

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Kompozitní směsi pro recyklace konstrukčních vrstev vozovky za studena
s využitím upravených vysokopecních strusek

Bc. Martin Živný

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. Martin Živný**
Osobní číslo: **D16415**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Kompozitní směsi pro recyklace konstrukčních vrstev vozovky za studena s využitím upravených vysokopecních strusek**
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 experimentálně proveďte a analyzujte problematiku vhodnosti využití alternativních pojiv na bázi vysokopecní strusky v recyklovaných směsích stmelovaných vrstev konstrukcí pozemních komunikací. Navrhněte možnosti použití zvolených typů strusek a porovnejte jejich účinek ve vztahu k tradičnímu postupu, který je založen na využití cementu jako hydraulického pojiva. Zaměřte se na získatelné zdroje vysokopecních strusek alespoň z dvou lokalit a jako alternativy k nim buď na vzorek ocelářské, nebo pánvové strusky. V diplomové práci se zaměřte na materiálové charakteristiky (především pevnostní) navržených kompozitních směsí, 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 experimenty na navržených směsích (recepturách). Struktura práce je naznačena níže.

Úvod

Analýza současného stavu

Stanovení cílů

Příprava a vypracování experimentu, včetně popisu vstupních materiálů

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)

ČSN 14 227-2 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 2: Směsi z kameniva stmelené struskou

ČSN 14 227-3 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 3: Směsi z kameniva stmelené popílkem

ČSN 14 227-5 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 5: Směsi z kameniva stmelené hydraulickými silničními pojivy

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: **21. května 2019**

L.S.

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

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. října 2018

PROHLÁŠENÍ AUTORA

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

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona číslo č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice společně s Fakultou stavební ČVUT v Praze mají 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 společně s ČVUT v Praze oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

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

V Žiželicích dne 28. 8. 2019

Bc. Martin Živný

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Lopourovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady a poskytnuté materiály, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce.

Významné poděkování patří zaměstnancům firmy EUROVIA Kamenolomy, a.s., provozovnou a sídlem v Plaňanech, za poskytnutí vzorku kameniva, firmě EUROVIA CS, a.s., závod Emulze Kolín, sídlem v Kolíně, za poskytnutí vzorku asfaltové emulze, firmě Českomoravský cement, a.s., závod Radotín, sídlem v Praze, za poskytnutí cementu, firmě Východočeská obalovna, s.r.o., provozovnou a sídlem v Plačicích, za poskytnutí vzorku asfaltového recyklátu, a v neposlední řadě Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. z Fakulty stavební ČVUT v Praze, za obstarané vzorky vysokopecních strusek a přípravu směsného pojiva vysokopecní strusky a fluidního popílku.

Velké poděkování patří také zaměstnancům firmy VIALAB CZ, s.r.o., sídlem v Praze a pracovníkům silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT v Praze, za pomoc a cenné rady při provádění laboratorních zkoušek v jimi poskytnutých prostorách, bez kterých by experimentální část této diplomové práce nešla vůbec zrealizovat.

V neposlední řadě patří můj velký dík mým rodičům za podporu během studia.

V Žiželicích dne 28. 8. 2019

Bc. Martin Živný

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá využitím upravených vysokopecních strusek v recyklovaných stmelených směsích konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Teoretická část shrnuje poznatky o technologii recyklace za studena a věnuje se alternativním zdrojům hydraulických pojiv v podobě vysokopecních strusek. V experimentální části je popsána výroba jednotlivých stmelených směsí včetně vyhotovení zkušebních těles a postupy provedených laboratorních zkoušek. V závěru jsou shrnuty a porovnány vyhodnocené výsledky experimentálních zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Netuhá vozovka; recyklace za studena; cement; struska; pevnost v příčném tahu; tuhost; odolnost proti šíření trhliny

TITLE

Composite mixtures for cold recycled pavement layers utilizing modified blast furnace slags

ANNOTATION

This master thesis deals with the use of treated blast furnace slags in cold recycled stabilized mixtures for structural pavement layers. The theoretical part summarizes the existing knowledge about cold recycling technology and deals with alternative sources of hydraulic binders in the form of blast furnace slags. The experimental section describes the production of individual bonded mixtures, including the preparation of test specimens and performed laboratory test procedures. In conclusion, the evaluated results of experimental tests are summarized and compared.

KEYWORDS

Flexible pavement; cold recycling; cement; slag; determination of the indirect tensile strength; stiffness; resistance to crack propagation

OBSAH

0 ÚVOD.....	- 9 -
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	- 11 -
1.1 Význam recyklace v silničním stavitelství.....	- 11 -
1.2 Podkladní vrstvy vozovek	- 11 -
1.3 Recyklace stavebních materiálů	- 14 -
1.4 Technologie recyklací v dopravním stavitelství	- 16 -
1.4.1 Recyklace na obalovně za tepla	- 16 -
1.4.2 Recyklace v míchacím centru za studena	- 18 -
1.4.3 Recyklace na místě za horka	- 19 -
1.4.4 Recyklace na místě za studena	- 21 -
1.5 Standartní vstupní materiály pro studenou recyklaci	- 28 -
1.5.1 Kamenivo	- 28 -
1.5.2 Pojivo	- 29 -
1.6 Vedlejší produkty metalurgického průmyslu	- 37 -
1.6.1 Struska	- 38 -
1.6.1.1 Metalurgické strusky.....	- 38 -
1.6.1.2 Vliv chlazení na vlastnosti strusek	- 41 -
1.6.1.3 Využití strusek v praxi	- 44 -
1.6.2 Popílek a škvára.....	- 48 -
2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	- 49 -
3 METODY MĚŘENÍ VLASTNÍHO EXPERIMENTU.....	- 50 -
3.1 Použité směsi a jejich výroba	- 50 -
3.1.1 Druhy alternativních pojiv použitých při experimentu.....	- 53 -
3.2 Výroba zkušebních těles.....	- 57 -
3.3 Provedené zkoušky experimentu	- 59 -
3.3.1 Stanovení kusové zrnitosti	- 59 -

3.3.2 Stanovení suché laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a optimální vlhkosti	- 61 -
3.3.3 Stanovení laboratorní objemové hmotnosti zkušebních těles	- 64 -
3.3.4 Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi	- 65 -
3.3.5 Stanovení mezerovitosti.....	- 67 -
3.3.6 Stanovení skutečné vlhkosti směsi sušením v sušárně	- 67 -
3.3.7 Stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě	- 68 -
3.3.8 Stanovení modulu tuhosti	- 69 -
3.3.9 Šíření trhliny zkouškou ohybem.....	- 71 -
4 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH MĚŘENÍ.....	- 74 -
4.1 Sítový rozbor.....	- 74 -
4.2 Suchá laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost	- 76 -
4.3 Laboratorní objemová hmotnost zkušebních těles	- 77 -
4.4 Maximální objemová hmotnost směsi	- 85 -
4.5 Mezerovitost.....	- 86 -
4.6 Skutečná vlhkost směsi.....	- 87 -
4.7 Pevnost v příčném tahu a odolnosti proti vodě	- 88 -
4.8 Modul tuhosti	- 96 -
4.9 Šíření trhliny	- 107 -
4.10 Stručná finanční analýza	- 110 -
5 DISKUZE A DOPORUČENÍ.....	- 112 -
6 ZÁVĚR.....	- 116 -
7 POUŽITÁ LITERATURA	- 117 -
8 DOKLADOVÁ ČÁST	- 127 -

0 ÚVOD

Už od doby Římského impéria je v rámci hospodářského rozvoje státu kladen důraz na dostatečnou a neustále se rozvíjející dopravní infrastrukturu. Rozvoj pozemních komunikací je tedy jedním z primárních faktorů pro hospodářství státu, a to nejen v podobě neustálého růstu komunikační sítě a budování pozemních komunikací nových, ale především při údržbě stávajících. Jelikož jsou rozvoj a údržba komunikační sítě spjaté s hospodářským rozvojem státu, s vývojem nových technologií je v silničním stavitelství kladen důraz také na úsporu jak finančních prostředků, tak i na efektivnost jejich využití. V posledních letech zároveň roste snaha nejen o úsporu, efektivnost, ale také o ochranu životního prostředí pro zachování udržitelného rozvoje.

Technologie výstavby pozemních komunikací má v České republice, potažmo v bývalém Československu dlouholetou tradici, která si zachovává tradiční metody, které jsou v posledních dekáдах, skrze národní standardy, pouze upravovány na základě nařízení a normalizací Evropské unie. Je zajímavé, že právě pracovní postupy recyklace byly v Československu spíše upozaděné a neprováděly se, navzdory jejich předchozí odzkoušené efektivnosti. V současné době se situace ohledně recyklací vozovek změnila, a dá se říci, že pokud to situace na stavbě dovolí, upřednostní se recyklace podkladních vrstev vozovek před realizací nových konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Důvod je prostý, finanční výhodnost. Recyklace vozovek se tak stala díky tomuto důležitému aspektu jedním ze stěžejních nástrojů pro jejich údržbu, slouží však i jako možné technické řešení pro konstrukce nových pozemních komunikací. Tento technologický postup oprav vozovek umožňuje po prvním použití původních materiálů obnovit jejich potenciál (např. návrh vhodných receptur, volba technologie, atd.), a to v maximální možné míře a dále má příznivý vliv na snížení vyprodukovaného odpadu v průběhu realizace. Recyklace se tak dostává do povědomí jako komplexní a hodnotný nástroj k opravám a rekonstrukcím vozovek pozemních komunikací.

Recyklovaný materiál v podobě znovuzískané asfaltové směsi, zrnitého materiálu původních nestmelených vrstev nebo jako betonový recyklát je nehomogenní standardní materiál, který ovšem vyžaduje zvýšenou kontrolu jakosti. Pokud původní materiál splňuje jakostní požadavky určené technickými normami, lze je použít při výstavbě nebo údržbě vozovek bez snížení výsledné kvality. Jednou z variant nahrazení původního materiálu materiálem recyklovaným je možno vydedukovat u vysokopecních strusek. Granulované

vysokopecní a ocelářské strusky jsou dobré a perspektivní alternativy k substituci hydraulických pojiv, jelikož se jedná o odpadní materiál, který je takto možné využít a recyklovat. I když se jedná o široko-spektrální materiál, jeho hodnota na trhu je v porovnání s ocelí nebo železem velmi nízká. Zároveň se ovšem produkci strusky nevyhneme, jelikož vzniká jako vedlejší produkt při metalurgických procesech. Metalurgický průmysl je největším průmyslem na světě a produkce strusky patří k nejobemnějším odpadním produktům na světě. Proto nejen postavení strusky na trhu, ale i ekologické myšlení se kladně staví k využívání strusky. Struska se tak nelikviduje, ale vhodně se dále využívá, což snižuje vysoké náklady na energetické zdroje, které jsou využívány v metalurgickém průmyslu. Jednoznačně má tedy využití strusky svou perspektivu. V historii tomu tak ovšem nebylo. V minulém století zaznamenal metalurgický průmysl velký rozvoj, avšak nakládání s odpadním materiálem zůstalo v tradiční podobě.

