,5	4,469	0,74	2093	79,9	4,4	
3	2126	4,507	120,9	4,534	0,6	2117	84,6	4,8	

- POZNÁMKY:**
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem $d=150$ mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h .
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. – 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 58 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 1 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 1 je po 7 dnech průměrně 4,7 MPa, což s velkou rezervou splňuje požadavek pevnostní třídy C_{3/4}, neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1.

**PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU
SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY**

ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera

DATUM ZKOUŠENÍ: 27.02.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu	DATUM VÝROBY: 27.02.2019
	OBJEKT: Konstrukční vrstva	ČAS VÝROBY: 9:30
	LOKALITA Praha	ZKOUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm
	MATERIÁL Směs stmelená cementem C 3/4	ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost
	ČÍSLO VZORKU: REC 1	KOUSHKA ODOLNOSTI SMĚSI PROTI MRAZU A VODĚ 28.3.2019 až 10.4.2019
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI 28 DNÍ	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1969 kg/m³
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE ODOLNOST 42 DNÍ	VLHKOST SMĚSI W: 7,60%
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř	
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 6 % CEMENTU 32,5 R	

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po ztuhnutí ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změrná výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 7)
Jednotky	kg/m ³	kg	mm	kg	%	kg/m ³	kN	MPa	MPa
4	2086	4,43	120,6	4,475	1,02	2094	110,9	6,3	-
5	2143	4,536	121,1	4,562	0,57	2126	120,4	6,8	-
6	2107	4,464	120,1	4,496	0,72	2113	120,6	6,8	-
7	2125	4,491	121	4,548	1,27	2121	107,4	-	6,1
8	2120	4,485	120,8	4,541	1,25	2122	99,5	-	5,6
9	2176	4,589	121,6	4,633	0,96	2151	106,4	-	6

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem $d=150$ mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h .
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. - 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.
 - 7) Zkouška odolnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě provedena dle ČSN 73 6124-1, příloha A. Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 59 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 1 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 1 je po 28 dnech průměrně 6,6 MPa, což s velkou rezervou splňuje požadavek pevnostní třídy C_{3/4}, neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1.

Zároveň REC 1 vykazuje průměrnou pevnost v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 5,9 MPa, což také splňuje s velkou rezervou požadavek pevnostní třídy C_{3/4}.

Takto navržená receptura jen těsně nespĺňuje požadavky na pevnostní třídu C_{5/6}, proto budou z hlediska zmenšení nákladů na výrobu směsi zhotovena průkazní tělesa stejné receptury s upraveným dávkováním cementu 32,5 R na 5 %.

- REC 2

Z ideálně zavlhlé konzistence směsi REC 2 byla vyrobena vždy jedna sada zkušebních válců Ø 150 mm dle ČSN EN 13286-50:2005. Jedna sada obsahovala minimálně 9 zkušebních těles, které byly následně zkoušeny z hlediska pevnosti v tlaku po 7 dnech a 28 dnech. A následně po 42 dnech na odolnost proti mrazu a vodě. Pro experiment REC 2 byly použity tyto vstupy:

- 90 % R-materiálu (5002,56 g)
- 10 % popílku (555,84 g)
- 8 % cementu 42,5 R (441,6 g)
- Celková suchá směs (6000 g)
- Uvažovaná vlhkost 7,2 % (432 ml)

Záznam o zkoušení těles ze směsí stmelených hydraulickými pojivy

Odběr vzorku a výroba těles dle ČSN EN 13 286-50/ TP 208)									
Označení směsi:	SC 8/10		Obj. hmotnost suché směsi:		1 942 kg/m ³				
Vlhkost směsi:	7,20%		Obj. hmotnost vlhké směsi:		2 082 kg/m ³				
Datum a čas odběru vzorku:	1.3.2019 v 8:00 Hod.								
Číslo formy:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost formy [kg :]	A - 10,331	B - 10,331	A	B	A	B	A	B	A
Hmotnost naplněné formy [kg]	14,767	14,732	14,717	14,742	14,768	14,722	14,712	14,691	14,836
Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg/m ³]	2093	2076	2069	2081	2093	2072	2067	2057	2126

Tabulka 46 – Záznam o zkoušení těles REC 2 [1]

Těleso po odformování Ø 150 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,465	4,431	4,441	4,423	4,456	4,422	4,408	4,400	4,513
Výška 1 [mm]	120,20	121,40	121,50	120,00	121,20	120,80	120,90	120,80	120,10
Výška 2 [mm]	120,30	121,40	120,10	120,60	120,10	121,10	120,90	121,60	121,60
Výška 3 [mm]	120,60	120,30	121,10	121,60	121,70	121,00	120,10	120,70	121,60
Výška 4 [mm]	121,30	120,70	121,20	121,20	120,50	121,80	121,10	121,70	120,20
Průměrná výška tělesa [mm]	120,60	120,95	120,98	120,85	120,88	121,18	120,75	121,20	120,88
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 089	2 068	2 072	2 066	2 081	2 060	2 056	2 049	2 107

Tabulka 47 – Těleso po odformování REC 2 [1]

Zkouška odolnosti směsi proti mrazu a vodě									
Datum zahájení zkoušky:	30.03.2019								
Datum ukončení zkoušky	12.04.2019								
Zkouška pevnosti v tlaku	Po 7 dnech			Po 28 dnech			Po zkoušce odolnosti		
Datum zkoušky:	08.03.2019			29.03.2019			12.04.2019		
Stáří těles [den]:	7			28			42		
Tělesa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,474	4,444	4,475	4,441	4,473	4,431	4,494	4,505	4,533
Změna hmotnosti tělesa [%], tolerance $\leq - 2 \%$	0,20	0,29	0,77	0,41	0,38	0,20	1,95	2,39	0,53
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 094	2 074	2 088	2 074	2 088	2 064	2 096	2 098	2 118
Maximální síla F [kN]	85,8	84,4	93,8	118,3	126,4	123,9	116,3	99,8	112,1
Pevnost v tlaku tělesa Rc [MPa]	4,9	4,8	5,3	6,7	7,2	7	6,6	5,7	6,4
Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	5,0			7,0			6,2		
Kontrola: jednotlivé výsledky pevnosti v tlaku se od průměru nesmí lišit o více než $\pm 15 \%$	4,25 MPa - 5,75 MPa			5,95 MPa - 8,05 MPa			5,27 MPa - 7,13 MPa		
Vyhovuje dle ČSN EN 13286-41	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 48 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnost proti vodě REC 2 [1]

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY	
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ:	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
08.03.2019	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	LOKALITA: Praha
	MATERIÁL: Směs stmelena cementem C 8/10
	ČÍSLO VZORKU: REC 2
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE: 7 DNÍ
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
	DATUM VÝROBY: 01.03.2019
	ČAS VÝROBY: 8:00
	ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm
	ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost
	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1942 kg/m³
	VLHKOST SMĚSI W: 7,20%
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 8 % CEMENTU 42,5 R

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelena hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelena cementem po zhuštění ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změřená výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelena cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelena cementem v tlaku Rc 6)	Průměrná pevnost směsi stmelena cementem v tlaku Rc 6)
Jednotky	kg/m ³	kg	mm	kg	%	kg/m ³	kN	MPa	MPa
1	2093	4,465	120,6	4,474	0,2	2094	85,8	4,9	5,0
2	2076	4,431	120,95	4,444	0,29	2074	84,4	4,8	
3	2069	4,441	120,98	4,475	0,77	2088	93,8	5,3	

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa).
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem $d=150$ mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h .
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. – 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl. 7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 60 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 2 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 2 je po 7 dnech průměrně 5,0 MPa, což nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10},

neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY	
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ: 29.03.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu OBJEKT: Konstrukční vrstva LOKALITA Praha MATERIÁL Směs stmelená cementem C 8/10 ČÍSLO VZORKU: REC 2 STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI 28 DNÍ STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE ODOLNOST 42 DNÍ MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 8 % CEMENTU 42,5 R
	DATUM VÝROBY: 01.03.2019 ČAS VÝROBY: 8:00 ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost KOUŠKA ODOLNOSTI SMĚSI PROTI MRAZU A VODĚ 30.3.2019 až 12.4.2019 OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1942 kg/m³ VLHKOST SMĚSI W: 7,20%

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po zhutnění ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změřená výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 7)
Jednotky	kg/m³	kg	mm	kg	%	kg/m³	kN	MPa	MPa
4	2081	4,423	120,85	4,441	0,41	2074	118,3	6,7	–
5	2093	4,456	120,88	4,473	0,38	2088	126,4	7,2	–
6	2072	4,422	121,18	4,431	0,20	2064	123,9	7	–
7	2067	4,408	120,75	4,494	1,95	2096	116,3	–	6,6
8	2057	4,400	121,20	4,505	2,39	2098	99,8	–	5,7
9	2126	4,513	120,88	4,537	0,53	2118	112,5	–	6,4

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem $d=150$ mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h .
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. – 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.
 - 7) Zkouška odolnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě provedena dle ČSN 73 6124-1, příloha A. Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 61 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 2 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 2 je po 28 dnech průměrně 7,0 MPa, což nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10}, neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1.

Zároveň REC 2 vykazuje průměrnou pevnost v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 6,2 MPa, což také nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10}.

Navržená receptura REC 2 nespĺnila požadavky na třídu SC 8/10, splňuje ovšem požadavky na třídu SC 5/6.

• **REC 3**

Pro prověření směsi stmelené cementem REC 3 byla vyrobena jedna sada zkušebních válců Ø 150 mm dle ČSN EN 13286-50:2005. Jedna sada obsahovala minimálně 9 zkušebních těles, které byly následně zkoušeny z hlediska pevnosti v tlaku po 7 dnech a 28 dnech. A následně po 42 dnech na odolnost proti mrazu a vodě. Pro experiment REC 3 byly oproti REC 2 upraveny vstupy takto:

- 80 % R-materiálu (4416 g)
- 10 % popílku (552 g)
- 10 % PDK 0/4 mm (552 g)
- 8 % cementu 42,5 R (480 g)
- Celková suchá směs (6000 g)
- Uvažovaná vlhkost 7,2 % (432 ml)

Záznam o zkoušení těles ze směsí stmelených hydraulickými pojivy

Odběr vzorku a výroba těles dle ČSN EN 13 286-50/ TP 208)										
Označení směsi:	SC 8/10		Obj. hmotnost suché směsi:				1 998 kg/m ³			
Vlhkost směsi:	7,20%		Obj. hmotnost vlhké směsi:				2 142 kg/m ³			
Datum a čas odběru vzorku:	28.2.2019 v 8:00 Hod.									
Číslo formy:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Hmotnost formy [kg :]	A - 10,332	B - 10,331	A	B	A	B	A	B	A	
Hmotnost naplněné formy [kg]	14,799	14,926	14,847	14,946	14,845	14,895	14,932	14,866	14,789	
Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg/m ³]	2 108	2 168	2 130	2 177	2 129	2 153	2 170	2 140	2 103	

Tabulka 49 – Záznam o zkoušení těles REC 3 [1]

Těleso po odformování Ø 150 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,481	4,588	4,531	4,594	4,514	4,552	4,601	4,541	4,455
Výška 1 [mm]	121,00	120,70	120,40	121,20	121,30	120,40	120,70	120,90	120,80
Výška 2 [mm]	120,10	120,40	120,40	121,40	120,80	121,30	121,20	120,40	120,50
Výška 3 [mm]	120,80	120,40	121,80	121,10	121,40	121,80	121,70	120,80	120,70
Výška 4 [mm]	119,90	120,40	121,40	121,60	120,30	120,80	121,30	120,70	120,50
Průměrná výška tělesa [mm]	120,45	120,48	121,00	121,33	120,95	121,10	121,23	120,70	120,63
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 100	2 149	2 113	2 137	2 106	2 122	2 142	2 123	2 084

Tabulka 50 – Těles po odformování REC 3 [1]

Zkouška odolnosti směsi proti mrazu a vodě									
Datum zahájení zkoušky:	29.03.2019								
Datum ukončení zkoušky	11.04.2019								
Zkouška pevnosti v tlaku	Po 7 dnech			Po 28 dnech			Po zkoušce odolnosti		
Datum zkoušky:	07.03.2019			28.03.2019			11.04.2019		
Stáří těles [den]:	7			28			42		
Tělesa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,516	4,61	4,556	4,628	4,545	4,573	4,453	4,6	4,576
Změna hmotnosti tělesa [%], tolerance $\leq - 2 \%$	0,78	0,48	0,55	0,74	0,69	0,46	1,13	1,30	2,72
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 116	2 160	2 125	2 153	2 121	2 132	2 166	2 151	2 141
Maximální síla F [kN]	92,6	96,7	90,1	119,5	138,1	112,9	119,8	129,4	120,8
Pevnost v tlaku tělesa Rc [MPa]	5,2	5,5	5,1	6,8	7,8	6,4	6,8	7,3	6,8
Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	5,3			7,0			7,0		
Kontrola: jednotlivé výsledky pevnosti v tlaku se od průměru nesmí lišit o více než $\pm 15 \%$	4,505 MPa - 6,095 MPa			5,95 MPa - 8,05 MPa			5,95 MPa - 8,05 MPa		
Vyhovuje dle ČSN EN 13286-41	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 51 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti vodě a mrazu REC 3 [1]