Využití strusky jako pojiva bylo popsáno nicméně již v 18. století, kdy získal patent na tento způsob výroby pojiva J. Payne. V roce 1859 poukázal na možné využití strusky ve stavitelství F. Lürman, který strusku využil při tvorbě žáruvzdorného materiálu, ze kterého chtěl následně postavit německý závod. O pár let později, v roce 1862 E. Lange popsal hydraulické vlastnosti vysokopecní strusky, čímž poukázal na možnost využití strusky ve stavebním průmyslu při výrobě cementu. Vývoj využití strusky tedy započal již v 18. století, nicméně do roku cca 1970 se využití strusky příliš neujalo.

Běžně byly pro odpadní materiály ze sléváren vytvořeny speciální skládky, kde byly tyto odpadní vedlejší produkty sléváren naváženy. Proto dnes není výjimkou vidět někde kopce tvořené tímto odpadním materiálem, které jsou nazývány haldy. V České republice se vyskytuje hned několik velkoobjemových hald, které mají v součtu rozlohu řádově desítek km². Tento rozměr skládek byl způsobený především neexistencí norem a neřešením otázky využití tohoto druhu odpadu. Od roku 1970 se tedy řeší otázka, jak tento navezený odpadní materiál, který lze dále zužitkovat, odstranit z krajiny a zabránit tak možným haváriím. Ty mohou mít rozsah až v podobě ekologické havárie, jelikož v haldách může ležet kromě neškodného materiálu i odpad / nebezpečný odpad, který není blíže specifikován a způsobuje ohrožení okolního životního prostředí. To je případem například buštěhradské haldy u Kladna, kde je zdokumentováno, že vedle strusky sem byly v minulosti vyváženy i některé nebezpečné odpady, jež části této haldy kontaminovaly a představují z hlediska budoucnosti do jisté míry časovanou bombu. [1, 2]

1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato část diplomové práce se zaměřuje na komplexní přehled technologií, které se při provádění recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek používají. Další část diplomové práce je zaměřena na klasické materiály používaných při recyklaci za studena (cement, asfalt, asfaltová emulze, atd.), ale věnuje se i materiálům, které by v budoucnu mohly buď z části, nebo zcela, některý z klasicky používaných materiálů nahradit.

1.1 Význam recyklace v silničním stavitelství

Recyklace stavebních materiálů je technologický proces, při kterém se materiál dříve zabudovaný ve stavební konstrukci získává zpět za účelem jeho opětovného použití. Z tohoto hlavního důvodu se stává recyklace jedním z důležitých nástrojů pro zachování udržitelného rozvoje a zároveň respektování ochrany životního prostředí. Využití recyklace má smysl jen za předpokladu, že bude její realizace ekonomicky výhodná. Proto se musí provádět správným způsobem, aby se opětovného využití recyklovaných materiálů dosáhlo v maximální možné míře. [3]

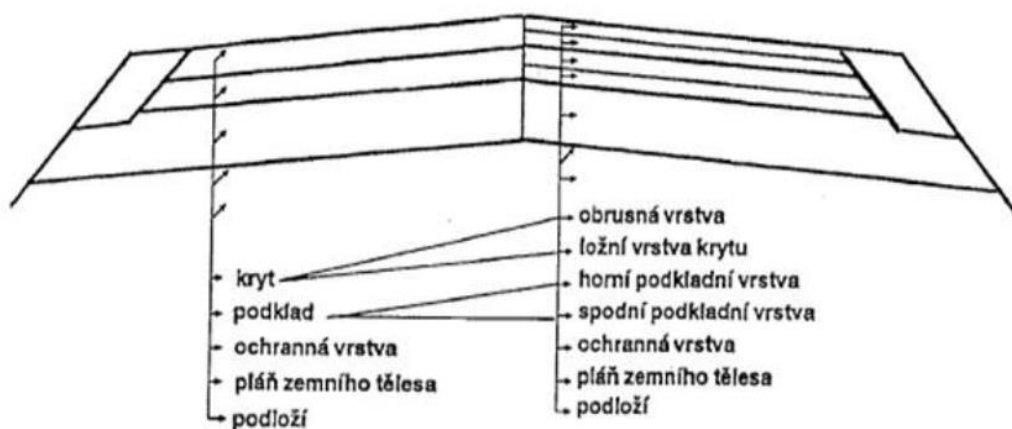
Pozitivní dopady recyklace stavebních materiálů na životní prostředí jsou zřejmé z níže uvedených důvodů:

- snížení objemu odpadů a s nimi spojená potřeba budovat další skládky,
- šetření kapacity přírodních neobnovitelných zdrojů (kamenivo),
- úspora energií (elektrina, PHM),
- snížení nežádoucích vlivů (hluk, prach, zatížení PK),
- ekonomické (zkrácení doby výstavby).

1.2 Podkladní vrstvy vozovek

Netuhou vozovkou je rozuměna vozovka s asfaltovým krytem a s asfaltem stmelenými nebo vůbec nestmelenými podkladními vrstvami. Konstrukce vozovky je složena z několika na sebe položených vrstev určitého konstrukčního materiálu s vlastnostmi, které zajišťují plynulý a hladký provoz na pozemních komunikacích. Tyto jednotlivé vrstvy lze rozdělit do několika kategorií. Vozkově souvrství se skládá tedy z vrstvy krytové, podkladní, ochranné a podloží. V České republice je většina svrchních vozovkových konstrukcí tvořena asfaltovými vrstvami (jedná se tedy o netuhé či polotuhé vozovky). Všechny druhy vozovek pozemních komunikací musejí při své konstrukci dodržet a následně splňovat podmínky

odpovídajících norem ČSN. Tyto předpisy vycházejí z vyhlášek a zákonů, které spadají pod správu Ministerstva dopravy oboru pozemních komunikací.



Obrázek 1 - Schéma konstrukce vozovky

Zdroj: [4]

Podkladní vrstva vozovky, což je vrstva spojující kryt vozovky s vrstvou ochrannou, se dělí na horní a spodní a jejím základním úkolem je rozložení sil působících na vozovku z dopravního zatížení a vedení této zátěže od krytu vozovky k jejímu podloží. Tloušťka jednotlivých vrstev se odvíjí od míry předpokládaného zatížení, které na vozovku bude v budoucnu vyvíjeno. Horní podkladní vrstva, která se blíží ke krytu vozovky, má jiné kvalitativní prvky a požadavky, než spodní podkladní vrstva, především z důvodu toho, že horní podkladní vrstva musí přenášet větší zatížení. Zde by se dala naskytnout možnost, jak ekonomicky zefektivnit stavbu, jelikož spodní podkladní vrstvy nemusí splňovat takové kvalitativní požadavky, než vrstvy nad nimi.

Do podkladních vrstev patří spodní část konstrukce vozovky, ale i nemotoristické komunikace a dopravní či jiné plochy, u kterých je možné použití podkladních vrstev také jako vrstev krycích. Do podkladních vrstev lze tak obecně zařadit všechny plochy ležící mezi krytem vozovky (horní vrstvou) a zemní plání. Podkladové vrstvy se také dělí na dva různé konstrukční typy, a to podkladní vrstva vozovek nestmelená a stmelená hydraulickým pojivem, asfaltem nebo proléváním.

Nestmelené podkladní vrstvy

Nestmelené podkladní vrstvy neobsahují žádné pojivo a jejich pevnost zajišťuje fyzikální tření jednotlivých zrn kameniva o sebe. Do nestmelených podkladních vrstev spadají například vrstvy provedené z mechanicky zpevněného kameniva, vibrované šterku, či mechanicky zpevněné zeminy. Kvalita takové konstrukční vrstvy je závislá na velikosti

jednotlivých zrn kameniva, druhu použitého kameniva a mezerovitosti mezi jednotlivými zrny. Nejvhodnějšími materiály jsou kameniva s plynulou křivkou zrnitosti.

Všeobecné podmínky pro nestmelené vrstvy vozovky upravují normy ČSN EN 13285 Nestmelené směsi - Specifikace, ČSN 73 6126-1 Stavba vozovek - Nestmelené vrstvy - Část 1: Provádění a kontrola shody a ČSN 73 6126-2 Stavba vozovek - Nestmelené vrstvy - Část 2: Vrstva z vibrovaného štěrku (ve znění pozdějších předpisů) a také TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. [5–8]

Tabulka 1 - Požadavky na recyklované nestmelené směsi

Článek normy ČSN EN 13285	Vlastnost	Požadavky ČSN EN 13285		
		MZK	ŠDA	ŠDB
4.3.1	Označení směsi	0/32; 0/45	0/32; 0/45; 0/63	0/32; 0/45; 0/63
4.3.3 tabulka 4	Nadsítné	OC ₉₀	OC ₈₅	OC ₈₀
4.3.2 tabulka 2	Max. obsah jemných částic ¹⁾	UF ₉		UF ₁₂
4.4.1 tabulka 6	Požadavky na zrnitost ¹⁾	GA, Gc, Go	GE	GN
4.4.2 tabulka 7 a 8	Zrnitost jednotlivých dávek ¹⁾	Požadavky tab. 7 a 8	—	—
NA.4.5	CBR po sycení ve vodě po dobu 96 hodin ¹⁾	Min. 100 %	—	—
NA.5.3	Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost ²⁾	Deklarovaná hodnota		
NA.5.3	Vlhkost ³⁾	-3% až +2%	—	—

¹⁾ Nezkouší se u směsí, kde jedinou složku tvoří R-materiál
²⁾ Platí pro směsi zhotovené z dodávaného recyklovaného kameniva
³⁾ Doporučené max. odchylky od deklarované hodnoty

Zdroj: [5]