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELÉNÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY	
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ:	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
07.03.2019	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	DATUM VÝROBY: 28.02.2019
	LOKALITA Praha
	ČAS VÝROBY: 8:00
	MATERIÁL Směs stmelená cementem C 8/10
	ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm
	ČÍSLO VZORKU: REC 3
	ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE: 7 DNÍ
	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1998 kg/m³
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
	VLHKOST SMĚSI W: 7,20%
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 80 %, POPÍLEK 10 %, PDK 0/4 mm 10 % A % 8 CEMENTU 42,5 R

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po zhuštění ve formě 1)	Hmotnost zkušební tělesa po odformování 2)	Průměrná změněná výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušební tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Průměrná pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)
Jednotky	kg/m ³	kg	mm	kg	%	kg/m ³	kN	MPa	MPa
1	2108	4,481	120,45	4,516	0,78	2116	92,6	5,2	5,3
2	2168	4,588	120,48	4,610	0,48	2160	96,7	5,5	
3	2130	4,531	121,00	4,556	0,55	2125	90,1	5,1	

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušební tělesem je válec s jmenovitým průměrem $d=150$ mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru $d=150$ mm a změřených výšek tělesa h .
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. – 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41, čl. 7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 62 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 3 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 3 je po 7 dnech průměrně 5,3 MPa, což nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10},

neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štiřlostního poměru 1

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY		
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera		
DATUM ZKOUŠENÍ: 28.03.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu OBJEKT: Konstrukční vrstva LOKALITA Praha MATERIÁL Směs stmelená cementem C 8/10 ČÍSLO VZORKU: REC 3 STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI 28 DNÍ STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE ODOLNOST 42 DNÍ MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 80 %, POPÍLEK 10 %, 10 % pdk 0/4 mm A 8 % CEMENTU 42,5 R	DATUM VÝROBY: 28.02.2019 ČAS VÝROBY: 8:00 ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost KOUŠKA ODOLNOSTI SMĚSI PROTI MRÁZU A VODĚ 29.3.2019 až 11.4.2019 OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 1998 kg/m³ VLHKOST SMĚSI W: 7,20%

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po ztuhnutí ve formě 1)	Hmotnost zkušební tělesa po odformování 2)	Průměrná změněná výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušební tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 7)
Jednotky	kg/m³	kg	mm	kg	%	kg/m³	kN	MPa	MPa
4	2177	4,594	121,33	4,628	0,74	2153	19,5	6,8	–
5	2129	4,514	120,95	4,545	0,69	2121	138,1	7,8	07,0
6	2153	4,552	121,10	4,573	0,46	2132	112,9	6,4	–
7	2170	4,601	121,23	4,453	1,13	2166	119,8	–	6,8
8	2140	4,541	120,70	4,6	1,30	2151	129,4	–	7,3
9	2103	4,455	120,63	4,576	2,72	2141	120,8	–	6,8

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem d=150 mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h.
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. – 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.
 - 7) Zkouška odolnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě provedena dle ČSN 73 6124-1, příloha A. Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 63 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 3 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 3 je po 28 dnech průměrně 7,0 MPa, což nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10}, neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štiřlostního poměru 1.

Zároveň REC 3 vykazuje průměrnou pevnost v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě totožných 7,0 MPa, což také nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{8/10}.

Navržená směs REC 3 také nesplňuje pevnostní podmínky na C_{8/10}.

- REC 4

Vzhledem k velmi dobrým výsledkům REC 1 a prvotnímu záměru najít takovou směs, která bude nejen možnou náhradou za klasické receptury, ale i ekonomicky výhodná pro případnou realizaci. Jsem se rozhodl zhotovit průkazní tělesa stejné receptury jako má REC 1 - 90 % R-materiálu, 10 % popílku, ale už se sníženým obsahem cementu 32,5 R na 5 %. Pro vytvoření REC 4 byly použity tyto vstupy:

- 90 % R-materiálu (5130 g)
- 10 % popílku (570 g)
- 6 % cementu 32,5 R (300 g)
- Celková suchá směs (6000 g)
- Uvažovaná vlhkost 6,5 % (390 ml)

Záznam o zkoušení těles ze směsí stmelých hydraulickými pojivy

Odběr vzorku a výroba těles dle ČSN EN 13 286-50/ TP 208)									
Označení směsi:	SC 3/4		Obj. hmotnost suché směsi:		2 041 kg/m ³				
Vlhkost směsi:	6,50%		Obj. hmotnost vlhké směsi:		2 174 kg/m ³				
Datum a čas odběru vzorku:	29.3.2019 v 7:30 Hod.								
Číslo formy:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost formy [kg :]	A - 10,329	B - 10,328	A	B	A	B	A	B	A
Hmotnost naplněné formy [kg]	15	14,952	14,907	114,908	14,868	14,958	14,949	14,93	14,961
Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg/m ³]	2 204	2 182	2 160	2 161	2 169	2 137	2 180	2 171	2 185

Tabulka 52 – Záznam o zkoušení těles REC 4 [1]

Těleso po odformování Ø 150 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,646	4,593	4,569	4,576	4,617	4,524	4,609	4,590	4,596
Výška 1 [mm]	122,00	121,90	120,50	121,70	121,80	119,20	122,00	121,60	122,60
Výška 2 [mm]	121,80	120,90	121,20	122,20	122,20	120,80	122,20	121,90	122,40
Výška 3 [mm]	120,90	121,60	121,00	120,90	122,30	121,60	122,50	121,30	122,70
Výška 4 [mm]	120,50	121,20	120,80	121,30	121,90	120,30	121,70	122,10	121,90
Průměrná výška tělesa [mm]	121,30	121,40	120,90	121,50	122,10	120,50	122,10	121,70	122,40
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 162	2 135	2 146	2 125	2 135	2 119	2 130	2 128	2 119

Tabulka 53 – Tělesa po odformování REC 4 [1]

Zkouška odolnosti směsi proti mrazu a vodě									
Datum zahájení zkoušky:	26.04.2019								
Datum ukončení zkoušky	09.05.2019								
Zkouška pevnosti v tlaku	Po 7 dnech			Po 28 dnech			Po zkoušce odolnosti		
Datum zkoušky:	05.04.2019			26.04.2019			09.05.2019		
Stáří těles [den]:	7			28			41		
Tělesa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hmotnost tělesa [kg]	4,65	4,596	4,57	4,577	4,622	4,527	4,637	4,621	4,623
Změna hmotnosti tělesa [%], tolerance ≤ - 2 %	0,09	0,07	0,57	0,02	0,11	0,07	0,61	0,67	0,59
Obj. hmotnost směsi [kg/m ³]	2 164	2 137	2 134	2 126	2 137	2 121	2 143	2 142	2 132
Maximální síla F [kN]	60,5	71,3	60,5	95,5	90,8	105,6	86,7	88,7	84,2
Pevnost v tlaku tělesa Rc [MPa]	3,4	4	3,4	5,4	5,1	6	4,9	5	4,8
Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	3,6			5,5			4,9		
Kontrola: jednotlivé výsledky pevnosti v tlaku se od průměru nesmí lišit o více než ± 15 %	3,06 MPa - 4,41 MPa			4,675 MPa - 6,325 MPa			4,165 MPa - 5,635 MPa		
Vyhovuje dle ČSN EN 13286-41	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 54 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti vodě a mrazu REC 4 [1]

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELENÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY	
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera	
DATUM ZKOUŠENÍ:	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu
05.04.2019	OBJEKT: Konstrukční vrstva
	LOKALITA Praha
	MATERIÁL Směs stmelena cementem C 3/4
	ČÍSLO VZORKU: REC 4
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE: 7 DNÍ
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 %, A % 5 CEMENTU 32,5 R
	DATUM VÝROBY: 29.03.2019
	ČAS VÝROBY: 7:30
	ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm
	ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost
	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 2041 kg/m³
	VLHKOST SMĚSI W: 6,50%

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po zhuštění ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změřená výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Průměrná pevnost směsi stmelené cementem v tlaku Rc 6)
Jednotky	kg/m ³	kg	mm	kg	%	kg/m ³	kN	MPa	MPa
1	2204	4,646	121,3	4,65	0,09	2164	60,5	3,4	3,6
2	2182	4,593	121,4	4,596	0,07	2137	71,3	4,0	
3	2160	4,569	120,9	4,57	0,57	2134	60,5	3,4	

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem d=150 mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h.
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. - 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 64 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 4 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 4 je po 7 dnech průměrně 3,6 MPa, což prozatím nesplňuje požadavek pevnostní třídy C_{3/4},

neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1

PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH PEVNOSTI V TLAKU SMĚSI STMELÉNÉ HYDRAULICKÝMI POJIVY				
ZÁKAZNÍK: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera				
DATUM ZKOUŠENÍ: 26.04.2019	STAVBA: Posouzení vhodnosti materiálu OBJEKT: Konstrukční vrstva LOKALITA Praha	DATUM VÝROBY: 29.03.2019 ČAS VÝROBY: 8:00		
	MATERIÁL Směs stmelená cementem C 3/4 ČÍSLO VZORKU: REC 4	ZKUŠEBNÍ TĚLESA: VÁLCE Ø 150 mm ULOŽENÍ TĚLES: 20°C a 90 % vlhkost		
	STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI 28 DNÍ STÁŘÍ TĚLES PŘI ZKOUŠCE ODOLNOST 41 DNÍ	KOUŠKA ODOLNOSTI SMĚSI PROTI MRAZU A VODĚ 26.4.2019 až 9.5.2019 OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ SMĚSI ρ : 2041 kg/m³		
	MÍSTO ODBĚRU: Laboratoř	VLHKOST SMĚSI W: 6,50%		
	VSTUPNÍ MATERIÁLY: R-materiál 90 %, POPÍLEK 10 % A 5 % CEMENTU 32,5 R			

Metoda výroby těles byla dle ČSN EN 13 286-50: 2005, čl. 7.1, 7.3

Výsledky zkoušek objemové hmotnosti a pevnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy v tlaku:

Číslo tělesa	Objemová hmotnost čerstvé směsi stmelené cementem po zhuštění ve formě 1)	Hmotnost zkušebního tělesa po odformování 2)	Průměrná změřená výška tělesa h 3)	Hmotnost zkušebního tělesa v masyceném stavu před zkouškou pevnosti v tlaku 2)	Změna hmotnosti tělesa 2)	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi stmelené cementem před zkouškou pevnosti 4)	Maximální zatížení při porušení 5)	Pevnost smělé stmelené cementem v tlaku Rc 6)	Pevnost směsi stmelené cementem v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě 7)
Jednotky	kg/m³	kg	mm	kg	%	kg/m³	kN	MPa	MPa
4	2161	4,576	121,50	4,577	0,02	2126	95,5	5,4	-
5	2169	4,617	122,10	4,622	0,11	2137	90,8	5,1	-
6	2137	4,524	120,50	4,527	0,07	2121	105,6	6,0	-
7	2180	4,609	122,10	4,637	0,61	2143	86,7	-	4,9
8	2171	4,590	121,70	4,621	0,67	2142	88,7	-	5,0
9	2185	4,596	122,40	4,623	0,59	2132	84,2	-	4,8

- POZNÁMKY:
- 1) Stanovení podle ČSN EN 13 286-50 čl. 7.3. Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h (výšky změřené až po odformování tělesa.
 - 2) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl.7.2.
 - 3) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.1 Zkušebním tělesem je válec s jmenovitým průměrem d=150 mm.
 - 4) Zkouška provedena dle ČSN EN 13 286-41, čl. 9.1j). Objem tělesa stanoven výpočtem z jmenovitého průměru d=150 mm a změřených výšek tělesa h.
 - 5) Provedeno dle ČSN EN 13 286-41, čl. 7.5. - 7.7. Typ porušení uspokojivý (v souladu s ČSN EN 13 286-41. čl.7.7.).
 - 6) Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.
 - 7) Zkouška odolnosti směsi stmelené hydraulickými pojivy proti mrazu a vodě provedena dle ČSN 73 6124-1, příloha A. Zkouška pevnosti vyhodnocena dle ČSN EN 13 286-41, kap. 8.

prohlášení:

Výsledky zkoušky platí pouze pro zkoušené vzorky.

zkoušku provedl: **D. Hořák**

Obrázek 65 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 4 [1]

Pevnost v tlaku zkoušených těles vyhotovených dle REC 4 je po 28 dnech průměrně 5,5 MPa, což splňuje požadavek pevnostní třídy C_{3/4}, neboť při průkazných zkouškách musí být dosažena hodnota pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je pevnost v tlaku dle tab.6, ČSN 73 6124-1, štíhlostního poměru 1.

Zároveň REC 4 vykazuje průměrnou pevnost v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě totožných 4,9 MPa, což také splňuje požadavek pevnostní třídy C_{3/4}.

3.4 Realizace stmelené podkladní vrstvy z R-materiálu

Posledním krokem výzkumu byla samotná pokládka stmelené směsi, která vycházela z poznatků získaných nejen při mém experimentu, ale hlavně z víceletých poznatků a zkušeností zhotovitele se studenou recyklací. Kde samotnou kostru této směsi tvořil vyzískaný R-materiál ze zájmové stavby. Receptura byla vypracována dle požadavků ČSN 73 6124-1 a TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena MD – ČR (2009). Nejprve byly stanoveny křivky zrnitosti obou vstupních materiálů a z nich proveden návrh složení směsi. Obecně mají samotné R-materiály poněkud méně zastoupenou drobnou složku, proto bylo nutné upravit dolní část křivky zrnitosti přidáním přírodního drceného kameniva frakce 0/4 mm. Varianta využití popílku byla zamítnuta z důvodu velkého prášení, což není vhodné při rekonstrukci komunikace v intravilánu v blízkosti obytných budov. Nakonec se jako ideální jevílo zastoupení 80 % R-materiálu a 20 % PDK frakce 0/4 mm z lomu Chomutovice. Takto navržená směs splňovala požadavky na zrnitost nejen dle TP 208, ale i dle přísnější Tab. 3, ČSN 73 6124-1. Takto připravená směs byla následně doplněna 6 % cementu 32,5 R z cementárny Radotín. Zkouška dle proctora modifikovaného stanovila maximální objemovou hmotnost 2016 kg/m³ při optimální vlhkosti 8,1 %. Na tyto konkrétní parametry byla vyrobena sada zkušebních těles, které po 7 dnech zrání vykazovaly pevnost v prostém tlaku 3,3 MPa, po 28 dnech 4,2 MPa a po 28 dnech a odolnosti vůči mrazu 4,1 MPa. Takto navržená směs splňovala požadavky tab.7 TP 208, aby hodnota pevnosti v tlaku po zkoušce odolnosti proti vodě a mrazu byla minimálně 85 % hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání. Během samotné realizace konstrukční vrstvy stmelené cementem bylo nezbytné za frézou odebrat kontrolní vzorky a ověřit skutečné parametry pokládané směsi.

Každá stavba je v mnoha ohledech jedinečná, proto je nezbytné k tomu i tak přistupovat. V tomto případě se jednalo o rekonstrukci obslužné místní komunikace, která se nachází v intravilánu. Samotná stavba se nacházela v Praze, katastrálním území Kundratice, ulice Vídeňská. Správcem a zároveň investorem bylo TSK hl. m. Prahy a.s. Zpracovatelem projektové dokumentace byla projekční kancelář SINPPS s.r.o., která do původní verze projektu navrhla novou konstrukci vozovky o třech asfaltových vrstvách, jako spodní podkladní vrstvu SC 0/32 – C_{8/10} a jako ochrannou vrstvu ŠD_a frakce 0/32 mm. Spodní podkladní vrstva byla navržena v mocnosti 170 mm, za předpokladu dodávky od nejbližší betonárky, kde by kostra směsi byla tvořena z přírodního kamene.

Z důvodů uvedených v teoretické části mé práce výše. Bylo zástupcem zhotovitele navrženo řešení realizace spodní podkladní vrstvy, prostřednictvím technologie studené recyklace s využitím vyzískaného R-materiálu ze zájmové stavby. Jinými slovy řečeno, musela být upravena skladba vozovky na komunikaci v ulici Vídeňská v Praze dle návrhové metody uvedenou v TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací. Vozovka v původní verzi projektu byla dle vzorového příčného řezu navržena pro TDZ II, s využitím katalogového listu D0-N-3-P-III, na kterém je v podkladní vrstvě SC C_{8/10}. Hlavní předpoklad schválené záměny podkladní vrstvy, byl fakt, že konstrukce musela umožnit použití vrstvy SC C_{3/4} a současně nová skladba vozovky musela být schopna přenést dopravní zatížení, které bylo stanoveno v původním projektu, neboť zájmová stavba patří mezi značně zatížené vozovky v Praze. Pro nový návrh konstrukce vozovky bylo v prvním kroce ověřeno dopravní zatížení, které vycházelo z uvedených údajů na webových stránkách TSK Praha. Na mapě dopravy TSK, šlo o zájmový úsek č.4038–4039. Vycházelo se z podkladů sčítání dopravy zveřejněných na stránce za rok 2018. Na základě těchto dat bylo stanoveno, že dopravní zatížení pro stanovení nové skladby konstrukce vozovky bylo 800 osobních automobilů a 162 autobusů, celkem tedy 1000 TNV za den v obou směrech. Velký důraz při návrhu nové skladby byl kladen na pomalou a zastavující dopravu, což dle části B uvedené v TP 170 zohlední hodnotu součinitele C₄ =2. Tento součinitel vyjadřuje vliv rychlosti pohybu těžkých vozidel, tudíž se dalo uvažovat s TNV₀=2000, odpovídající třídě dopravního zatížení TDZ II, která byla uvažována i v projektu a dle TP 170 se jedná o hodnotu TNV₀=1200-2400 [9].

Původně navržená konstrukce v projektu:

ACO 11S PmB 45/80-60	40 mm
ACL 16S PmB 25/55-55	70 mm
ACP 22S Pmb 25/55-55	80 mm
SC 0/32 C _{8/10}	170 mm
ŠD _A frakce 0/32	250 mm

Celkově navržená mocnost konstrukce byla minimálně 610 mm, z toho 190 mm asfaltových vrstev. Jednalo se o podloží P III, pro které se požaduje na pláni dosáhnout Edef,2 = 45 MPa. Tato uvedená konstrukce vozovky se nachází v katalogovém listu D0-N-3 technických podmínek – navrhování vozovek pozemních komunikací.

D0-N

TDZ	S	I	II	III	
TNV_1 (TNV/24h)	10000	5000	2400	1200	441
TNV_k (TNV/24h)	23500	7500	3500	1500	501
TNV_{cd} (mil. TNV)	85	28	14.5	6.2	2.3
N_{cd} (mil. 10t náprav)	60	20	10	3.7	0.8

D0-N-3		Podloží			PI			PII			PIII			PI			PII			PIII			PI			PII			PIII		
SMA, ACL, ACP, SC C _{8/10} , ŠD	100	40 80			SMA 11S ACL 22S			40 80			SMA 11S ACL 22S			40 70 160			SMA 11S ACL 16S ACP 16S			40 60 50			SMA 11+ ACL 16+ ACP 16+								
	200	120 ⁷⁾			ACP 22S			80			ACP 22S			180 170 170			SC C _{8/10}			160 150 150			SC C _{8/10}								
	300	180 170 170			SC C _{8/10}			180 170 170			SC C _{8/10}			180 170 170			SC C _{8/10}			160 150 150			SC C _{8/10}								
	400	90▼			90▼			90▼			90▼			90▼			90▼			90▼			90▼			90▼					
	500	60▼			150			60▼			150			60▼			150			60▼			150			60▼					
	600	45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼					
	700	45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼			ŠDA			45▼					
	Ha	240	240	240		200	200	200		170	170	170		150	150	150		310	450	550											
	Hv	420	560	660		380	520	620		350	490	590																			

Obrázek 66 – list D0-N-3 z TP 170 [9]

Dle tabulky B.2 dodatku TP 170 – Návrhové moduly pružnosti asfaltových směsí při 15 °C je pro směs SMA, na katalogovém listu použit návrhový modul pružnosti o hodnotě 5 500 MPa. Pro směs ACO PmB 45/80-60, která byla použita v návrhu původního projektu, je stanoveno modul pružnosti 7 500 MPa, tudíž vyšší hodnota. Navržená vozovka s určitou rezervou vyhovovala požadavkům TP 170, protože obrusná vrstva je tužší a tloušťka navrhovaných vrstev byla mírně vyšší. Důvodem mohla být například skutečnost, že spolehlivě odhadnout nárůst dopravního zatížení v Praze v nadcházejících 25 letech, je velmi obtížné a případné kompletní uzavření vozovky z důvodů její celkové opravy by vedlo k závažným dopravním komplikacím, protože se jedná o páteřní komunikaci v dané oblasti. Z mého pohledu mohlo být dalším důvodem předimenzování navržené konstrukce i to, že návrhová metoda dle TP 170 je v některých ohledech poněkud optimistická, oproti zahraničním metodám, u kterých pak celková tloušťka vozovky může vyjít větší.

Použitím směsi SC C_{3/4} namísto SC C_{8/10} dojde ke snížení návrhového modulu pružnosti stanoveného v TP 170 z 2 500 MPa na 1 200 MPa. Tím se ovšem zvýší tahové napětí na bázi asfaltových vrstev a vertikální napětí podloží. Snížení tuhosti vrstvy SC je na katalogovém listu D0-N-5 kompenzováno mírným zvýšením tloušťky asfaltových vrstev a tloušťky SC proti vozovce uváděné na listě D0-N-3. Celková tloušťka zvolené konstrukce by pak byla 620 mm. Tudíž se jednalo o adekvátní záměnu a pro vozovku v ulici Vídeňská bylo možné navrhnout stejnou skladbu stmelených vrstev vozovek jako je uváděna na listu D0-N-5.

Jednalo se o SC C_{3/4} v mocnosti 180 mm s tím, že by se tloušťka podloží ze ŠD snížila na 240 mm, aby bylo docíleno celkové tloušťce konstrukce 610 mm, která byla uvažována v původním projektu.

Druhým ovlivňujícím faktorem bylo dodržení obdobné rezervy oproti návrhu v TP 170, která měla původně navržená konstrukce. Toho by bylo docíleno za předpokladu návrhu vrstvy SC C_{3/4} v tloušťce 190 mm a ŠD o mocnosti 230 mm. Celková tloušťka spodní podkladní vrstvy ze SC by tak nebyla větší než celková tloušťka asfaltových vrstev, což je v souladu s článkem B.8.2.4.2 uváděného v TP 170. [9]

Nově navržená konstrukce vozovky:

ACO 11S PmB 25/55-60	40 mm
ACL 16S PmB 25/55-60	70 mm
ACP 22S Pmb 25/55-60	80 mm
RS C _{3/4}	190 mm
ŠD _A frakce 0/32	230 mm

Celkově mocnost konstrukce navrhované alternativy byla taktéž 610 mm, z toho také 190 mm asfaltových vrstev. Jednalo se o podloží P III, pro které se požaduje na pláni dosáhnout $E_{def,2} = 45$ MPa. Cílem úpravy původně navržené skladby konstrukce bylo optimalizování technického a ekonomického řešení náhrady podkladní vrstvy SC C_{8/10} z pohledu proveditelnosti, za naprosto srovnatelnou podkladní vrstvu RS C_{3/4} s kombinací kameniva recyklovaného a přírodního stmeleného cementem tak, aby byla zachována třída dopravního zatížení dle projektové dokumentace. Výhoda použití podkladní vrstvy RS C_{3/4} je, že v takovém rozsahu nedochází k nežádoucím jevům projevujících se ve smršťování vrstvy a tím k vývoji reflexních trhlin v krytu vozovky. Je zde předpoklad kvalitně vyšší užitkové hodnoty realizovaného stavebního díla. Na základě výpočtu programem LAYMED bylo konstatováno, že výše uvedený návrh nové konstrukce vozovky splňuje kritérium relativního poškození vozovky D_{cdv} a podloží D_{cdp} a zcela tak vyhovuje požadavkům TP 170. Nižší tuhost vrstvy RS C_{3/4} byla kompenzována jejím zesílením.

D0-N

TDZ	S	I	II	III	
TNV_1 (TNV/24h)	10000	5000	2400	1200	441
TNV_k (TNV/24h)	23500	7500	3500	1500	501
TNV_{cd} (mil. TNV)	85	28	14.5	6.2	2.3
N_{cd} (mil. 10t náprav)	60	20	10	3.7	0.8

D0-N-5		Podloží	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII
SMA, ACL, ACP, SC C _{3/4} , ŠD	100		40	80	140	40	80	140	40	70	140	40	60	160
	200		180	180	140	100	100	180	180	80	180	190	160	160
	300		200	180	180	200	180	180	200	180	180	200	180	160
	400	90	200	180	180	200	180	180	200	180	180	200	180	160
	500		60	150	250	60	150	250	60	150	250	60	150	250
	600		45	150	250	45	150	250	45	150	250	45	150	250
	700		45	150	250	45	150	250	45	150	250	45	150	250
	Ha	260	260	260	220	220	220	190	190	190	160	160	160	
	Hv	460	590	690	420	550	650	390	520	620	350	470	570	

Obrázek 67 – list D0-N-5 z TP 170 [9]

Investor po konzultaci s projektantem a po doložení podkladů vypovídajících o vhodnosti zaměněných materiálů z hlediska zabudování do konstrukce vozovky, schválil záměnu a povolil realizaci. Ke kladnému vyřízení navrhované záměny pomohl z mého pohledu jednoznačně fakt, že investor technologii studené recyklace zná a má se zhotovitelem dobré zkušenosti již z dřívějších realizací, a také není nucen postupovat dle platných TKP.

Postup realizace konstrukční vrstvy ze směsi stmelené cementem na místě spočíval v několika dílčích úkonech, které na sebe postupně navazovaly. Nejprve bylo potřeba stavbu připravit do příslušné fáze rozpracování, aby vůbec bylo možné podkladní vrstvu realizovat. Jednalo se o zřízení ochranné vrstvy ze štěrku drti frakce 0/32 mm o mocnosti 230 mm a osazení kamenných obrubníků, které ohraničovaly rekonstruovanou komunikaci. Samotná stavba byla rozdělena do třech úseků po 200 metrech, aby jednotlivé technologie mohly na sebe kontinuálně navazovat a urychlila se tam samotná realizace podkladní vrstvy. Nejprve na ztuhlou vrstvu podloží byl naveden pomocí nákladních automobilů tzv. kamenný prach frakce 0/4 mm původem z Chomutovic, který doplňoval spodní část požadované křivky zrnitosti směsi R-materiálu. Přírodní drcené kamenivo frakce 0/4 mm bylo roztaženo po celé šířce konstrukce vozovky v tloušťce 30 mm pomocí grejdrů.