Stmelené podkladní vrstvy

Jedná se o podkladní vrstvu stmelenou hydraulickými pojivy. Pro tyto vrstvy platí soubor norem ČSN EN 14227 Směsi stmelené hydraulickými pojivy a norma ČSN 73 6124-1 Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy - Část 1: Provádění a kontrola shody. Jedná se o směsi, u kterých je jejich pevnost docílena přidáním pojiva. Cílem směsi je vyrobit takový poměr z vhodně vybraného materiálu a pojiva, který poskytne dané podkladní vrstvě optimální smykovou pevnost v dané pevnostní třídě. Primárním cílem není poskytnutí co největší pevnosti vrstvy, jelikož zvýšenou tuhost a pevnost může vlivem smršťování a dotvarování stmelené vrstvy doprovázet možný vznik reflexních trhlin, což může vést až k výskytu trhlin na krytu vozovky. Základem je najít kompromis mezi tuhostí stmelené podkladní vrstvy a její pružností. Pružnost je docílena snížením pevnosti

vozovky, což ovšem vede ke křehkosti směsi, která opět vede k výskytu trhlin jak v podkladní vrstvě vozovky, tak v jejím krytu. Tyto trhliny nejsou masivního charakteru jako v předchozím případě. Jedná se o mikrotrhliny, které nenarušují pevnost vozovky, jelikož vedou opačným směrem, než vedou smykové síly ve vozovce a jejich výskyt je tedy žádoucí. Právě tyto mikrotrhliny napomáhají zvyšování pružnosti a poddajnosti vozovky, která je poté odolnější i na teplotní změny, které by mohly způsobit vážné trhliny ve vozovce. Jako pojivo lze použít různé druhy cementů, strusek, popílků a hydraulických silničních pojiv. Ke každému druhu zvoleného pojiva se pak samozřejmě váže i odpovídající technická norma upřesňující jakostní požadavky na danou směs. [9]

Tabulka 2 - Požadavky na recyklované stmelené směsi

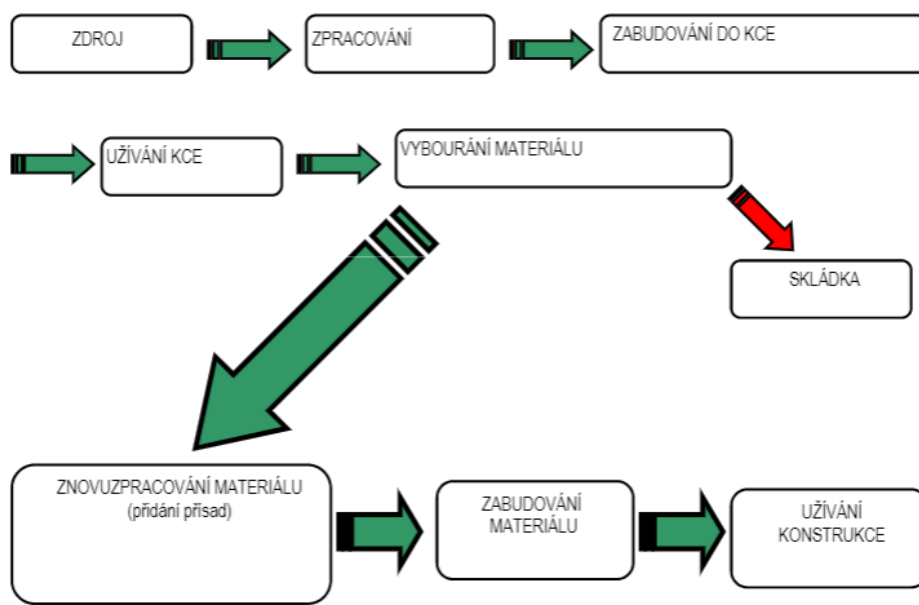
Vlastnost		Požadavky pro směsi s použitím pojiva		
		cement nebo jiné hydr. pojivo	cement + asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt	asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt
Označení směsi	recyklace na místě	0/32; 0/45		0/32
	recyklace v centru	0/16; 0/22; 0/32; 0/45		0/16; 0/22; 0/32
Požadavky na zrnitost směsi ^{1) 2)}		Příloha A, tab. A.1		Příloha A, tab. A.2
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost		deklarovaná hodnota		
Vlhkost ³⁾		-3% až +2%		
Min. pevnost v tlaku R_c po 28 dnech ⁴⁾ Odolnost proti mrazu a vodě		$C_{3/4}$ 85% pevnosti R_c	—	—
Min. pevnost v příčném tahu R_{ft} ⁵⁾ po 7 dnech Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě)		0,30 až 0,70 MPa 75% pevnosti R_{ft}	0,30 až 0,70 MPa 75% pevnosti R_{ft}	0,30 MPa 60% pevnosti R_{ft}
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 (R_{ft}) 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 $C_{3/4}$ podle ČSN EN 14227-1 je možno nahradit zkoušku pevnosti v tlaku (R_c) a odolnosti proti mrazu a vodě.				

Zdroj: [5]

1.3 Recyklace stavebních materiálů

Recyklace stavebních materiálů znamená, jak bylo uvedeno výše, technologický proces využívající vhodné nástroje k získání materiálu dříve již použitého v konstrukci pozemních komunikací za účelem jeho opětovného použití bez ztráty výsledné kvality díla. Jako technologický proces recyklace se nejčastěji používá frézování a vybourávání vrstev vozovky s následným drcením a tříděním demoličního odpadu, který při opravě pozemní komunikace vznikl. Při recyklaci vozovek nám může vzniknout několik typů druhů materiálů

(popsány v následujících odstavcích), které se dříve či později dají opětovně použít. Vzniklé recyklované materiály lze použít například při zcela novém budování veškerých konstrukčních vrstev vozovek, ale i k možnému zlepšení vlastností materiálů stávajících.



Obrázek 2 - Životní cyklus materiálů

Zdroj: [10]

R-materiál je asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby, která byla přetříděna a případně předrcena. Jedná se tedy o materiál s asfaltovým základem, lze jej použít stejným způsobem jako recyklované kamenivo, ale nejefektivnějším uplatněním R-materiálu je jeho použití při výrobě asfaltových směsí. Nejvyšší možné kvality recyklovaného materiálu je dosaženo ve chvíli, kdy je konstrukce silnice frézována po jednotlivých vrstvách.

Recyklované kamenivo je kamenivo anorganického původu, které bylo dříve použito jako stavební materiál ve stavebních konstrukcích. Musí splňovat požadavky jako normální kamenivo přírodního charakteru a nemělo by mít vliv na technologii, kterou je prováděna konstrukce podkladních vrstev vozovky. Jeho použití upravuje TP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací a jakostní požadavky konkretizují normy stejné, jako u kameniva přírodního (např. normy ČSN EN 13285; ČSN 73 6126-1; ČSN 73 6126-2; ČSN EN 14227-1, - 2, -3, -4, -5; ČSN 73 6124-1, ČSN 73 6124-2, ČSN 73 6127-1,-2 -3, -4).

Recyklát (recyklovaný stavební materiál) je dalším typem materiálu, který je možné recyklací vyrobit a vzniká rozdrčením a roztříděním stávajících konstrukcí nebo jejich částí. Lze jej používat jako náhradu přírodních zemin a sypanin pro stavbu zemního podkladu konstrukce vozovky nebo při výrobě stmelené podkladní vrstvy. Jakostně se jedná o materiál horší, než recyklované kamenivo. Jeho jakostní požadavky jsou upraveny v souboru norem ČSN EN 14227 a současně ČSN 73 6124-1, pokud je záměrem použití recyklátu pro výrobu stmelěných podkladních vrstev.

Poslední druhem materiálu, který může při opravách pozemních komunikací vzniknout, je materiál vznikající při opravě podkladních vrstev metodou recyklace za studena na místě. [5, 6]

1.4 Technologie recyklací v dopravním stavitelství

V této kapitole se práce zaměřuje na kategorizaci recyklace jako nástroje pro úpravu nebo stavbu pozemních komunikací. Kategorizace je možná dle mnoha různých hledisek a některá z nich jsou uvedena v následujících řádcích.

Rozdělení recyklace podle místa provádění:

- ve výrobním centru (in-plant),
- na místě (in-situ).

Rozdělení recyklace podle teploty technologického procesu:

- za tepla,
- za studena.

Dělení recyklace podle technologie provádění:

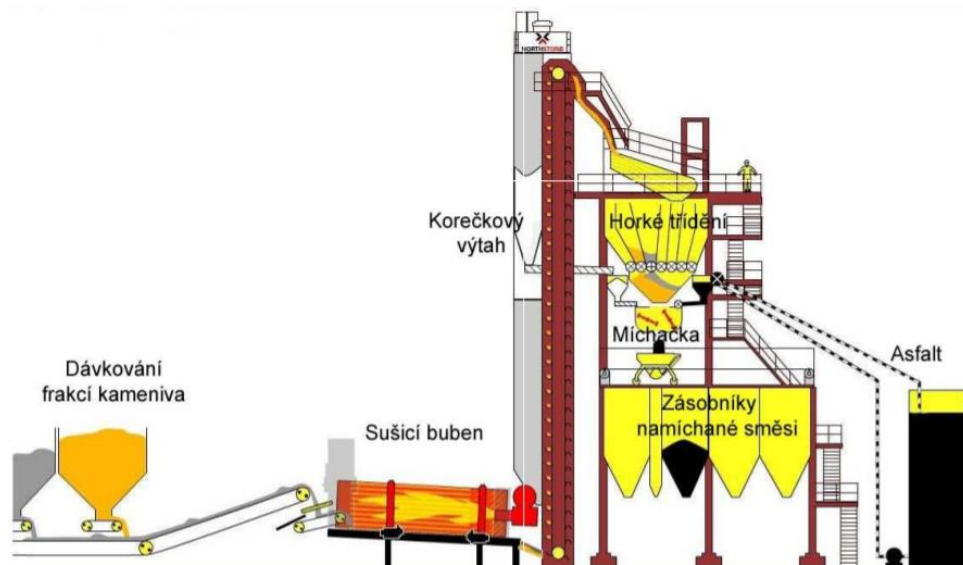
- na obalovně za tepla,
- v míchacím centru za studena,
- na místě za horka,
- na místě za studena.

1.4.1 Recyklace na obalovně za tepla

Tato technologie je určena pro realizaci asfaltových stmelěných vrstev. Materiál pro recyklaci je získán z vybourání nebo vyfrézování asfaltové směsi pocházející z horních vrstev vozovky (R-materiál). Získaný R-materiál se ukládá na skládkách k tomu určeným, upravuje se pomocí drcení a třídění takovými způsoby, aby byly splněny jakostní požadavky

příslušných norem. Používá se opětovné aktivace pojiv, které R-materiál obsahuje a umožňuje efektivnější opětovné využití materiálu.