Obrázek 68 – Roztažení kameniva frakce 0/4 mm pomocí grejdru [1]

Následovalo navážení samotného R-materiálu z pár set metrů vzdálené mezideponie pomocí tříosých a čtyřosých nákladních automobilů. Jednotlivé navážky byly taktéž rozhrnuty pomocí grejdru do požadované tloušťky tak, aby zhutněná vrstva byla stanovených 190 mm. Na tvorbu požadované mocnosti jednotlivých vrstev je vyvíjen vysoký tlak, proto byl stroj vybaven 3D nivelačním systémem, který umožňuje vytvářet i složité plochy v krátkém čase. Nevýhodou této technologie je potřeba, mít k dispozici projekt v trojrozměrné podobě, aby mohl být tento podklad nahrán do nivelačního programu totální stanice. Spolupráce pak spočívá v komunikaci mezi grejdrem a totální stanicí, které musí být umístěna v blízkosti stavebního stroje. Totální stanice vypadá jako lepší teodolit a je schopná kromě výpočtu vodorovných úhlů měřit i jednotlivé vzdálenosti. Totální stanice pak dokáže automaticky otáčet a naklápět její tělo, aby dokázala neustále sledovat odrazný hranol, který byl umístěn na stroji pomocí montážního sloupku. Kabina grejdru byla vybavena obrazovkou, která obsluze interpretovala naměřená data a strojník se tak mohl soustředit na řízení grejdru a kontrole hloubky každého záběru. Obecně platí rovnice, že jeden stroj rovná se jedna totální stanice. Ovšem více totálních stanic na jedné stavbě není vyloučeno, jen každá z nich musí fungovat na jiné frekvenci [11]. Mezi hlavní výhody 3D nivelace patří její přesnost, který se pochybuje v rozmezí od 3 mm do 5 mm a také skutečnost, že nivelace se dá použít i v krytých objektech, kde by mohl být problém s příjmem signálu.



Obrázek 69 – Rovnění navezeného R-materiálu pomocí grejdrů [1]

Po rozhrnutí navezeného R-materiálu následovalo jeho hutnění, kterého bylo docíleno pomocí dvou vibračních zemních válců. Pro dohutnění u hrany kamenné obruby byla použita vibrační deska, hlavně z důvodu ochrany proti vyvrácení zabetonovaných obrubníků a narušení jednotlivých spár.



Obrázek 70 – Hutnění rozhrnutého R-materiálu [1]

Tyto stavební práce musely být hotové ještě před samotným nájezdem strojů, které jsou nezbytné pro realizaci studené recyklace na místě.

Realizace proběhla na stavbě Vídeňská dne 15.7.2019 a vycházela z poznatků, které jsou popsány výše v mé experimentální části diplomové práce. Zájmová stavba bylo opět rozdělena na úseky po 200 metrech nejen z důvodů dosahu totální stanice, ale i z hlediska postupné recyklace navezené vrstvy z R-materiálu. Dle navržené a schválené receptury bylo do směsi přidáváno 6 % cementu CEM II/B-S 32,5 R VL RADOTÍN označení dle EN 197-1 od dodavatele Českomoravský cement, a.s., a to pomocí nákladního automobilu, který je speciálně upraven na dávkování cementu. Tento dávkovač projel vždy stanovený úsek a provedl dávkování cementu, které bylo řízeno softwarově.



Obrázek 71 – Dávkovač cementu [1]

Takto připravený povrch byl pokyn pro začátek pojezdu zemní frézou, která jednotlivé složky směsi důkladně zamíchala a zpět položila homogenizovanou směs s kostrou z R-materiál. Při realizaci podkladní vrstvy vozovky ze směsi stmelené cementem byl strojní vlak tvořen pouze kropicí a zemní frézou, která byla pevně připojena pomocí distanční tyče ke kropici. Zemní fréza tlačila během pojezdu kropicí vůz před sebou. Z kropice si softwarové vybavení zemní frézy dle nastavených dat odebíralo množství vody, aby byla dodržena optimální vlhkost nově vytvářené směsi.



Obrázek 72 – Zemní fréza s kropicí [1]



Obrázek 73 – Finální směs stmelená cementem [1]

Po takto homogenizované směsi, která byla realizována dle schválené receptury, následovalo urovnání grejdrem vybaveným 3D nivelací. Posledním krokem recyklace na místě bylo hutnění, které bylo provedeno pomocí zemního vibračního válce v kombinaci s pneumatickým válcem neprodleně po rozprostření směsi. Kdy zemní válec jel první jetí bez vibrace a následující dvě s vibrací. Samotné hutnění bylo dokončeno po dosažení požadované míry zhutnění, jedná se o stav, kdy hutnící stroje po sobě nezanechávají na hutněné vrstvě stopy.



Obrázek 74 – Urovnání grejdrem a následné hutnění zemním válcem [1]

Jelikož se jednalo o letní den, kde průměrná denní teplota se pohybovala okolo 20 °C a chtěla být dodržena optimální vlhkost hutněné vrstvy, tak bylo nezbytné finální povrch po zhutnění ošetřovat kropením. Díky kropení se zlepšuje zhutnitelnost a zamezuje se tvorbě příčných trhlin. Poslední krok realizace spodní podkladní vrstvy spočíval v dohlazení povrchu pomocí pneumatického válce.



Obrázek 75 – Ošetřování povrchu kropením a následné dohutnění pneumatickým válcem [1]

Během realizace konstrukční vrstvy stmelené cementem byl na stavbě přítomný i zástupce akreditované laboratoře, který dle schváleného kontrolně zkušebního plánu prováděl požadované zkoušky směsi. Jednalo se především o:

- Zkoušku vlhkosti
- Zkoušku pevnosti v tlaku
- Odolnost proti vodě a mrazu

Dle TP 208 je nezbytné u stmelěných vrstev provádět kontrolní zkoušky nejen průkazní, ale i kontrolní z hlediska geometrické charakteristiky a mechanických vlastností.

Vlastnost		Vrstva		Zkouška	Min. četnost
		Ložná ¹⁾	Podkladní		
Odchylky od výšek podle dokumentace (jsou-li stanoveny)	Maximálně	± 20 mm	± 20 mm	Nivelací	po 40 m
Odchylka od příčného sklonu max.		± 0,5 %		Nivelací	po 120 m
Nerovnost povrchu max.	Podélná	20 mm		ČSN 73 6175	Průběžně
	Příčná	20 mm ²⁾			po 40 m
Tloušťka vrstvy h	Minimální	0,85 h		Nivelací, sondou	1500 m ²
	Průměr	0,9 h			
¹⁾ Platí i pro použití jako kryt. ²⁾ Při použití jako kryt 10 mm.					

Tabulka 55 – Kontrolní zkoušky geometrických charakteristik stmelěných vrstev [12]

Vlastnost		Vrstva		Zkouška	Min. četnost
		Ložná ¹⁾	Podkladní		
Vrstvy ze směsi stmelěných cementem nebo jiným hydraulickým pojivem, Vrstvy ze směsi stmelěných cementem + asfaltovou emulzí nebo zpěněným asfaltem					
Modul přetvárnosti Edef 2 min ¹⁾ ²⁾		150 MPa		ČSN 72 1006	2500 m ² min. 2 zkoušky
Rázový modul deformace min. ²⁾		100 MPa		ČSN 73 6192, skupina C	250 m ²
¹⁾ Pro dálnice, rychlostní silnice a silnice I. třídy platí kombinovaná kontrola únosnosti vrstvy pomocí statického modulu přetvárnosti Edef2 a rázového modulu deformace MVD. Rozhodující je měření statického modulu přetvárnosti Edef2. Pro silnice II. a III. třídy a ostatní komunikace platí možnost kontroly únosnosti pouze pomocí rázového modulu deformace MVD. ²⁾ Statická zatěžovací zkouška se provádí 7. den, rázová zatěžovací zkouška 24 až 48 hodin od provedení recyklované vrstvy. Pro obě zkoušky platí rozmezí teploty vrstvy 5 až 30°C. Při nedosažení požadovaných hodnot nelze provádět další vrstvy, dokud se opakovanými zkouškami dosažení požadovaných hodnot neprokáže. Naproti tomu lze další vrstvy provádět i v kratších intervalech od provedení recyklované vrstvy, prokáže-li se dřívější dosažení požadovaných hodnot.					

Tabulka 56 – Kontrolní zkoušky mechanických vlastností stmelěných vrstev [12]

Na samotné konstrukci se pak prováděla zkouška vlhkosti a míra zhutnění. Zásadní nevýhodou je technologická přestávka, kterou je nezbytné dodržet, než dojde k položení následující vrstvy.

V TP 208 tabulka č.8 uvádí, že minimální doba ošetřování vrstvy obsahující cement nebo jiné hydraulické pojivo je 7 dní. Až po týdnu může být vrstva vystavena dopravnímu zatížení, případně pokládce další konstrukční vrstvy. Což je výrazné omezení a zdržení doby výstavby.

Pro představu uvádím i vyčíslení editace návrhu konstrukce vozovky, kde konkrétní záměna vycházela přibližně stejně oproti původní variantě navržené v projektu. Musíme si ale uvědomit, že naceněné položky původní varianty jdou do výběrového řízení a kolikrát jsou přizpůsobeny tak, aby celková cena díla byla konkurenceschopná, proto mohou na první pohled lehce zkreslovat. Na druhou stranu srovnávat tyto položky jen dle jednotkové ceny není korektní postup, neboť se nejedná o srovnatelné položky. Každá položka má totiž jinou tloušťku konstrukce, tak by bylo dobré, jednotkovou cenu detailněji rozebrat.

SOUPIS PRACÍ - původní konstrukce dle projektové dokumentace

Stavba:

Vídeňská, č.akce 999 789, 3. a 4. etapa, v úseku K Ústavu - OK Dobronická, Praha 4

Objekt:

SO101 - Komunikace

Místo: Praha 4

Datum: 20.06.2019

Zadavatel: TSK hl. m. Prahy, a.s.

Projektant: Sinpps s.r.o.

Uchazeč:

PČ	Typ	Kód	Popis	MJ	Množství	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]	Cenová soustava
Náklady soupisu celkem							-2 552 527,53	
D	HSV		Práce a dodávky HSV				-2 552 527,53	
D	5		Komunikace pozemní				-2 552 527,53	
55	K	567132112	Podklad ze směsi stmelené cementem SC C 8/10 (KSC I) tl 170 mm (vozovka)	m ²	-4 589,000	281,80	-1 293 180,20	
56	K	564871111 - 2	Podklad ze šterkodrté SDa fr.0/32 tl 250 mm (vozovka)	m ²	-5 251,000	239,83	-1 259 347,33	
	W		4289+962		5 251,000			

Obrázek 76 – Oceněný soupis prací původní konstrukce [1]

SOUPIS PRACÍ - nově navržená konstrukce

Stavba:

Vídeňská, č.akce 999 789, 3. a 4. etapa, v úseku K Ústavu - OK Dobronická, Praha 4

Objekt:

SO101 - Komunikace

Místo: Praha 4

Datum: 20.06.2019

Zadavatel: TSK hl. m. Prahy, a.s.

Projektant: Sinpps s.r.o.

Uchazeč:

PČ	Typ	Kód	Popis	MJ	Množství	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]	Cenová soustava
Náklady soupisu celkem							2 532 848,47	
D	HSV		Práce a dodávky HSV				2 532 848,47	
D	5		Komunikace pozemní				2 532 848,47	
II	K	567131114	Podklad ze směsi stmelené cementem SC C 3/4 (SC I) tl 190 mm	m ²	4 589,000	299,47	1 374 267,83	
II	K	564861114	Podklad ze šterkodrté SD tl 230 mm	m ²	5 251,000	220,64	1 158 580,64	
	W		4289+962		5 251,000			

Obrázek 77 – Oceněný soupis prací nové konstrukce [1]

Tato projednaná záměna byla řešena pomocí ZBV – změna během výstavby vytvořené rozpočtářským softwarem ASPE. Celkový rozdíl této záměny dle uvedených soupisů výše byl pouhých 19 679,- a ZBV bylo klasifikováno jako méněpráce. Skutečnost, že se jednalo o méněpráci, bylo pozitivní v tom ohledu, že se daná záměna lépe zdůvodňuje i samotnému investorovi, vždyť on přeci na první pohled ušetřil finanční prostředky, nesnížil kvalitu realizovaného díla a vyšel vstříc zhotoviteli. V neposlední řadě přispěl i k ochraně životního prostředí a zaručil tak spokojenost všech účastníků výstavby.

4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE NAD VÝSLEDKY

4.1 Rozbor navržených receptur a jejich využití

Úkolem experimentální části mé diplomové práce bylo navrhnout takovou recepturu směsi, která obsahuje co největší obsah R-materiálu a splňuje požadované pevnostní parametry dle platných předpisů. Původní záměr byl vytvořit recepturu na směs SC_{3/4} s použitím cementu 32,5 R z cementárny Radotín a také vytvořit obdobnou recepturu směsi odpovídající pevnostní třídě SC_{8/10} s využitím vyšší třídy pevnosti cementu 42,5 R z cementárny Radotín.

Mezi výsledné receptury patří:

- REC 1, která obsahuje 90 % R-materiálu, 10 % popílku a 6 % cementu CEM I 32,5 R, která dostatečně splňuje požadavky běžné C_{3/4} a jen těsně nespĺňuje požadavky na třídu pevnosti C_{5/6}.

- REC 2, která obsahuje 90 % R-materiálu, 10 % popílku a 8 % cementu CEM I 42,5 R, tato směs splňuje požadavky standartní C_{5/6}. Nikoli však zamýšlené C_{8/10}.

- REC 3, která obsahuje 80 % R-materiálu, 10 % popílku, 10 % přírodního drceného kameniva 0/4 mm a 8 % cementu CEM I 42,5 R, tato směs odpovídá svými vlastnostmi také C_{5/6}.

- REC 4 vycházela z poznatků získaných při realizaci REC 1, kdy směs vycházela pevnostně velmi dobře, proto z těchto i ekonomických důvodů bylo procentuální zastoupení cementu 32,5 R ve směsi sníženo na 5 %. Dále suchou směs tvořil z 90 % R-materiál a 10 % popílek. Navržená receptura splňuje požadavky na směs C_{3/4}.

Navržená směs:	R-materiál	Popílek	PDK 0/4	cement 32,5 R	cement 42,5 R	Požadovaná třída pevnosti	Splněno
REC 1	90 %	10 %	-	6 %	-	C 3/4	ANO
REC 2	90 %	10 %	-	-	8 %	C 8/10	NE
REC 3	80 %	10 %	10 %	-	8 %	C 8/10	NE
REC 4	90 %	10 %	-	5 %	-	C 3/4	ANO

Tabulka 57 – Složení jednotlivých receptur a požadovaná třída pevnosti [1]

Jak můžeme z tabulky výše vypočítat, tak původní předpoklad byl splněn u poloviny receptur, a to REC 1 a REC 4, které splnily požadovanou třídu pevnosti. Naopak receptury REC 2 a REC 3 bohužel nespĺnily požadavky na vyšší třídu pevnosti C_{8/10}, ale s velkou rezervou splňují požadavky na třídu C_{5/6}. I tak výsledky experimentální části hodnotím velice kladně, neboť s R-materiálem ve směsích stmelěných cementem není v České republice doposud moc zkušeností.

Navržená směs:	Zkouška Proctor modifikovaný		Pevnost v tlaku Rc [MPa]		
	Maximální OH [kg/m ³]	Optimální vlhkost [%]	7 dní	28 dní	28 dní + 13 cyklů mrazu
REC 1	2 041,54	6,51	4,70	6,60	5,90
REC 2	2 041,99	6,49	5,00	7,00	6,20
REC 3	2 060,79	6,47	5,30	7,00	7,00
REC 4	2 041,54	6,51	3,60	5,50	4,90

Tabulka 58 – Výsledky průkazních zkoušek jednotlivých směsí [1]

Výsledky zkoušek je nutno vyhodnotit podle ČSN 73 6124-1, dle článku č. 6.2.6., který stanovuje dosažení hodnoty pevnosti v tlaku minimálně o 15 % vyšší, než je uvedeno pro danou třídu v Tab.6 téže normy se štíhlostním poměrem 1^a. Tato tabulka je součástí mé diplomové práce s označení tabulky č.6. Při zkoušce odolnosti proti vodě a mrazu musí mít pevnost po mrazových cyklech minimálně 85 % pevnosti zrání, co po 28 dnech.

Navržená směs:	Pevnost v tlaku Rc [MPa]		Požadovaná třída pevnosti o 15 % vyšší než min. hodnoty Rc [MPa]			Směs splňuje třídu pevnosti
	28 dní	28 dní + 13 cyklů mrazu	C 3/4	C 5/6	C 8/10	
REC 1	6,60	5,90	4,6	-	-	C 3/4
REC 2	7,00	6,20	-	6,9	11,5	C 5/6
REC 3	7,00	7,00	-	6,9	11,5	C 5/6
REC 4	5,50	4,90	4,6	-	-	C 3/4

Tabulka 59 – Splněných tříd pevnosti dle ČSN 73 6124-1 [1]

Navržená směs:	Pevnost v tlaku Rc [MPa]		85 % hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech [MPa]	Procentuální vyjádření pevnosti po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě	Splněné kritérium:
	28 dní	28 dní + 13 cyklů mrazu			
REC 1	6,60	5,90	5,61	89,39 %	ANO
REC 2	7,00	6,20	5,95	88,57 %	ANO
REC 3	7,00	7,00	5,95	100,00 %	ANO
REC 4	5,50	4,90	4,675	89,09 %	ANO

Tabulka 60 – Splněných pevností v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě [1]

U návrhu směsí pevnostní třídy $SC_{8/10}$ je pozoruhodné, že při stejném složení směsí nemá cenu používat cement vyšší třídy pevnosti ve větší dávce. Neboť pevnosti v tlaku tomu neodpovídají a bylo by neekonomické – viz. směsi REC 1 a REC 2, kde je využit cement pevnosti 42,5 R v zastoupení 8 % oproti cementu 32,5 R v zastoupení 6 %, používat cement 42,5 R ve větší dávce, protože rozdíl v dílčích pevnostech je minimální. Myslím si, že jde o velmi zajímavý poznatek. Pokud budeme chtít docílit pevnosti $SC_{8/10}$, tak se domnívám, že je nutné jít cestou nejen vyšší dávky cementu. Odhaduji 8 % až 10 % zastoupení ve směsi stmelené cementem. Ale i snížením podílu R-materiálu ve směsi, protože je patrné, že samotný R-materiál má omezené pevnostní možnosti. R-materiál bude nutné z části nahradit hrubší frakcí drceného kameniva (např. frakcí 16/32 mm) a zastoupení jemné části doplnit obdobně jako v experimentu popílkem nebo kamenným prachem frakce 0/4 mm.

Všechny navržené receptury splňují požadavky stanovené ČSN 73 6124-1 (viz. tabulka č.5) a TP 208, proto si myslím, že se jedná o možné varianty, které mohou být realizovány jako konstrukční podkladní vrstvy takovým zhotovitelem, který má k tomu potřebné strojní vybavení a technologie studené recyklace na místě mu přijde v různých ohledech výhodná. Současně i daná stavba musí být uzpůsobena k průjezdu strojního vlaku a správce stavby musí být této technologii nakloněn, ovšem pokud ji neurčuje přímo samotný projekt.

4.2 Návrh dalšího směru výzkumu

Jak už jsem poznamenal výše, určitě bych se v budoucím zkoumání zaměřil na vyhotovení takové receptury směsi, která by splňovala kritéria pro třídu pevnosti C_{8/10}. Dále by bylo zajímavé, experimentovat s různými hydraulickými pojivy a jejich procentuálním zastoupením ve směsi, případně přidat do směsi pomalu tuhnoucí silniční pojiva. Samotný R-materiál má omezené pevnostní možnosti, neboť jednotlivá obalená zrna asfaltem pod tlakem po sobě kloužou. Také má nedostatek jemné složky materiálu, která musí být doplněna. Ovšem tyto jednotlivé nedostatky se dají nahradit vhodnými materiály.

Dosažení přísnějších požadavků na směs C_{8/10} je reálné. Z mého pohledu by bylo nutné razantně snížit zastoupení R-materiálu ve směsi přibližně na 50 % celkového zastoupení směsi. Naopak navýšit procentuální zastoupení přírodního kameniva frakce 0/32 mm ve směsi na 40 % a také doplnit jemnou část požadované křivky zrnitosti frakcí 0/4 mm. Dávkování cementu 32,5 R by muselo být také navýšeno na odhadem stanovenou hodnotu 8, 9 nebo 10 %. To by následně ukázaly zkoušky pevnosti. Otázkou by pak zůstávalo, zda by se pořád jednalo pro příslušného zhotovitele o zajímavou alternativu zhotovení stmelené konstrukční vrstvy po stránce nejen ekonomické, ale i technologické. Takové množství cementu ve směsi s sebou nese i určitá úskalí.

4.3 Porovnání metod realizace s posouzením dle vlastního ukazatele

Metody budou porovnány dle vlastního ukazatele udržitelnosti, který hodnotí dosažení požadovaných parametrů na úrovni cementové stabilizace a kameniva zpevněným cementem. Z mého pohledu tento ukazatel v sobě zahrnuje čtyři hlavní hodnotící pilíře současné realizace staveb. Mezi tyto pilíře patří kvalita, finance, časová náročnost a vliv na životní prostředí. Důležitým ukazatelem je také zatížení okolních komunikací během realizace, které jsem zařadil do koeficientu vlivu na životní prostředí.

Koeficient udržitelnosti je smyšlený ukazatel, který poukáže na jednotlivé výhody a nevýhody jednotlivých technologií realizace konstrukčních vrstev stmelěných hydraulickými pojivy.

Samotný koeficient nemá žádnou měrnou jednotku, nicméně si myslím, že i tak se jedná o zajímavý indikátor, který zhodnotí jednotlivé rozdílné přístupy na základě více kritérií.

$$U = [(0,3 * K) + (0,3 * F) + (0,2 * \check{C}N) + (0,2 * \check{Z}P)]$$

U = hodnotící koeficient udržitelnosti [-]

K = kvalita díla

F = Finanční hledisko

ČN = časová náročnost výstavby

ŽP = vliv na životní prostředí

Pozn. jednotlivé hodnotící parametry budou stanoveny v hodnotách 1 až 10, kdy hodnota 1 bude brána jako nejhorší hodnocení, zatímco hodnota 10 jako nejlepší.

Rovnice 7 – Vzorec hodnotícího koeficientu udržitelnosti [1]

4.3.1 Konvenční technologie

Tato technologie je založena na výrobě směsi v certifikovaných betonárnkách, kde namíchaná směs je expedována na požadovanou stavbu. K výrobě směsi se používá přírodní drcené kamenivo požadované frakce a následně požadovaná pojiva ve formě hydraulických pojiv dle schválených receptur. Každá betonárka disponuje jiným sortimentem a vstupními materiály, které vstupují do směsi. Například mají k dispozici jen jednu vaznostní třídu cementu, což samozřejmě prodražuje vyráběnou směs. Pokud zhotovitel nedisponuje vlastní betonárnkou, je zcela závislý na rozmarnosti a vytíženosti dané betonárky, s kterou má obchodní vztah. Maximální denní objem vydané receptury se pohybuje okolo 400 m³, ale tato skutečnost musí být v dostatečném předstihu s betonárnkou předjednána. Samotný postup realizace je pak asi takový. Nejprve se na stavbu dopraví požadovaná směs, která je strojním vybavením zpracována. Proveďte se rozhrnutím grejdrem nebo finišerem a zahutnění vrstvy vibračním válcem. Bez dopravy se nákupní cena směsi C_{8/10} pohybuje okolo 950,-/t bez DPH a cena směsi C_{3/4} okolo 900,-/t bez DPH. V závislosti na vzdálenosti stavby od betonárky a na objemu stavebních prací se tato technologie naceňuje za přibližně 2000,-/m³ bez DPH. V této jednotkové ceně je zahrnut materiál, strojní vybavení, technologie a režie zhotovitele. Na základě těchto vstupů vyhodnotím jednotlivé ukazatele, které zahrnu do hodnotícího vzorce.

$$U_1 = [(0,3 * 9) + (0,3 * 5) + (0,2 * 8) + (0,2 * 5)] = 6,8$$

Rovnice 8 – Koeficient udržitelnosti konvenční technologie [1]

Zvolené veličiny jsem volil z těchto důvodů. Kvalita díla hodnotou 9 je z toho důvodu, že se jedná o certifikovanou betonárku, která deklaruje hodnoty směsi na základě průkazných zkoušek a vždycky je prostor ke zlepšení. Finanční hledisko technologie je hodnoceno hodnotou 5, neboť jednotková cena vyplývá z poptávky na trhu a obchodní strategie výrobců. Časová náročnost je hodnocena 8, protože na tuhle technologii realizace konstrukční vrstvy se vztahuje nucená technologická přestávka, kdy je nutné vrstvu ošetřovat v návaznosti na klimatických podmínkách. Poslední hodnotu je vliv na životní prostředí, kde jsem vybral hodnotu 5. Je to převážně z toho důvodu, že k výrobě směsi je používáno přírodní drcené kamenivo, které není nevyčerpatelným zdrojem surovin. Dále také z důvodu uhlíkové stopy, která vzniká při dovozu materiálu na stavbu. Při dopravě materiálu na stavbu jsou významně zatěžovány vedlejší komunikace, které jsou enormně namáhány a snižuje se tak jejich životnost. Což má za následek požadavek na další stavební úpravy, případně kompletní rekonstrukci.

4.3.2 *Recyklace za studena na místě*

Jedná se o technologii, na kterou byla v mé diplomové práci přizpůsobena experimentální výroba směsi a byla hledána taková receptura, která se dá touto technologií realizovat. Princip spočívá ve využití starých materiálů, které jsou na místě k dispozici. Zlepšením jejich vlastností a úpravou pomocí drcení, třídění, doplněním nových materiálů a přidáním organických nebo hydraulických pojiv. Díky studené recyklaci na místě dochází k šetření přírodních zdrojů z hlediska těžení přírodního kameniva a také k omezení dopravy potřebných materiálů na místo rekonstrukce. K realizaci stmelené konstrukční vrstvy hydraulickými pojivy je nezbytná celá řada strojů, kterými daný zhotovitel musí disponovat. Jedná se především o zemní frézu, která zaručuje rozebrání starého povrchu a homogenizaci nově vyráběné směsi, dále o kropici, dávkovač cementu, grejdr, zemní válec a pneumatický válec. Mezi jednu z výhod této technologie patří zcela mechanizovaná práce, nicméně to je podmíněno technologickou kázní, kterou na místě kontroluje technik zhotovitele. Jedná se například o koordinaci strojů, dovoz materiálů a dohlížení na dávkování pojiv. Experimentální část mé práce se zaměřila na výrobu takové směsi, kde bude využit maximální množství R-materiálu ve směsi. Ten se získává frézováním na místě nebo dovozen z určených mezideponiích, aby částečně docházelo ke zpracování nahromaděných zásob.