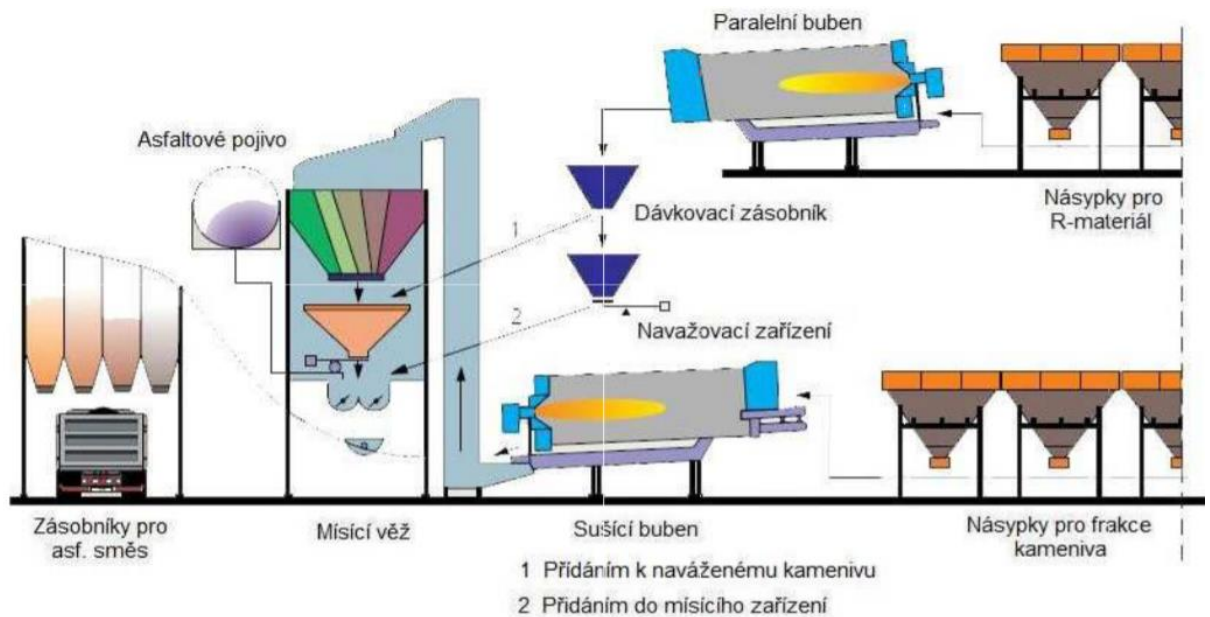
Nejčastěji se v našich končinách využívá recyklace na obalovně pomocí šaržové míchačky, kde do předehřátého kameniva umístěného v míchačce přidává upravený R-materiál. Jelikož jsou skládky nezastřešené, vyskytují se u této technologie problémy s vlhkostí.



Obrázek 3 - Šaržová obalovna

Zdroj: [11]

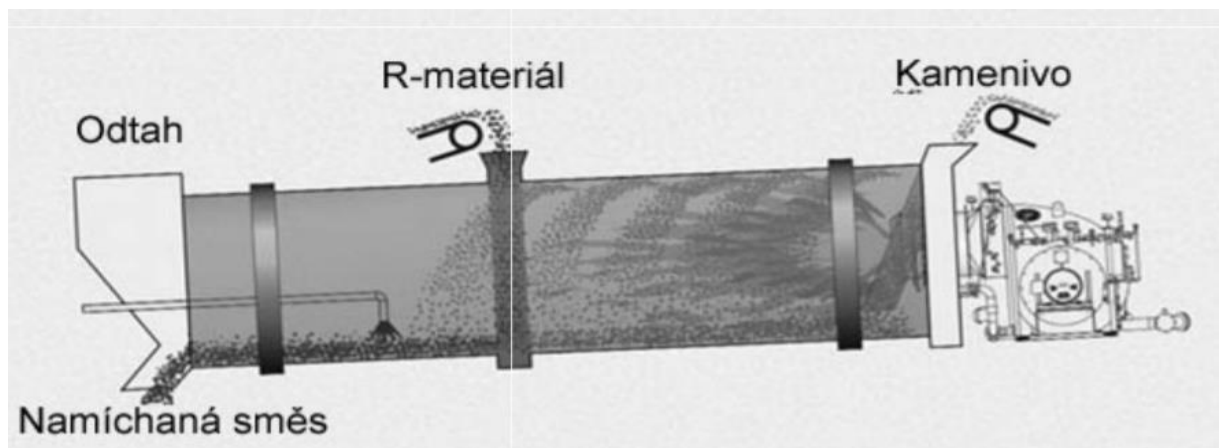
Další možnou metodou recyklace asfaltových směsí v obalovacích soupravách je předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové míchačky. Tento způsob umožňuje výrazně vyšší dávkování R-materiálu než při dávkování za studena, ovšem z tohoto důvodu se musí R-materiál častěji kontrolovat. Ohřevem většího množství R-materiálu se také redukuje problematika týkající se vlhkosti směsi. Na méně zatížených a dopravně méně významných pozemních komunikacích je možné využít do horních podkladních vrstev vozovky dávkování R-materiálu 70 až 90 % hmotnosti základní asfaltové směsi.



Obrázek 3 - Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu

Zdroj: [11]

Metoda Drum-mix je metoda recyklace, která se provádí v kontinuální obalovně. U této metody je maximální možné využití R-materiálu 70 % spolu s kamenivem. Výrobní proces vyžaduje konstantní kvalitu vstupních materiálů. Směs se mísí třemi způsoby, a to přidáváním R-materiálu spolu s horkým vzduchem, proti horkému vzduchu, nebo separátním vysoušením kameniva a R-materiálu a následným mísením v míchačce.



Obrázek 4 - Metoda Drum-mix, přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu

Zdroj: [11, 12]

1.4.2 Recyklace v míchacím centru za studena

Recyklace v míchacím centru za studena je technologická metoda o několika fázích. V první fázi je vrstva vozovky, která je určena k recyklaci, vyfrézována a materiál je odvezen na skládku. Poté nastává drcení a úprava znovuzískané asfaltové směsi tak, aby mohl být

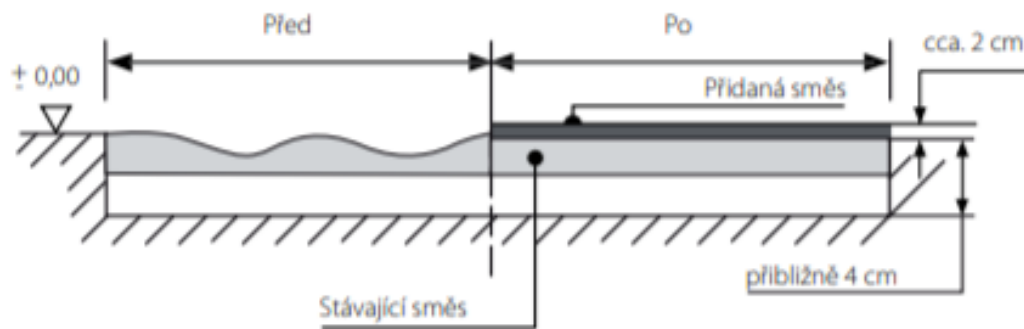
následně R-materiál převezen na místo stavby, kde je potřeba. R-materiál je následně vložen do mobilního míchacího centra, kde se recyklovaný materiál smíchá s pojivy. Nejčastějším pojivem je asfaltová emulze, zpěněný asfalt, cement či kombinace několika různých pojiv. Tato vyrobená směs je poté aplikována na vozovku jako nová vrstva pomocí finišerů.

1.4.3 Recyklace na místě za horka

Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka se provádí čtyřmi různými technologickými způsoby. Obecným principem tohoto způsobu recyklace je ohřátí vrstvy vozovky určené k recyklaci pomocí infrazářičů, následuje remixer, který ohřátou vrstvu rozpojí frézovacím bubnem a takto získanou směs následně dokonale promísí s případnými dalšími komponenty, jako jsou např. asfalt, kamenivo, apod. Takto připravená směs je opětovně aplikována jako vrstva vozovky a zhutněna. Výhodou aplikace technologie recyklace na místě za horka je především prodloužení životnosti asfaltového krytu a zesílení vrstev vozovky.

Prvním způsobem recyklace na místě za horka je technologie Reshape. Touto metodou se upravuje (reprofiluje) příčný profil obrusných vrstev vozovky a to bez přidání dalších jakýchkoliv složek. Vrstva vozovky určená k opravě touto metodou se nejprve nahřeje, rozpojí, nakypří a urovná do podélných a příčných parametrů. Po urovnání je směs zhutněna pomocí válců. Metoda je vhodná tam, kde stávající pojivo vykazuje požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti.

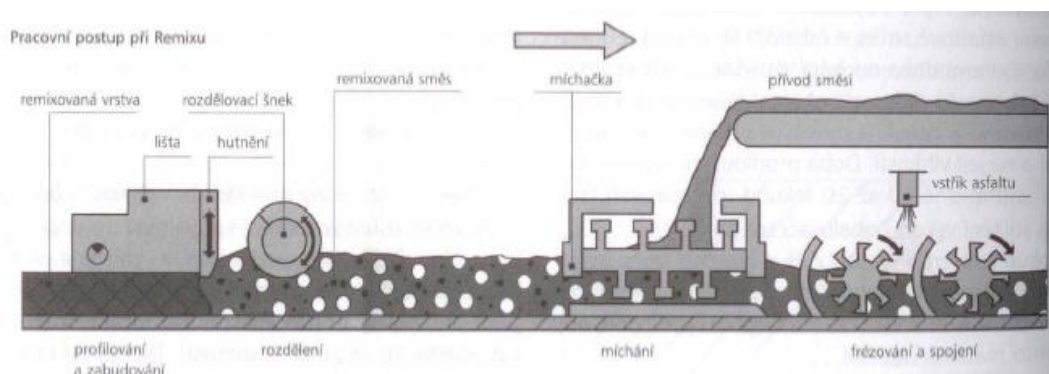
Druhou technologií je úprava vozovky položením nové asfaltové vrstvy. Je nazývána Repave a prakticky rozšiřuje předchozí technologii. Tato metoda se skládá z pěti kroků. Začíná ohřátím určené vrstvy a jejím rozpojením a nakypřením, následným urovnáním této směsi na vozovce v příčném i podélném směru, stejně jako u metody Reshape, ovšem bez zhutnění. Na takto upravenou vrstvu je poté aplikována nová asfaltová vrstva bez promísení s předchozí vrstvou. Tyto dvě vrstvy jsou na závěr zhutněny současně.



Obrázek 5 - Princip technologie Repave

Zdroj: [13]

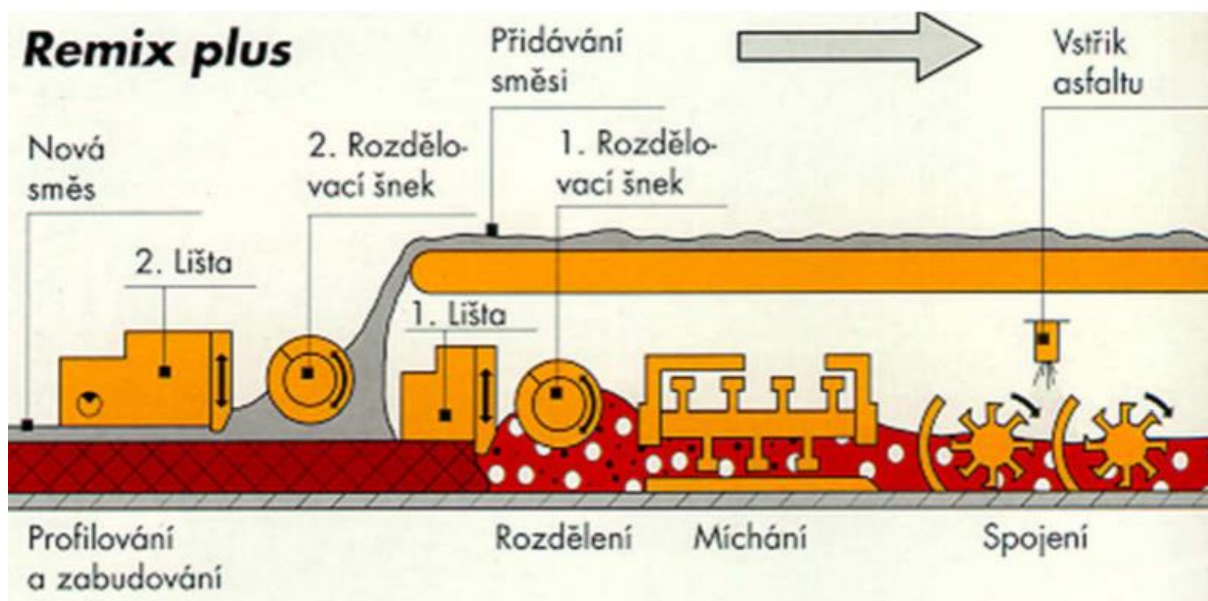
Třetí technologií je metoda Remix, která po ohřátí a rozpojení asfaltové vrstvy přidá do směsi potřebné materiály, které promíchá s rozpojenou asfaltovou vrstvou. Takto vzniklá směs je následně položena zpět na vozovku jako nová asfaltová směs, která je poté zhutněna. Používá se při obnově starých, opotřebovaných nebo poškozených asfaltových vrstev krytu vozovky, upravuje se jak ložní, tak obrusná vrstva krytu. Technologie Remix představuje 100 % využití staré asfaltové směsi z obrusné vrstvy vozovky s relativně malým množstvím doplňujícího materiálu (asfaltová směs, kamenivo, asfalt). Společně s technologií Remix plus představuje tato metoda nejpoužívanější technologické varianty recyklace na místě za horka v České republice.



Obrázek 6 - Pracovní postup při Remixu

Zdroj: [14]

Remix plus se používá jako konečná úprava povrchu vozovky, kdy je možné původní obrusnou vrstvu upravit technologií Remix na ložnou vrstvu při současném zhotovení nové obrusné vrstvy. Jedná se tedy o vytvoření dvou asfaltových vrstev současně, které jsou hutněny rovněž najednou metodou horké do horkého. [11, 12, 14, 15]



Obrázek 7 - Pracovní postup Remix plus

Zdroj: [15]

1.4.4 Recyklace na místě za studena

Recyklace na místě za studena je další možností, jak využít původní materiál jak z krytových asfaltových vrstev vozovek, tak z horních i spodních podkladních vrstev vozovek (vrstev stmelených asfaltovými pojivy, hydraulickými pojivy a případně nestmelených vrstev) a jejich vzájemnou kombinací. Patří mezi nejvyužívanější druhy recyklace. Výhodou je především efektivnost, jelikož při těchto metodách je možno využít 100 % recyklovaného materiálu pro úpravu vozovky. Provádí se v místech, kde vozovka ztratila svou únosnost ve smyslu nadměrného výskytu nerovností, výtluků, trhlin a dalších jiných deformací.

Recyklace na místě za studena je v případě použití zemních fréz (např. Wirtgen WR 250) dvoufázový technologický proces, kde se jednotlivé konstrukční vrstvy rozpojí, ve druhé fázi se vzniklá konstrukční směs obohatí o další materiály a pojiva a znovu se položí. Díky obohacení původní konstrukční vrstvy vzniká recyklovaná konstrukční vrstva, která umožňuje rekonstruovat pozemní komunikace efektivněji s výrazně nižšími investicemi. Investicemi jsou v tomto ohledu myšleny nejen finanční prostředky, ale také čas. Efektivnosti je dosaženo především z důvodu provádění procesu recyklace přímo na místě, což vylučuje potřeby převážet materiál ve velkém objemu na místo určení, tzn. odvezení znovuzískané asfaltové směsi ze stavby a dovezení nové asfaltové směsi např. z obalovny na stavbu.

Tento druh recyklace je možné provádět částečně, kdy recyklační práce nepřesáhnou hloubku 120 mm, nebo celkově, kdy jsou práce prováděny do hloubky až 250 mm. Částečná recyklace (Partial - Depth - Reclamation) se využívá k opravám asfaltových vrstev v krytu, které byly povrchově porušeny, především ztrátou požadovaného asfaltového tmelu nebo mozaikovými nežádoucími trhlinami. Během frézování se provádí zároveň i třídění a předrcení materiálu. Takto připravená směs R-materiálu se smíchá s pojivem do důkladně spojené směsi. Jako pojivo se nejčastěji používá asfaltová emulze. Vyrobena směs se dopravuje do násypky finišeru (americký způsob), či do prostoru rozdělovacích šneků rozprostírací lišty, je-li součástí zařízení. V České republice se tato varianta recyklace na místě za studena provádí velmi omezeně.

Recyklace celková, též označována jako hloubková (Full - Depth - Reclamation), je recyklace podkladních vrstev nebo společná recyklace krytu (nebo jeho části) a podkladních vrstev na místě do hloubky obvykle 120 mm až 250 mm. Používá se tam, kde je únosnost vozovky vyčerpána a vozovka je natolik porušena, že je nezbytná rekonstrukce více vrstev. Příznakem je výskyt síťových trhlin, často doprovázených četnými výtluky a plošnými deformacemi umístěných zejména ve stopách vozidel nebo při okrajích vozovky.

Před samotnou recyklací je prováděna kontrola vstupních materiálů, zda splňují určité jakostní parametry, především zrnitost kameniva, množství zbytkového asfaltového pojiva v poměru ke kamenivu, či vlastnosti výsledné směsi. Neméně důležité je zejména u konstrukcí vozovek silnic II. a III. třídy provádění posouzení na přítomnost dehtu dle postupu uvedeného v TP 150 a při posouzení limitních hodnot dle vyhlášky č. 130/2019 Sb. S dehtem je totiž spojena vyšší koncentrace přítomnosti škodlivých polycyklických aromatických uhlovodíků, a pokud jejich koncentrace v materiálu překračuje určitou mez, je recyklace za studena na místě jediným způsobem, jak tento materiál využít a vyhnout se vzniku nebezpečného odpadu.

Recyklace za studena se může také dělit podle toho, zda je při opravě konstrukčních vrstev touto metodou použito nějaké pojivo (asfaltové, hydraulické, kombinace), či se provede pouze rozfrézování konstrukčních vrstev s následnou úpravou podélného a příčného sklonu vyrobené směsi.

Recyklace na místě za studena bez pojiva je typem recyklace, která je prováděna pro homogenizaci jednotlivých podkladních vrstev vozovky, a do hloubky až 250 mm. Ještě

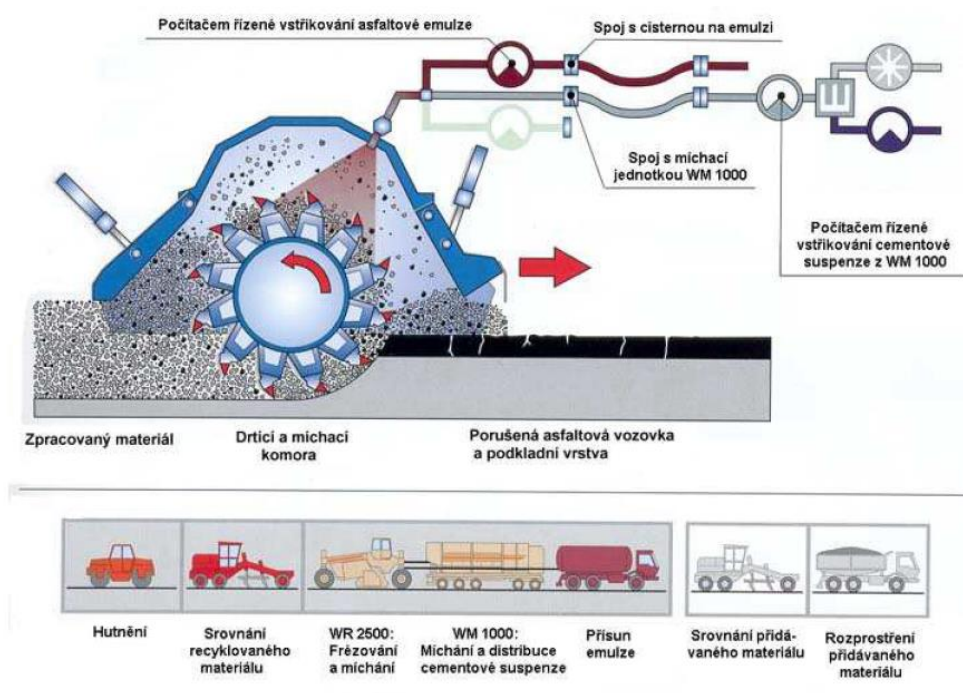
před rozpojením vrstvy zemní frézou je do směsi možné přidat další přídavné materiály za účelem zlepšení vlastností směsi, především její zrnitosti a kvality jednotlivých malých částic. Pokud je potřeba zrnitost původní směsi zlepšit, provede se aplikace potřebného množství kameniva, které se poté pomocí vhodného typu frézy promísí ve frézovacím bubnu frézy s původním materiálem. Pro lepší následné rovnání a hutnění se přidává do vyrobené směsi voda pomocí trysek umístěných ve frézovacím bubnu. Vyrobená směs se poté urovná do požadovaných sklonů a výšek grejdrem a takto urovnaná směs se na závěr zhutní zemním válcem.