Nahromaděné kupy R-materiálu začínají být problémem nejen pro zhotovitele, který je přinucen například u ŘSD na základě smlouvy o dílo jej odkoupit za 120,-/t, u krajských investorů se nařízený výkup pohybuje v rozmezí 30,- až 35,-/t. A konkrétně u Technické správy hlavního města Prahy je ve smlouvě o dílo uvedeno, kolik zhotovitel nabídne. Praxe se pohybuje okolo 5,-/t. V současnosti samotné projekty počítají ve výkazech pouze s vyfrézováním asfaltového materiálu, nicméně doprava a uplatnění nebo prodej asfaltového recyklátu je pak na samotném zhotoviteli a výkaz výměr ji nijak nezohledňuje. S touto běžnou praxí je i spojeno ekonomické břímě, kdy vyfrézovaný asfaltový recyklát se musí odvést na určené místo, kde je skladován do doby, než se najde jeho druhotné uplatnění. Skladování vyfrézovaného materiálu s sebou nese nejenom finanční náklady, ale také i problematiku hledání vhodného místa, kde by se materiál dal deponovat a nedocházelo k jeho znehodnocení nebo neomezovalo příslušnou obec. Z těchto a dalších důvodů jsme se ve své práci zaměřil na hledání takové receptury, kde bude co největší množství R-materiálu a receptura bude vyhovovat legislativním požadavkům. Do navrhovaných receptur dále vstupovaly takové materiály, které zlepšovaly vlastnosti R-materiálu a jsou lokálně dostupné. Jednalo se o přírodní drcené kamenivo frakce 0/4 mm, u kterého se pořizovací cena pohybuje v rozmezí od 120,- do 130,-/t bez dopravy. Dále o popílek, který se vykupuje za 30,- až 35,-/t bez dopravy. Tyto materiály doplňují chybějící drobnou složku kameniva u R-materiálu. Jako pojivo byl využit cement o dvou pevnostech. Cement byl zvolen z toho důvodu, že je snadno dopravitelný na určené místo pomocí cisteren, z které je možno přímo doplnit dávkovací stroj mimo pokládanou trasu. Cena cementu 32,5 R z Radonína se dá pořídit za 2150,-/t i s dopravou na místo. Toť všechny vstupní materiály nezbytné k výrobě směsi. Nicméně samotnou směs je nutné promíchat, zaručit správného dávkování, zpracovat a ztuhnout. K tomu se využívají strojní mechanismy, kde jejich denní nájem je závislý na složení strojní sestavy, ale vždycky musí být přítomna zemní fréza, cisterna s vodou, kropice, dávkovač cementu, zemní válec s ocelovými běhouny a pneumatický válec. Kalkulace denního nájmu je závislá na objemu prací a dojezdové vzdálenosti nutné k přepravě frézy. Čistě pronájem strojního vybavení vychází odhadem na 250,-/m³. Ovšem nespadá do toho návoz a příprava R-materiálu a jeho hutnění, nákup a dovoz další vstupních materiálu. Celkem výrobní náklady realizace této technologie vycházejí v závislosti na typu a velikosti stavby na 550,- až 650,-/m³. Tato technologie není vhodná pro stavby malého rozsahu, kde se v trase nachází hodně šachet a inženýrských znaků.

Výkonost této technologie je závislá na šikovném strojníkovi ovládající grejdr, ale pokud je tento stroj vybaven 3D nivelací, pohybuje se jeho denní pracovní objem až k 800 m³/den. Což je o polovinu více než dokáže poskytnou za den betonárka.

Časová náročnost této technologie je pevně ovlivněna technologickou přestávkou dle TP 208, kdy se vrstva musí udržovat ve vlhkém stavu a nesmí být na ni položena další konstrukční vrstva.

Recyklovaná vrstva obsahující pojivo	Udržování ve vlhkém stavu	Vystavení dopravnímu zatížení min.	Pokládka další vrstvy min.	Zvláštní opatření
cement nebo jiné hydraulické pojivo	min. 7 dní	po 7 dnech ¹⁾	po 7 dnech	proti reflexním trhlinám čl. 7.8, ČSN 73 6124-1, infiltrační postřik ²⁾
cement + asfaltové emulze nebo zpěňný asfalt	min. 7 dní	po 7 dnech ¹⁾	po 7 dnech	infiltrační postřik ²⁾
asfaltové emulze nebo zpěňný asfalt	-	po 48 hodinách běžný provoz	po 3 dnech	-

¹⁾ Po 24 hodinách při TDZ VI.
²⁾ Doporučuje se pro udržení vlhkosti a zvýšení odolnosti proti dopravnímu zatížení, viz též čl. 3.2.

Tabulka 61 – Doporučené požadavky na ošetřování a ochranu povrchu [12]

Na základě těchto informací vyhodnotím jednotlivé ukazatele, které zahrnu do hodnotícího vzorce pro danou technologii.

$$U_2 = [(0,3 * 9) + (0,3 * 9) + (0,2 * 8) + (0,2 * 8)] = 8,6$$

Rovnice 9 – Koeficient udržitelnosti recyklace za studena na místě. [1]

Zvolené hodnoty jsem zvolil na základě těchto důvodů. Kvalita díla je realizována z certifikovaných výrobků a samotná směs je doložena průkaznými laboratorními výsledky, které byly vyhotoveny v autorizované laboratoři, proto jsem zvolil hodnotu 9. Z dostupných informací mohu soudit, že po finanční stránce tato technologie vychází lépe oproti nakupované drahé směsi. Nicméně je to podmíněno rozsahem stavebních prací, aby se daná technologie vyplatila. Při předpokladu splnění těchto kritérií, volím hodnotu 9. U staveb malého rozsahu se nejedná o prospěšnou technologii. Z hlediska časové náročnosti se jedná o velmi výhodnou technologii, protože většina materiálů je k dispozici přímo na místě. Pokud jednotlivé technologie na sebe navazují, jedná se o velmi rychlou realizaci konstrukční vrstvy, díky 100 % mechanizované práci, proto volím hodnotu 8.

Posledním hodnotícím kritériem je vliv na životní prostředí, tam jsem se rozhodl volit hodnotu také 8 a to z důvodu snížení čerpání omezených zdrojů přírodního kameniva, omezení dopravy materiálu nákladními automobily, s tím související zmenšení uhlíkové stopy a snížení zátěže okolních komunikací. Ale hlavně využití vybouraného materiálu a jeho opětovné zabudování do konstrukce vozovky, což má za následek i ovlivnění finanční stránky projektu, neboť není nutné pronajímat pozemky pro uskladnění materiálu a jeho dopravu na místo.

4.3.3 Recyklace za studena v míchacím mobilním centru

Poslední posuzovanou technologií z hlediska vhodnosti je recyklace v mobilním míchacím centru za studena. Principiálně jde o to, že na předem určené místo se nastěhuje sestava mobilního centra, která vyrábí požadovanou recepturu, tato receptura je následně dovážena na nedalekou zájmovou stavbu. Tento způsob výroby směsi se používá v případě, kdy je směs realizována z dováženého materiálu a zároveň stavební práce jsou takového rozsahu, že se vyplatí nastěhování mobilního centra. Pozemek pro umístění mobilního centra musí splňovat požadavky na uskladnění a oddělení vstupních materiálů vyráběné směsi. Nicméně před nastěhováním mobilního centra musí být vyřešena legislativní problematika. Jedná se především o pronájem pozemku, povolení umístění centra z hlediska životního prostředí, stavební povolení, ke kterému se musejí vyjadřovat dotčené osoby v blízkém okolí, což se dá u velkých staveb, které jsou připravovány nejméně šest měsíců dopředu, a i tak není zaručeno, že vše proběhne bez problémů. Mezi další nevýhody využití mobilní centra pro výrobu směsi stmelenou hydraulickými pojivy obsahující R-materiál patří fakt, že samotný R-materiál je choulostivý na práci a skladování. Během skladování dochází ke spékání horní vrstvy asfaltového recyklátu, z toho důvodu je nezbytné, neustále přehazovat haldy R-materiálu určeného k výrobě směsi. Tato skutečnost nezbytné přítomnosti strojního vybavení určeného k nakládce materiálu, se odrazí ve finanční stránce projektu. Další nevýhodou využití tohoto materiálu je tvorba slepenců při zpracování směsi, což může citelně poškodit míchačku míchacího centra. Slepence v přidávaném materiálu musejí být eliminovány již zmiňovaným přehazováním hald.

Na základě těchto poznatků vyhodnotím jednotlivé ukazatele, které zahrnu do hodnotícího vzorce pro technologii recyklace za studena v mobilním centru.

$$U_3 = [(0,3 * 9) + (0,3 * 7) + (0,2 * 8) + (0,2 * 7)] = 7,8$$

Rovnice 10 – Koeficient udržitelnosti recyklace za studena v míchacím centru na místě [1]

Uváděné hodnoty jsem uvedl z následujících důvodů. Kvalita díla je hodnocena zcela stejně jako u recyklace na místě, tudíž hodnotou 9. Důvody jsou stejné, pro výrobu směsi jsou použity certifikované výrobky a receptura je vyhotovena dle návrhu, který je doložen průkaznými zkouškami. Finanční hledisko je poněkud těžké hodnotit, neboť se odvíjí od největší položky a tou je stěhování mobilního centra a jeho provoz, kterou ani řádově neumím stanovit. Do toho vstupuje i vzdálenost odkud a kam se bude středisko stěhovat a samozřejmě pronájem vhodného pozemku. Na základě těchto poznatků jsem zvolil hodnotu 7. Časová náročnou je zvolena stejnou hodnotou jako u recyklace na místě. Je to z toho důvodu, že pokud jsou na místě k dispozici materiály nezbytné k výrobě požadované směsi, je limitující jen maximální výkon centra. Tudíž volím hodnotu 8. Posledním hodnotícím kritériem je vliv na životní prostředí, který u technologie výroby směsi v mobilním centru hodnotím menší hodnotou než u recyklace na místě. Je to z toho důvodu, že se nově vyrobená směs musí distribuovat od mobilního centra na místo určení, a to pomocí nákladních automobilů, které zatěžují okolní komunikace, práší a zanechávají uhlíkovou stopu. Z těchto důvodů volím hodnotu 7.

4.3.4 Výsledek porovnání metod realizace podle vlastního ukazatele

Uváděné výsledky vycházejí z mého posouzení dané problematiky, kde se jako nejlépe hodnocená technologie provádění stmelených vrstev hydraulickými pojivy, jevila technologie recyklace za studena na místě. Při využití této technologie se uvažovalo s uplatněním receptury, která byla experimentálně stanovena a popsána v mé praktické části. Hodnoceno bylo na základě dílčích kritérií, které neoddiskutovatelně patří k realizaci jakéhokoliv stavebního díla. Mezi stanovená kritéria patří kvalita díla, finanční hledisko, časová náročnost výstavby a vliv na životní prostředí, kdy každé dílčí kritérium bylo hodnoceno na stupnici 1 až 10, hodnota 1 byla považována za nejhorší. Takto vyjádřená kritéria, byla vložena do vzorce udržitelnosti. Nejlépe pak vyšla hodnota u studené recyklace na místě ($U_2=8,6$), která se jeví jako nejideálnější metoda pro realizaci stmelených konstrukčních vrstev hydraulickým pojivem z hlediska dopadů na společnost.

ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

V samotném závěru bych se chtěl vyjádřit k několika bodům, které si myslím, že je důležité zmínit v návaznosti na moji diplomovou práci. Jako první bod jsem zařadil legislativní část, kdy od 1. června 2019 nabyla účinnosti státní vyhláška č. 130, která definuje kritéria, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem. Což je obrovský plus nejen pro zhotovitele, neboť vyhláška řadí znovuzískanou asfaltovou směs do čtyřech kvalitativních skupin. Na základě kterých, je stanoveno další využití materiálu už od projektanta. Časem se ukáže, jak velkým přínosem tato nová vyhláška bude. Z mého pohledu se jedná o zlomový dokument, který by mohl zmírnit nejen tvorbu asfaltových kopců na využívaných mezideponiích. Ale i částečně omezit enormní zájem o vytěžování přírodního kameniva v dané lokalitě a tím i hyzdění samotné krajiny.

Dalším bodem je zhodnocení experimentální části mé práce, ve které bylo primárně zkoumáno, zda je možné využít asfaltový recyklát jako přijatelnou náhradu za přírodní kamenivo, aniž by byla ohrožena kvalita finální stmelené vrstvy konstrukce vozovky. Nejprve byly laboratorně zkoušeny jednotlivé vstupní materiály, mezi které patřil asfaltový recyklát, popílek, cement a přírodní kamenivo frakce 0/4 mm. Tyto vstupní materiály byly vybrány na základě lokálních zdrojů a dostupnosti na trhu. Konkrétně u asfaltového recyklátu zkouška zrnitosti poukázala na absenci jemné složky, která musela být doplněna jiným vhodným materiálem tak, aby byly splněna kritéria uvedená v normě pro výrobu a kontrolu směsí stmelených hydraulickými pojivy. Takto připravená suchá směs, kde asfaltový materiál tvořil dominantní část, byla opět posouzena dle požadavků legislativy. Z těchto poznatků byly vytvořeny jednotlivé receptury, které se lišily procentuálním zastoupením jednotlivých složek nebo použitím pevnostní třídy cementu. U každé receptury byla stanovena její objemová hmotnost a optimální vlhkost zkouškou Proctora modifikovaného. Na základě těchto výsledků mohla být vyrobena zkušební tělesa každé receptury, která byla následně podrobena zkoušce pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech. A také zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě. Laboratorně naměřené výsledky byly finálně porovnány s požadovanými hodnotami a bylo vyhodnoceno, zda navržená receptura splňuje kritéria na stanovenou třídu pevnosti směsí stmelených hydraulickými pojivy. Z původního záměru, kdy bylo cíleno na pevnostní třídu C_{3/4} a C_{8/10} se podařilo uspět dvou recepturám, která splňují požadavky nižší pevnostní třídy. Další dvě receptury nesplňovaly požadavky na pevnostní třídu C_{8/10}, nicméně tyto receptury splňují požadavky na pevnostní třídu C_{5/6}.