Recyklace za studena s pojivy se používá při údržbě i opravách vozovek pozemních komunikací. Využívá se pro odstranění poruch vozovek v podkladních vrstvách, kde tyto poruchy mají za následek nedostatečnou únosnost vozovky, porušení podkladních vrstev (síťové trhliny, podélný hrbol, atd.). Tuto technologii lze využít také k rozšíření vozovky. Pracovní postup je v prvních fázích totožný, jak je tomu u recyklace bez pojiva. Pokud to situace vyžaduje, opět lze zlepšit vlastnosti původního materiálu nadávkováním potřebného množství vhodného kameniva o odpovídajících vlastnostech. Tloušťka vrstvy, množství a druh doplňovaného kameniva jsou společně s typy a množstvím použitých pojiv ve výsledné směsi navrhovány jednak dle PD, a jednak dle průkazní zkoušky provedené dle postupu uvedeného v technických podmínkách TP 208. Průkazní zkouška musí být vyhotovena ještě před započítáním stavebních prací. Opravovaná vrstva se tedy nejprve rozfrézuje, urovná a zhutní. Na takto upravenou vrstvu se v další fázi aplikuje zvolený druh hydraulického pojiva v odpovídajícím množství pomocí dávkovače sypkých pojiv. Pojivo se s již jednou rozfrézovanou vrstvou opět promísí dalším pojezdem frézy, pomocí které se opět do vyráběné směsi přidává voda k dosažení optimální vlhkosti a pokud je receptura recyklované směsi navržena ještě s pojivem asfaltovým (zpěněný asfalt, asfaltová emulze), dávkuje se toto pojivo pomocí dalších trysek umístěných ve frézovacím bubnu. Vyrobená směs se na závěr opět urovná grejdrem a zhutní. V praxi se často stává, že při rovnání vrstvy do požadovaných parametrů vznikne přebytečné množství materiálu, a to jak po prvním rozfrézování původní vrstvy, tak i při následné recyklaci za studena. Tyto přebytky je nutno během rovnání postupně odebírat vhodnou strojní technikou s následným naložením na nákladní automobily a odvozem na určené místo. Jelikož zhotovená vrstva obsahuje hydraulické pojivo, musí se tato vrstva chránit proti vysychání kropsáním vodou. [5, 6, 16]



Obrázek 8 - Recyklační kolona (zemní fréza/recyklér, zásobní vozidlo na asfaltové pojivo, kropicí vůz)

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 9 - Princip recyklace netuhých vozovek za studena

Zdroj: [17]

Zkoušky pro shodu s požadavky daných předpisů se provádějí během celého procesu recyklace. Je tak učiněno z důvodu maximálního dodržení stanovených předpisů, které zaručují bezpečnost vozovky i její maximální využití v podobě trvanlivosti, únosnosti a technických parametrů. Následné opravy jsou totiž finančně velmi nákladné, proto se usiluje o maximální možnou kvalitu provedených vrstev, která je při splnění požadavků dle příslušných předpisů splněna. Kontrolní zkoušky a jejich jednotlivé parametry jsou

u podkladních a konstrukčních vrstev stanoveny zvláště, jak u vrstev nestmelených, tak stmelených. Kritéria s jednotlivými parametry jsou popsány v technickém předpisu pro recyklace za studena TP 208.

Kontrolní a průkazní zkoušky recyklované směsi ověřují shodu připravené směsi a jejich vlastností s předem stanovenými požadavky. Přesné dodržení požadavků na recyklovanou směs se provádí odebráním několika kontrolních vzorků, které jsou podrobeny laboratorním zkouškám. Odebírají se tedy zkušební vzorky jak před začátkem prací z důvodu provedení průkazní zkoušky, tak i během provádění samotné recyklace na místě, kdy se zjišťuje například vlhkost vyráběné směsi, zhotovují se válcová tělesa pro ověření pevnosti v příčném tahu, nebo je vzorek směsi převezen do laboratoře k provedení Proctorovy zkoušky. Na závěr se na dokončené vrstvě vozovky z recyklované směsi provádí ještě kontrolní zkoušky k ověření geometrické shody a mechanických vlastností dané vrstvy. Jsou prováděny zkoušky pro ověření výše uvedených vlastností jako např. tloušťka vrstvy, odchylka od příčného sklonu, nerovnost povrchu, statické a dynamické zatěžovací zkoušky, či výškové zaměření. Druhy, počty a minimální hodnoty výsledků laboratorních zkoušek jsou uvedeny v příslušném KZP, kde se jeho obsah a forma liší stavba od stavby v závislosti na typu pozemní komunikace, na kterém se opravovaný úsek nachází, velikosti plošné výměry, druhu použitých pojiv, druhu výsledné vrstvy (stmelená, nestmelená) apod. [3, 5, 18]

Požadované kontrolní zkoušky a jejich četnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách. Rozlišuje se opět, zda se jedná o vrstvu stmelenou, či nestmelenou.

Tabulka 3 - Kontrolní zkoušky nestmelených recyklovaných směsí

Typ směsi	Vlastnost	Požadavky	Zkouška	Četnost
MZK	Zrnitost jednotlivých dávek ¹⁾	G _A , G _C , G _O podle tab. NA.2, čl. 4.4.2 a tab. 7 a 8 podle ČSN EN 13285	ČSN EN 933-1+A1	1000 m ³ min. 1× denně
	Obsah jemných částic ¹⁾	UF ₉ podle tab. NA.2 ČSN EN 13285	ČSN EN 933-1+A1	1000 m ³ min. 1× denně
	Vlhkost	- 3% až + 2% ²⁾	ČSN EN 1097-5	min 2 x denně
ŠD	Zrnitost ¹⁾	G _E podle tab. NA.2 ČSN EN 13285	ČSN EN 933-1+A1	min. 1× denně
	Obsah jemných částic ¹⁾	UF ₉ podle tab. NA.2 ČSN EN 13285	ČSN EN 933-1+A1	min. 1× denně

¹⁾ U směsí, kde jedinou složku tvoří R-materiál (jak dodávaný tak získaný na místě) platí G_N a UF_N.
²⁾ Doporučené max. odchylky od deklarované hodnoty.

Zdroj: [5]

Tabulka 4 - Kontrolní zkoušky nestmelených recyklovaných vrstev

Vlastnost		Požadavek		Zkouška	Min. četnost
		MZK	ŠD		
Odchylky od výšek podle dokumentace (jsou-li stanoveny)	maximálně	± 20 mm		nivelací	po 40 m
Odchylka od příčného sklonu max.		± 0,5 %	± 1,0 %	nivelací	po 120 m
Nerovnost povrchu max.	podélná	20 mm	30 mm	ČSN 73 6175	průběžně
	příčná	20 mm			po 40 m
Tloušťka vrstvy h	minimální	0,8 h		nivelací, sondou	1500 m ²
	průměr	0,9 h			
Míra zhutnění minimální		98 %	–	ČSN 72 1006	1500 m ²
Modul přetvárnosti E _{def2} min ¹⁾		Příloha E		ČSN 72 1006	1500 m ² min. 3 zkoušky ³⁾
Poměr E _{def2} /E _{def1} max.		2,5 ²⁾			

¹⁾ Tam, kde podíl R-materiálu > 50 % se jedná o hodnoty orientační.
²⁾ Pokud E_{def1} dosahuje 60 % E_{def2} podle přílohy E, připouští se i vyšší hodnoty poměru E_{def2}/E_{def1}.
³⁾ Pokud se u MZK kontroluje míra zhutnění, četnost se snižuje na 6 000 m².

Zdroj: [5]

Tabulka 5 - Kontrolní zkoušky stmelených recyklovaných směsí

Typ směsi podle pojiva	Vlastnost	Požadavky	Zkouška	Četnost ¹⁾
cement nebo jiné hydraulické pojivo	Vlhkost ²⁾	-3% až +2%	ČSN EN 1097-5	2000 t nebo 6000 m ² min. 1x denně
	Min. pevnost v tlaku R _c po 28 dnech ³⁾	C ₃₄	ČSN EN 14227-1	
	Odolnost proti mrazu a vodě	85% pevnosti R _c		
	Min. pevnost v příč. tahu R _{ft} po 7 dnech ³⁾	0,25 MPa	Příloha B.2.9	
	Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 ve vodě)	75% pevnosti R _{ft}	Příloha B.2.9	
cement + asfaltová emulze nebo zpěněný ⁴⁾ asfalt	Vlhkost ²⁾	-3% až +2%	ČSN EN 1097-5	2000 t nebo 6000 m ² min. 1x denně
	Min. pevnost v příč. tahu R _{ft} po 7 dnech	0,25 MPa	Příloha B.2.9	
	Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 ve vodě)	75% pevnosti R _{ft}	Příloha B.2.9	
asfaltová emulze nebo zpěněný ⁴⁾ asfalt	Vlhkost ²⁾	-3% až +2%	ČSN EN 1097-5	2000 t nebo 6000 m ² min. 1x denně
	Min. pevnost v příč. tahu R _{ft} po 7 dnech	0,25 MPa	Příloha B.2.9	
	Odolnost proti vodě min. (7 dní na vzduchu + 7 ve vodě)	60% pevnosti R _{ft}	Příloha B.2.9	
	Mezerovitost	6% až 14%	Příloha B.2.8	

¹⁾ Četnost v tunách platí pro výrobu směsi v míchacím centru, v m² pro recyklaci na místě
²⁾ Informativní hodnota pro účely výpočtu suché objemové hmotnosti zkušebních těles. Její následnou kontrolu je možno provádět vizuálně podle přílohy C.2.4. Vlhkost, případně její max. odchylky od deklarované hodnoty musí být takové, aby bylo možné vrstvu správně zhutnit
³⁾ Zkouší se pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě nebo pevnost v příčném tahu a odolnost proti vodě v souladu s použitou průkazní zkouškou.
⁴⁾ Při použití zpěněného asfaltu se min. 2x denně kontrolují jeho vlastnosti podle 6.3.3.

Zdroj: [5]

Tabulka 6 - Kontrolní zkoušky stmelovaných recyklovaných vrstev (geometrické char.)

Vlastnost		Vrstva		Zkouška	Min. četnost
		Ložní ¹⁾	Podkladní		
Odchyly od výšek podle dokumentace (jsou-li stanoveny)	maximálně	± 20 mm	± 20 mm	nivelací	po 40 m
Odchylna 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 za podmínek podle tabulky 2 a tabulky 3.					
²⁾ Při použití jako kryt 10 mm.					

Zdroj: [5]

Tabulka 7 - Kontrolní zkoušky stmelovaných recyklovaných vrstev (mechanické vlastnosti)

Vlastnost		Vrstva		Zkouška	Min. četnost
		Ložní	Podkladní		
Vrstvy ze směsi stmelovaných cementem nebo jiným hydraulickým pojivem, Vrstvy ze směsi stmelovaných cementem + asfaltovou emulzí nebo zpěněným asfaltem					
Modul přetvárnosti E_{def2} min. ^{1) 2)}		150 MPa		ČSN 72 1006	2 500 m ² min. 2 zkoušky
Rázový modul deformace min. ²⁾		100 MPa		ČSN 73 6192, skupina C	250 m ²
Vrstvy ze směsi stmelovaných asfaltovou emulzí nebo zpěněným asfaltem					
Mezerovitost vrstvy max. ³⁾		14 %	16 %	Příloha B	2 000 m ²
Míra zhutnění min. ⁴⁾		96 %		ČSN 73 6160	1500 m ² min. 2 zkoušky
¹⁾ Pro dálnice, rychlostní silnice a silnice I. třídy platí kombinovaná kontrola únosnosti vrstvy pomocí statického modulu přetvárnosti E_{def2} a rázového modulu deformace M_{VD} . Rozhodující je měření statického modulu přetvárnosti E_{def2} . Pro silnice II. a III. třídy a ostatní komunikace platí možnost kontroly únosnosti pouze pomocí rázového modulu deformace M_{VD} . 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. ³⁾ Mezerovitost vrstvy zjištěná až po provedení další vrstvy z asfaltových směsí vyráběných za horka (mezerovitost recyklované vrstvy se vlivem pokládky další vrstvy částečně sníží). ⁴⁾ Objemová hmotnost zhutněné směsi se zjišťuje nedestruktivně nebo na vývrtech, srovnávací objemová hmotnost podle B.2.4. Pokud se objemová hmotnost zjišťuje na vývrtech, doporučuje se vývrty provádět až po položení další vrstvy z asfaltové směsi.					

Zdroj: [5]

1.5 Standartní vstupní materiály pro studenou recyklaci

1.5.1 Kamenivo

Kamenivo se pro konstrukce vozovek používá jako základní materiál pro vytvoření pevné konstrukce a podkladové kostry jednotlivých vrstev vozovky. Tato kostra při používání přenáší tlakové síly vyvozené na povrchu vozovky do zemitého podloží.

Největší výskyt kameniva je v přírodě, proto tento druh nazýváme přírodní kamenivo. Získává se těžbou z přírodních ložisek. Jeho struktura je formována desítky milionů let. Máme přírodní kamenivo těžené, které vzniká zvětřováním a rozpadem horniny ledovcového, říčního nebo eolického původu. Jelikož se jedná o dlouhodobý proces, jednotlivá zrna těžného kameniva mají obroušený uhlazený povrch. Druhým typem přírodního kameniva je předrcené těžné kamenivo, což je metoda zmenšování zrn větších než 2 mm, která byla získána při těžbě kameniva v pískovně za cílem výroby primárně těžného kameniva. Posledním typem je drcené kamenivo, které vzniká jako hlavní produkt při drcení těžného kamene v kamenolomech. Jelikož se nejedná o přirozený postup úpravy kameniva, má drcené kamenivo ostré hrany a zdrsňený povrch. Všechny metody získávání přírodního kameniva výrazně mění reliéf krajiny, proto je efektivní metodou najít jinou cestu, a tou je právě recyklace.

Při provádění studené recyklace je kamenivo velmi důležitou vstupní surovinou, kterou lze dodávat na stavbu externě za pomoci nákladní dopravy, nebo se využije přímo na staveništi ze stávajícího souvrství vozovky, či lze oba výše uvedené způsoby libovolně kombinovat dle dané situace. Pokud je využito kamenivo z původních vrstev vozovkového souvrství, muselo toto kamenivo již v minulosti splňovat určité parametry a vlastnosti (např. tvarový index, odolnost proti drcení, obsah síry, odolnost proti zmrazování a rozmrazování) a z tohoto důvodu se prokazování těchto vlastností při recyklaci nepožaduje. Jinak tomu je ale u kameniva, které pochází z jiných zdrojů nebo jeho původ není znám. Recyklované kamenivo splňující požadované parametry je bráno jako adekvátní náhrada kameniva přírodního a při jeho užití není důvod měnit standartní postupy při návrhu a realizaci stavebního díla. Pokud recyklovaný materiál obsahuje dehet, je při recyklaci na místě s použitím asfaltového pojiva jeho použití bez zvláštních opatření.

Co se požadavků na recyklované kamenivo týká, tak tyto se v zásadě dělí podle toho, o jakou vrstvu se jedná (stmelená, nestmelená). Zároveň je nutno brát v úvahu použití druhu

pojiva a druh RS (na místě, v míchacím centru, celková, částečná). Požadavky na recyklované kamenivo jsou uvedeny v následujících tabulkách. [5, 19]

Tabulka 8 - Požadavky na recyklované kamenivo pro nestmelené směsi

Článek normy ČSN EN 13285	Vlastnost	Požadavky		
		MZK	ŠD _A	ŠD _B
4.3.1	Označení směsi	0/32; 0/45	0/32; 0/45; 0/63	0/32; 0/45; 0/63
NA.4.5 tabulka NA.1	Všeobecné požadavky ¹⁾ na zrnitost	HK DK směs	G_C 85-15 G_F 85 G_A 85	—
NA.4.5 tabulka NA.1	HK – propad střed. sitem ¹⁾	D/d < 4 D/d ≥ 4	GT_C 25/15 GT_C 20/17,5	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Typická zrnitost ¹⁾	DK směs	GT_F 10 GT_A 10	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Max. obsah jemných částic ¹⁾	HK DK směs	f_4 f_{16} f_9	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Kvalita jemných částic ^{2) 3)}	$I_p \leq 4$, $w_L \leq 25\%$, SE_{30}		

¹⁾ Platí pro frakce recyklovaného kameniva podle ČSN EN 13242+A1 pro výrobu směsi MZK v centru.
²⁾ Nezkouší se u směsi z R-materiálu
³⁾ I_p index plasticity a w_L mez tekutosti podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Pokud vzhledem k charakteru materiálu nelze stanovit mez plasticity, jedná se o materiál neplastický a platí $I_p = 0$.

Zdroj: [5]

Tabulka 9 - Požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy

Vlastnost		Požadavky na recyklované kamenivo při použití pojiva		
		cement nebo jiné hydraulické pojivo	cement + asfaltová 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 %

Zdroj: [5]

1.5.2 Pojivo

Při provádění stmelených vrstev pomocí technologie recyklace za studena je využíváno především následujících druhů pojiv: 1) hydraulických (silniční hydraulické pojivo, cement) a za 2) asfaltových (zpěněný asfalt, asfaltová emulze). V ČR je v největší míře zastoupena varianta zpracování recyklovaných vrstev pomocí hydraulických pojiv,

případně kombinace hydraulického pojiva s pojivem asfaltovým. Recyklace konstrukčních vrstev za studena stmelových pouze asfaltovým pojivem, ať už se bude jednat o zpěněný asfalt, či asfaltovou emulzi, se v našich končinách v současné době realizuje minimálně.

Cement

Účelem použití hydraulických pojiv jsou jejich fyzikální vlastnosti. Nejvyšší a nejvíce používaným pojivem pro recyklaci za studena je cement. Cement je podle normy ČSN EN 197 - 1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití definován jako jemně mletá anorganická látka, která je mísitelná s vodou. Vznikne tak směs kašovitě konzistence, která dle hydratačních a reakčních procesů postupně tuhne a tvrdne. Výhodou použití hydraulického pojiva je skutečnost, že kašovitá hmota ztvrdne a vykazuje stálost a pevnost, a to jak při působení vzduchu, tak při působení vody.

Ostatní pojiva jsou pouhou alternativou k cementu, jelikož disponují určitou vlastností, která cement předčí. Nejčastěji se jedná o nižší náklady, ovšem na úkor kvality, nebo o specifické vlastnosti (např. pomalejší nárůst počátečních pevností), které jsou vyžadovány jen u určitých konkrétních typů vozovek. Tyto specifické vlastnosti výrazně ovlivňují vlastnosti výsledné směsi a každá tato vlastnost má svůj význam a účel (např. nesprávná volba pojiva a jeho dávkování může zapříčinit vznik reflexních trhlin, či zpomalit tvrdnutí vyrobené směsi). [20–22]

Cement pro výrobu vozovek musí odpovídat požadavkům popsaným v ČSN EN 197 - 1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Je rozdělen do několika druhů následovně:

- CEM I Portlandský, obsahuje čistý portlandský slínek,
- CEM II Portlandský směsný, vyjma CEM II/B-L, CEM II/B-LL, CEM II/B-M obsahuje příměs popílku, vápence nebo strusky,
- CEM III Vysokopecní, obsahuje velké množství vysokopecní strusky,
- CEM IV Pucolánový,
- CEM V Směsný (obsahuje více přísad).

Další možné hledisko, jak rozlišovat používané cementy, je rozdělení dle pevnostních tříd (číselná hodnota vyjadřuje pevnost v tlaku naměřenou po 28 dnech v MPa):

- 32,5
- 42,5
- 52,5

V neposlední řadě lze cementy dělit podle rychlosti nárůstu pevnosti na:

- cement s vysokou počáteční pevností (R),
- s normální počáteční pevností (N),
- s nízkou počáteční pevností (L).