I přes tyto skutečnosti hodnotím experimentální část velice pozitivně, neboť s využitím asfaltového recyklátu v takovém zastoupení ve směsi, není prozatím u nás moc zkušeností. Dosáhnou pevnostní třídy C_{8/10} s využitím asfaltového recyklátu jako plniva směsi, je reálné. Muselo by se ale upravit dávkování a část asfaltového materiálu nahradit přírodním kamenivem, neboť je zřejmé, že asfaltový materiál má omezené pevnostní možnosti. Je to z velké pravděpodobnosti zapříčiněno skutečností, že jednotlivá obalená zrna asfaltem po sobě pod tlakem kloužou. Na druhou stranu využití asfaltového recyklátu ve stmelených směsích má za výhodu její finální elasticitu a houževnatost. Ta je například problémem, kdy se musí vybourat část realizované konstrukční vrstvy okolo šachet, neboť nedochází k odlupování materiálu jako u betonu. Poslední část byla věnována porovnání realizace stmelených konstrukčních vrstev na základě různých technologií pokládky. Vycházel jsem z vlastního smyšleného ukazatele, ve kterém byla zahrnuta hodnotící kritéria týkající se výstavby. Na základě tohoto ukazatele, vyšla nejlépe technologie recyklace na místě za studena.

V posledním bodě bych se chtěl zaměřit na shrnutí aktuálního stavu realizace projektů s využitím stavebního recyklátu z mého pohledu. Z vlastní zkušenosti z praxe mohu konstatovat, že investoři nejsou často dostatečně informovaní o možnostech opětovného zabudování asfaltového recyklátu do liniových staveb, často mají obavy a nevěří jim. Setkal jsem se i s názorem o nedůvěře opětovného zabudování stavebních recyklátů v souvislosti s kauzou zvlněné dálnice D47, že zabudování těchto materiálů je loterie, a proto jim nevěří a zavrhnou je na základě jednoho případu. Kdy je nutné podotknout, že do podkladu zmiňované D47 byla dle pokynu ŘSD použita struska, která nespadá do kategorie stavebních a demoličních odpadů. Struska je v katalogu odpadů uvedena v kategorii 10 – Odpady z tepelných procesů, zatímco stavební a demoliční odpad je zařazen do kategorie 17. Další moje zkušenost o nedůvěře záměny ŠDb frakce 0/63 mm za asfaltový recyklát stejné frakce byla se starostou nejmenované obce. Po mém návrhu této záměny pro použití do pokladní vrstvy komunikace jsem byl odmítnut s komentářem, že tento materiál není v projektové dokumentaci předepsán, tudíž ho nelze použít. Dále také argumentovat tím, že je stavba realizována z dotací Evropské unie a bylo by problematické projednávat změny. Ze zvědavosti jsem se obrátil na projektanta s touto alternativou a předložil mu požadované podklady o jakosti druhotného materiálu. Generální projektant mi sdělil, že pokud s uváděnou záměnou materiálu souhlasí investor, tak i on. Podkladní vrstvy byly nakonec realizovány dle projektu z přírodního materiálu, jelikož ze strany investora nebyla vůle měnit předepsané materiály.

Osobně si myslím, že značkou úlohu v tom hrálo i předvolební období, kdy pan starosta nechtěl pobuřovat místní obyvatele a měnit obecně známou šterkodrt' za uvažovaný asfaltový recyklát. Neboť tato záměna by určitě rozpoutala zajímavou debatu mezi jeho voliči.

K zamyšlení stojí i úvaha o změně způsobu zadávání veřejných zakázek. Momentálně zadávací proces nejčastěji užívá systém typu „Design – bid – build„ (vyprojektuj – zadej – postav), při kterém nejprve dochází k vypracování projektu na základě žádosti investora, ten je pak schválen a zařazen do výběrového řízení, kde je vybrán způsobilý zhotovitel, který stavbu realizuje. Vedle tohoto klasického systému, který je v dnešní době již zaběhlý. Existuje také systém typu „Design – build„ (stavba „na klíč„), ve kterém úzce spolupracuje projektant se zhotovitelem za účelem úspěšné realizace díla. Při aplikaci tohoto systému zadávání veřejných zakázek by bezesporu vznikl větší prostor pro prosazení zabudování recyklovaného stavebního materiálu, neboť by zhotovitelé vycházeli ze svých zkušeností získaných samotnou praxí.

POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

[1] Vlastní zpracování

[2] Odpadové hospodářství: Stavební a demoliční odpady. *Www.mzp.cz* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady

[3] ČESKÁ REPUBLIKA. *TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek*. In: . Ministerstvo dopravy, 2010.

[4] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrickým vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - síťový rozbor*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[5] 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*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[6] ČSN EN 933-10. *Zkoušení geometrickým vlastností kameniva: Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost fileru (prosévání proudem)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[7] Volně ložený cement. *Českomoravský cement* [online]. 2019 [cit. 2019-08-10]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement>

[8] ČSN EN 197-1 ED.2. *Cement: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[9] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Brno: Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2010.

[10] Kontinuální obalovny asfaltových směsí. *Ammann group* [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <https://www.ammann-group.com/cz-cz/plants/asphalt-plants/continuous-asphalt-mixing/prime>

[11] HÁJEK, Ondřej. *Moderní systémy 2D a 3D nivelace zemních strojů v praxi* [online]. In: . 23.06.2008 [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: https://bagry.cz/cze/clanky/technika/moderni_systemy_2d_a_3d_nivelace_zemnich_stroju_v_praxi

[12] ČESKÁ REPUBLIKA. *TP 208: Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena*. In: . Ministerstvo dopravy, 2009.

[13] KACHYŇA, Zdeněk. *Nové technologie v ČR a SR: Recyklace asfaltových vozovek za studena na místě* [online]. 11.9.2006 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/nove-technologie-v-cr-a-sr-recyklace-asfaltovych-vozovek-za-studena-na-miste/>

- [14] *Všechna plus pro studenou recyklaci: Recyklér za studena 2200CR* [online]. ČNES, , 4 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.cnes.cz/files/prospekt-vsechna-plus-pro-tudenou-recyklaci.pdf>
- [15] ČESKÁ REPUBLIKA. *TP 210: Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*. In: . Brno: Ministerstvo dopravy, 2011.
- [16] WILLIS, James. *Reclaimed Asphalt Pavement Expert Task Force* [online]. 2018 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://www.morerap.us/>
- [17] KOMÍNEK, Zdeněk. *Technologické pravidla č.121: Frézování asfaltových vrstev vozovek*. Společnost skupiny EUROVIA CS. 2015.
- [18] *Frézování asfaltových a betonových ploch* [online]. FREKOMOS, , 2 [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: http://www.frekomos.cz/media/files/frezovani_frekomos_web.pdf
- [19] *Přínos komplexního využití 3D přístupu při realizaci rekonstrukce vozovky* [online]. In: . EUROVIA CS, s. 8 [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.eurovia.cz/storage/app/uploads/public/5ba/0f1/1fc/5ba0f11fc2025030490523.pdf>
- [20] *Evropská databanka: Asfaltování Málek Praha Oprava, řezání vozovek a chodníků* [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.edb.cz/firma-333271-asfaltovani-malek-praha-praha-4>
- [21] HENKOVÁ, Svatava. *Inženýrské sítě a komunikace: Stroje na stavbu pozemních komunikací* [online]. In: . [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw06-56/prednaska-9
- [22] *Core competence Cutting Technology: High-tech in asphalt* [online]. In: . [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.wirtgen.de/en/technologies/application/cold-milling/operating-principle-large-milling-machines/fraesen.php>
- [23] HÁJEK, Ondřej. *Trimble GCS900 vede frézu po Kunratické spojce třetím rozměrem* [online]. In: . 2014 [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: https://bagry.cz/cze/clanky/job_reporty/trimble_gcs900_vede_frezu_po_kunraticke_spojce_tretim_rozmerem
- [24] ČESKÁ REPUBLIKA. *Metodický návod odboru odpadů Ministerstva životního prostředí pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2018. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/\\$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf)
- [25] *Produkce odpadů dle skupin odpadů* [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=produkce_odpadu_dle_skupin_odpadu&site=odpady
- [26] HENKOVÁ, Svatava. *Stroje a zařízení pro recyklaci stavebních materiálů* [online]. In: . [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-11#recykla%C4%8Dn%C3%AD-linky

- [27] Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice. ARSM [online]. 2002 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/index.php>
- [28] ČESKÁ REPUBLIKA. ČSN EN 933-11: Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva. In: . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] KUDRNA, Jan. *Pozemní komunikace II: Navrhování vozovek* [online]. Brno: Vysoké učení technické [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BM02-Pozemni%20komunikace%20II/pozemni%20kom%207%20Navrhovani%20vozovek.pdf>
- [30] STEHLÍK, Dušan. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích: Nestmelené podkladní vrstvy* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2006 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20299272-Prakticke-aplikace-v-pozemnich-komunikacich.html>
- [31] ČSN EN 14227-1. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy-specifikace: Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem*. Česká republika: UNMZ, 2013.
- [32] ČSN 73 6124-1. *Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy: Část 1: Provádění kontroly a shody*. Česká republika: UNMZ, 2016.
- [33] *Stmelené podkladní vrstvy* [online]. , 21 [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/-%20-%20P%C5%99edm%C4%9Bty%20dle%20semestru%20-%20-/6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%204%20prezentace%201%20-%20Stmelen%C3%A9%20podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf>
- [34] ČESKÁ REPUBLIKA. *TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY Kapitola 5: Podkladní vrstvy*. In: . Ministerstvo dopravy, 2015.
- [35] *Asfalt in figures 2017* [online]. Brusel: EAPA, 2018, , 11 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017/>
- [36] MOHAMMADINIA, Alireza, Arul ARULRAJAH, Suksun HORPIBULSUK a Avirut CHINKULKIJNIWAT. Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2017, 321, 547-556 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.09.039. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389416308615>
- [37] HOY, Menglim, Suksun HORPIBULSUK, Runglawan RACHAN, Avirut CHINKULKIJNIWAT a Arul ARULRAJAH. Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of The Total Environment* [online]. 2016, , 19-26 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.078. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716317715>

- [38] SEN, Tara a Umesh MISHRA. Usage of Industrial Waste Products in Village Road Construction. *International Journal of Environmental Science and Development* [online]. 2010, , 2 [cit. 2019-04-14]. ISSN 2010-0264.
- [39] SULTAN, Saud a Zhpnngyin GUO. Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in China. *International Journal of Transportation Science and Technology* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016300351>
- [40] ARULRAJAH, A., J. PIRATHEEPAN a M. M. DISFANI. Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2014, (2), 349-357 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000850. ISSN 0899-1561. Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000850](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000850)
- [41] KANG, Dong-Hee, Satish C. GUPTA, Andry Z. RANAIVOSON, John SIEKMEIER a Ruth ROBERSON. Recycled Materials as Substitutes for Virgin Aggregates in Road Construction: I. Hydraulic and Mechanical Characteristics. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 2011, (4) [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.2136/sssaj2010.0295. ISSN 0361-5995. Dostupné z: <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/75/4/1265>
- [42] HAIFANG, Wen, Li XIAOJUN, Edil TUNCER, O'Donnell JONATHAN a Danda SWAPNA. Utilize Cementitious High Carbon Fly Ash (CHCFA) to Stabilize Cold In-Place Recycled (CIR) Asphalt Pavement as Base Coarse [online]. 2011 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc831928/>
- [43] BILODEAU, Jean-Pascal, Guy DORÉ a Jonas DEPATIE. Mitigation of permanent deformation in base layer containing recycled asphalt aggregates. *Canadian Journal of Civil Engineering* [online]. 2013, , 9 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cjce-2012-0395#.XLM9kegzY2w>
- [44] ČSN EN 13286-50. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivky. Část 50: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [45] ČSN EN 13286-41. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivky. Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivky*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Doporučené užití RSM dle zastoupení základního materiálu [15].....	13
Tabulka 2 – Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy [12]	16
Tabulka 3 – Užití RSM do nestmelených vrstev [15].....	18
Tabulka 4 – Užití RSM do asfaltových, stmelených a prolévaných vrstev [15]	20
Tabulka 5 – Užití směsí stmelených hydraulickými pojivy ve vozovce [32]	21
Tabulka 6 – Třídy pevnosti stmelených směsí hydraulickými pojivy [32]	21
Tabulka 7 – Přiřazení původních názvů technologií k jednotlivým třídám pevnosti [33]	22
Tabulka 8 – Porovnání opětovného využití R-materiálu ve světě [35]	32
Tabulka 9 – Doporučené požadavky na RSM pro stmelené směsi [15]	34
Tabulka 10 – Doporučené požadavky na zrnitost stmelených směsí z recyklátu fr. 0/22 [15]	34
Tabulka 11 - Doporučené požadavky na zrnitost stmelených směsí z recyklátu fr. 0/31,5 [15].....	35
Tabulka 12 – Produkce skupin odpadů v zastoupení >1% na území ČR, za rok 2017 [25].....	46
Tabulka 13 – Neplovoucí složky hrubého recyklovaného kameniva [28]	54
Tabulka 14 – Rozdělení technologií studené recyklace dle použitého pojiva [12]	60
Tabulka 15 – Požadavky na recyklované stmelené směsi [12]	81
Tabulka 16 – A.1.- Doporučené požadavky zrnitosti směsí [12]	81
Tabulka 17 – Kontrolní zkoušky směsí stmelených hydraulickými pojivy [32]	82
Tabulka 18 – Zrnitost kameniva pro třídu pevnosti C _{1,5/2} a C _{3/4} [32]	85
Tabulka 19 – Zrnitost kameniva pro třídu pevnosti C _{5/6} a vyšší [32].....	85
Tabulka 20 – Rozměry nových moždířů [5].....	88
Tabulka 21 – Hlavní požadavky na nové pěchy [5]	91
Tabulka 22 – Rozměry ocelové desky [5].....	92
Tabulka 23 – Přehled metod přípravy vzorku [5].....	93
Tabulka 24 – Přehled modifikované Proctorovy zkoušky [5]	94
Tabulka 25 – Rozměry zkušebních těles [44]	96
Tabulka 26 – Teplota zmrazování a počty cyklů zmrazování [32]	104
Tabulka 27 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti vzorek 1. [1]	107
Tabulka 28 – Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{3/4} [1].....	109
Tabulka 29 – Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{5/6} a vyšší [1]	109
Tabulka 30 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti vzorek 2 . [1]	110
Tabulka 31 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{3/4} [1]	112
Tabulka 32 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{5/6} a vyšší [1]	112
Tabulka 33 – Záznam o zkoušce stanovení zrnitosti PDK 0/4 mm [1].....	118
Tabulka 34 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{3/4} [1]	120
Tabulka 35 - Vyhodnocení požadavku na zrnitost pro třídu pevnosti C _{5/6} a vyšší [1]	120
Tabulka 36 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 1 [1].....	123
Tabulka 37 – Stanovení vlhkosti těles REC 1 [1]	123
Tabulka 38 – Stanovení objemové hmotnosti těles REC 1 [1]	124
Tabulka 39 – Stanovení vlhkosti těles REC 2 [1]	127
Tabulka 40 – Stanovení objemové hmotnosti REC 2 [1].....	127
Tabulka 41 – Stanovení vlhkosti těles REC 3 [1]	131
Tabulka 42 – Stanovení objemové hmotnosti REC 3 [1].....	131
Tabulka 43 – Záznam zkoušení těles REC 1 [1]	134
Tabulka 44 – Tělesa po odformování REC 1 [1]	134
Tabulka 45 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě REC 1 [1].....	134
Tabulka 46 – Záznam o zkoušení těles REC 2 [1]	137

Tabulka 47 – Těles po odformování REC 2 [1]	137
Tabulka 48 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnost proti vodě REC 2 [1].....	138
Tabulka 49 – Záznam o zkoušení těles REC 3 [1]	140
Tabulka 50 – Těles po odformování REC 3 [1]	140
Tabulka 51 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti vodě a mrazu REC 3 [1].....	141
Tabulka 52 – Záznam o zkoušení těles REC 4 [1]	143
Tabulka 53 – Tělesa po odformování REC 4 [1]	143
Tabulka 54 – Zkouška pevnosti v tlaku a odolnosti proti vodě a mrazu REC 4 [1].....	144
Tabulka 55 – Kontrolní zkoušky geometrických charakteristik stmelených vrstev [12]	156
Tabulka 56 – Kontrolní zkoušky mechanických vlastností stmelených vrstev [12].....	156
Tabulka 57 – Složení jednotlivých receptur a požadovaná třída pevnosti [1]	159
Tabulka 58 – Výsledky průkazných zkoušek jednotlivých směsí [1]	160
Tabulka 59 – Splněných tříd pevnosti dle ČSN 73 6124-1 [1]	160
Tabulka 60 – Splněných pevností v tlaku po zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě [1].....	160
Tabulka 61 – Doporučené požadavky na ošetřování a ochranu povrchu [12].....	166

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Schéma konstrukce vozovky [29].....	12
Obrázek 2 – Porovnání Mohrovy kružnice nestmelené a stmelené vrstvy [33]	19
Obrázek 3 – Výsledky CBR v závislosti na obsahu RAP/RCA [40]	27
Obrázek 4 – Navržené skladby vozovek v Minnesotě [42].....	28
Obrázek 5 – Schéma výpočtového modelu mocnosti vrstvy s obsahem RAP [43]	30
Obrázek 6 – Technologie získávání asfaltového recyklátu z konstrukce vozovek [20]; [21].....	37
Obrázek 7 – Využití speciální silniční frézy v blízkosti kanalizačního poklopu [21].....	40
Obrázek 8 – Standartní a jemný frézovací buben silniční frézy [22]	42
Obrázek 9 – Využití 3D technologie při frézování krytu vozovky [23]	43
Obrázek 10- Graf produkce odpadů (skupina se zastoupením > 1%) za rok 2017 v ČR [25]	46
Obrázek 11 – Blokové schéma úpravy SDO na recyklovaný materiál [15].....	47
Obrázek 12 – Mobilní čelistový drtič na pásovém podvozku [26]	48
Obrázek 13 – Typy drtičů pro různé druhy drcení [26]	49
Obrázek 14 – Mobilní a Stacionární recyklační linka [26]	51
Obrázek 15 – Třídění a skladování R-materiálu [16].....	56
Obrázek 16 – Sestava strojů recyklačního vlaku s nasazením silniční frézy RX-900 [13]	62
Obrázek 17 – Schéma vybavení recyklační frézy [14]	62
Obrázek 18 – Postup, kdy je do nové směsi dodáváno cementové pojivo [14].....	63
Obrázek 19 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána cementová suspenze [14].....	63
Obrázek 20 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána asfaltová emulze [14]	64
Obrázek 21 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána kombinace cementové a asfaltové emulze [14].....	65
Obrázek 22 – Postup, kdy do nové směsi je dodáván pěnoasfalt [14]	65
Obrázek 23 – Postup, kdy je do nové směsi dodávána kombinace cementové emulze a pěnoasfaltu [14]	66
Obrázek 24 – Mobilní Obalovna ABM 240 – 320 BLACKMOVE [10]	71
Obrázek 25 – R-materiál volně ložený netříděný ve srovnání s tříděným R-materiálem [1]	76
Obrázek 26 – Sušárna Memmert [1].....	84
Obrázek 27 – Příprava sady sít pro zkoušku zrnitost na třepačce HAVER [1]	86
Obrázek 28 – Rozměry nástavce Proctorova moždíře [5].....	88
Obrázek 29 – Rozměry úložné desky [5]	89
Obrázek 30 – Půdorysný pohled na sestavu [5].....	89
Obrázek 31 – Proctorovy moždíře typu A a B [1].....	90
Obrázek 32 – Schéma pěchu a vodící tyče [5]	91
Obrázek 33 – Automatický přístroj pro výrobu těles dle Proctorovy zkoušky [1]	92
Obrázek 34 – Příprava pro zkoušení vzorků za pomoci dvou vah KERN [1].....	93
Obrázek 35 – Vibrační stůl se zatěžovacími trny [1]	97
Obrázek 36 – Zkušební lis ELE Autotest 3000 [1].....	99
Obrázek 37 – Příklady uspokojivého porušení válcových zkušebních těles [45]	101
Obrázek 38 – Příklady neuspokojivého porušení válcovitých těles [45].....	101
Obrázek 39 – Mrazící skříně WEISS [1]	103
Obrázek 40 – Zkušební tělesa během nasycování u zkoušky odolnosti proti mrazu a vodě [1]	104
Obrázek 41 – Zleva čistý R-materiál a vpravo s příměsí betonové stabilizace cementem [1]	105
Obrázek 42 – Přeprava a skladování zkoušeného materiálu v pokojové teplotě [1].....	106
Obrázek 43 – Protokol o zkoušce zrnitosti R-materiálu s příměsí betonu [1].....	108
Obrázek 44 – Protokol o zkoušce zrnitosti R-materiálu [1]	111
Obrázek 45 – Protokol o zkoušce zrnitosti popílku proséváním proudem vzduchu [1].....	113
Obrázek 46 – Technický list cementu CEM II 32,5 R [7].....	115
Obrázek 47 – Technický list cementu CEM II 42,5 R [7].....	116

Obrázek 48 – Skladování drobného kameniva frakce 0/4 mm [1].....	117
Obrázek 49 - Protokol o zkoušce zrnitosti PDK 0/4 - Chomutovice [1].....	119
Obrázek 50 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 1 [1].....	122
Obrázek 51 – Protokol o zhutnitelnosti směsi REC 1 [1].....	124
Obrázek 52 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 2 [1].....	126
Obrázek 53 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 2 [1].....	127
Obrázek 54 – Protokol o zhutnitelnosti směsi REC 2 [1].....	128
Obrázek 55 – Křivka zrnitosti směsi stmelené cementem REC 3 [1].....	130
Obrázek 56 – Záznam o stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti REC 3 [1].....	131
Obrázek 57 – Protokol o zhutnitelnosti směsi stmelené cementem REC 3 [1].....	132
Obrázek 58 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 1 [1].....	135
Obrázek 59 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 1 [1].....	136
Obrázek 60 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 2 [1].....	138
Obrázek 61 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 2 [1].....	139
Obrázek 62 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 3 [1].....	141
Obrázek 63 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 3 [1].....	142
Obrázek 64 – Protokol o zkouškách pevnosti v tlaku po 7 dnech REC 4 [1].....	144
Obrázek 65 – Protokol o zkouškách pevnosti a odolnosti proti vodě a mrazu REC 4 [1].....	145
Obrázek 66 – list D0-N-3 z TP 170 [9].....	148
Obrázek 67 – list D0-N-5 z TP 170 [9].....	150
Obrázek 68 – Roztažení kameniva frakce 0/4 mm pomocí grejdrů [1].....	151
Obrázek 69 – Rovnání navezeného R-materiálu pomocí grejdrů [1].....	152
Obrázek 70 – Hutnění rozhrnutého R-materiálu [1].....	152
Obrázek 71 – Dávkovač cementu [1].....	153
Obrázek 72 – Zemní fréza s kropicí [1].....	154
Obrázek 73 – Finální směs stmelená cementem [1].....	154
Obrázek 74 – Urovnání grejdrem a následné hutnění zemním válcem [1].....	155
Obrázek 75 – Ošetřování povrchu kropením a následné dohutnění pneumatickým válcem [1].....	155
Obrázek 76 – Oceněný soupis prací původní konstrukce [1].....	157
Obrázek 77 – Oceněný soupis prací nové konstrukce [1].....	157

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1 – Objemová hmotnost vlhké směsi [5].....	95
Rovnice 2 – Objemová hmotnost suché směsi [5].....	95
Rovnice 3 – Stanovení vlhkosti [5]	95
Rovnice 4 – Určující mezerovitost směsi [5]	96
Rovnice 5 – Hmotnost zkušebního tělesa [44].....	97
Rovnice 6 – Pevnost v tlaku R_c zkušebního tělesa [45]	102
Rovnice 7 – Vzorec hodnotícího koeficientu udržitelnosti [1]	163
Rovnice 8 – Koeficient udržitelnosti konvenční technologie [1].....	163
Rovnice 9 – Koeficient udržitelnosti recyklace za studena na místě. [1]	166
Rovnice 10 – Koeficient udržitelnosti recyklace za studena v míchacím centru na místě [1].....	167

SEZNAM ZKRATEK

ACL	Asfaltový beton do ložné vrstvy
ACO	Asfaltový beton do obrusné vrstvy
ACP	Asfaltový beton do podkladní vrstvy
ČR	Česká republika
D_{cdp}	Relativní poškození podloží
D_{cdv}	Relativní poškození vozovky
EAPA	European Asphalt Pavement Association
$E_{def,2}$	Modul přetvárnosti
FL	Plovoucí částice – dřevo, polystyrén apod.
MZ	Mechanicky zpevněná zemina podle ČSN EN 13285 NA
MZK	Mechanicky zpevněné kamenivo podle ČSN EN 13285
Ra	Recyklát z asfaltových materiálů
RAP	Recycled asphalt pavement – asfaltový recyklát
Rb	Recyklát z pálených zdících prvků
Rc	Betonový recyklát
RCA	Recycled concrete aggregate – betonový recyklát
Rg	Recyklát sklovitý
RSM	Recyklovaný stavební materiál
Ru	Recyklát z kameniva přírodního, stmeleného i nestmeleného
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
SC	Směs kameniva stmelená cementem
SDO	Stavebně demoliční odpad
SH	Směs kameniva stmelená hydraulickými silničními pojivy
ŠDa	Štěrkoдр podle ČSN EN 13285, kvalitativní kategorie A
ŠDb	Štěrkoдр podle ČSN EN 13285, kvalitativní kategorie B
TDZ	Třída dopravního zatížení
TKP	Technicko-kvalitativní podmínky
TLS	Terestrické laserové skenování
TP	Technické podmínky
TSK Praha	Technická správa komunikací hlavního města Prahy, a. s.
VŠ	Vibrovaný štěrk podle ČSN 73 6126-2
X	Přilnavé nečistoty, jíl, kovy, neplovoucí dřevo, stavební plasty, pryž
Y	Papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály apod.
ZBV	Změna během výstavby