Pro technologii studené recyklace lze využít cementy všech pevnostních tříd s normálním nebo rychlým nárůstem pevnosti. Netřeba dodávat, že použitý cement musí splňovat požadavky dle ČSN EN 197 - 1. V praxi se nejčastěji používá cement s označením CEM II/B-S 32,5 R, jedná se tedy o portlandský směsný struskový cement podle ČSN EN 197 - 1, pevnostní třídy 32,5, s rychlým počátečním nárůstem pevnosti, obsahující mezi 65 % a 79 % hmotnosti portlandský slínek a mezi 21 % a 35 % hmotnosti granulované vysokopecní strusky, jak je možné vidět v *Tabulka 1010*:

Tabulka 10 - Poměry jednotlivých složek cementu v procentech

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro obecné použití)	Složení (poměry složek podle % hmotnosti ^a)											Doplňující složky		
		Hlavní složky													
		Slinek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílek		Kalcinovaná břidlice	Vápenec					
					přírodní	přírodní kalcinované	křemičitý	vápenatý		L	LL				
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
	Portlandský směsný cement ^c	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->									0-5		
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->									0-5			
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
CEM IV	Pucolánový cement ^c	CEM IV/A	65-89	–	←----- 11-35 ----->						–	–	–	0-5	
		CEM IV/B	45-64	–	←----- 36-55 ----->						–	–	–	0-5	
CEM V	Směsný cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	–	←----- 18-30 ----->			–	–	–	–	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	–	←----- 31-49 ----->			–	–	–	–	0-5		

^a Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

^b Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.

^c Hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu (viz příklad v kapitole 8).

Zdroj: [21]

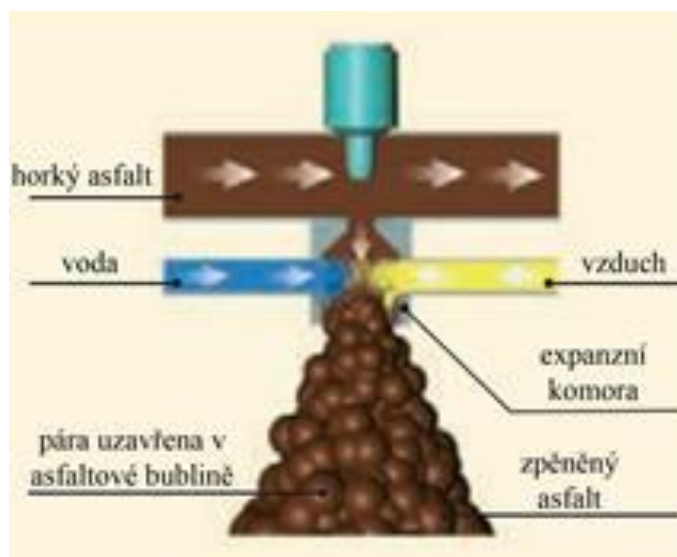
Pokud je použito pro směsi stmelené cementem hydraulické silniční pojivo, musí toto pojivo splňovat požadavky vyplývající z normy ČSN EN 13282 - 1: Hydraulická silniční pojiva - Část 1: Rychle tvrdnoucí hydraulická silniční pojiva - Složení, specifikace a kritéria

shody. (pro třídy pevnosti HRB 22,5 E nebo HRB 32,5 E). Příkladem takového pojiva je komerčně dodávaný produkt Doroport nebo hydraulické pojivo TB. [5, 21]

Zpěněný asfalt

Asfalt a asfaltová pojiva se používají především v horních vrstvách vozovky a do krytů vozovek, patří mezi živice ropného nebo přírodního původu. Přírodní asfalt se řadí mezi nerosty a může mít různá skupenství (pevné, kapalné) a jeho použití do konstrukčních vrstev vozovek není příliš časté, jelikož je jeho výskyt a množství ve světě podstatně menší, než u ropného asfaltu. Ropný asfalt představuje 99 % světové produkce asfaltových směsí. Jedná se o nejhustější složku ropy, která má nejvyšší bod varu a získává se destilací surové ropy.

Asfalt je ovlivněn změnou teploty. Po zahřátí přechází z pevného stavu až do stavu plastického nebo kapalného. Jedná se tedy o viskoelastický materiál. Zároveň jsou asfaltová pojiva nerozpustná ve vodě, ale rozpustná v organických rozpouštědlech. Díky těmto vlastnostem lze vytvářet asfaltové a vodní emulze, jejichž vlastnosti je později možné upravit pomocí organických emulgátorů. Především se jedná o zamezení negativních vlastností asfaltu, jako je stékavost, nebo pro snižování pracovní teploty. Naopak mezi záporné vlastnosti asfaltu patří jeho náchylnost k různým degradačním vlivům, které mohou snížit kvalitu materiálu nebo jej zcela poškodit, jedná se především o vliv stárnutí oxidací, vliv fyzikálních sil, klimatických podmínek a vliv ultrafialového záření.



Obrázek 10 - Schéma výroby zpěněného asfaltu

Zdroj: [23]

Zpěněný asfalt je podle výše uvedeného obrázku směs asfaltu, vody a vzduchu, který vznikne tím, že do rozehrátého asfaltového pojiva (teplota v rozmezí 170 - 190 °C) je vstříkováno pod velkým tlakem malé množství vody (2 - 5 % hmot. asfaltu), které se při styku s rozehrátým asfaltem mění ve vodní páru a tím dochází k samovolnému napěnění asfaltu. Takto zpěněný asfalt je okamžitě vstříkovan do prostoru frézovacího bubnu recykléru a promísen společně s hydraulickým pojivem (pokud je použito) a recyklovaným materiálem. Pro výrobu zpěněného asfaltu při recyklaci na místě za studena se používají asfalty typového označení 50/70, 70/100, 100/150 nebo 160/220. Kvalita vyrobené asfaltové pěny je posuzována především dvěma parametry. Expanzním poměrem (poměr maximálního dosaženého objemu asfaltové pěny a objemu původního asfaltového pojiva), kdy hodnoty by měly být v intervalu 8 až 15, a poločasem usazení pěny (doba, za kterou u asfaltové pěny dojde ke snížení maximálního objemu o 50 %), přičemž čím delší je poločas usazení pěny, tím je vyrobená pěna kvalitnější. Poločas poklesu se u kvalitních asfaltových pěn pohybuje v rozmezí 10 - 15 vteřin. Oba výše uvedené parametry jsou do jisté míry závislé na druhu použitého asfaltového pojiva, jeho teplotě a na množství přidávaného stlačeného vzduchu a tlaku, kterým je voda do horkého asfaltu vstříkována.

Princip zpěněného asfaltu spočívá v tom, že při postupném kolabování jednotlivých bublin asfaltové pěny se snaží asfaltové pojivo svým povrchem přilnout k jemným částicím studeného kameniva a vytvořit malé kapičky, které se později vlivem hutnění vrstvy a rozptýlení vlhkosti aktivují a spojují v tenký asfaltový film, který obaluje jemné částice a vytváří kompaktní směs, která následně umožňuje slepení a obalení částic větších. [5, 10, 23]

Asfaltová emulze

Asfaltová emulze je specifická směs dvou kapalin, která se vyznačuje disperzí mikroskopických částic jedné kapaliny v druhé, jelikož jsou za běžných podmínek navzájem nemísitelné. Je to zapříčiněno rozdílností v hustotě a polaritě dvou kapalin. Jedna ze dvou kapalin je obvykle voda. Nejklasičtějším příkladem emulze je směs oleje a vody.

Asfaltová emulze je tedy podle výše zmíněné definice disperze mikroskopických částic asfaltu ve vodě, je stabilizovaná emulgátorem a vykazuje jiné vlastnosti než asfalt samotný, především vykazuje nižší viskozitu a nižší potřeby na zpracování za tepla. Proto je asfaltová emulze hojně používaným pojivem pro recyklaci za studena. Kationaktivní kyselé asfaltové emulze se používají u této technologie častěji než emulze anionaktivní, důvodem je lepší

přilnavost emulze k obalovanému materiálu. Doporučené typy asfaltových emulzí dle TP 208 jsou C60B7 nebo C65B7, v případě realizace částečné recyklace se používají emulze typu C60BP7 nebo C65BP7 splňující požadavky ČSN EN 13808 - Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikací kationaktivních asfaltových emulzí. Obsah zbytkového asfaltu v kationaktivních emulzích bývá kolem 60 %. Pro směsi stmelené cementem a asfaltovým pojivem se dávkování asfaltové emulze/zpěněného asfaltu pohybuje v rozmezí od 2,0 % do 3,5 % v množství zbytkového asfaltu. Přesné dávkování pojiv je nutno ověřit průkazní zkouškou.

Značení asfaltových emulzí vyjádřené písmeny v kombinaci s číslicemi slouží k popisu základních charakteristik emulzí (např. polarita, obsah pojiva, druh pojiva, atd.). Základní přehled značek a vysvětlivky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 11 - Symboly a jejich význam při značení asfaltových emulzí

Pozice	Symboly	Význam	Vztažená evropská norma
Povinné značky			
1	C	Kationaktivní asfaltová emulze	EN 1430 ^a (polarita částic)
2 a 3	Dvojčíslí	Nominální obsah pojiva v % (m/m) nebo Obsah zbytkového pojiva v % (m/m)	EN 1428 nebo (podle obsahu vody nebo podle EN 1431 zbytkového pojiva + olej, destilátu) nebo EN 1431 (zbytkové pojivo po oddestilování vody a oleje)
4 nebo 4 a 5	B P	Označení druhu pojiva Silniční asfalt Přídavek polymerů	EN 12591 (specifikace pro silniční asfalty) EN 14023 nebo se polymer může přidat před emulgací, během emulgace nebo po emulgaci
5 nebo 6	F	Přídavek více než 3 % (m/m) fluxovadla, vztaženo na emulzi	Druh fluxovadla lze vyznačit (volitelně) náhradou písmene F buď Fm (minerální), nebo Fv (rostlinné)
5 nebo 6 nebo 7	2 až 10	Třída chování při štěpení	EN 13808 (tabulka 2)
Volitelné značky			
6 nebo 7 nebo 8		Zkrácené označení základního asfaltového pojiva	EN 12591 nebo (označení podle předpisu EN 14023 nebo příslušné výrobové normy) EN 13924
^a Vyznačená hodnota pH v kyselé oblasti podle EN 12850 se může považovat za ukazatele kationaktivní povahy asfaltových emulzí. V případě pochyb se použije EN 1430.			
POZNÁMKA Příklady značek pro asfaltové emulze jsou v příloze A.			

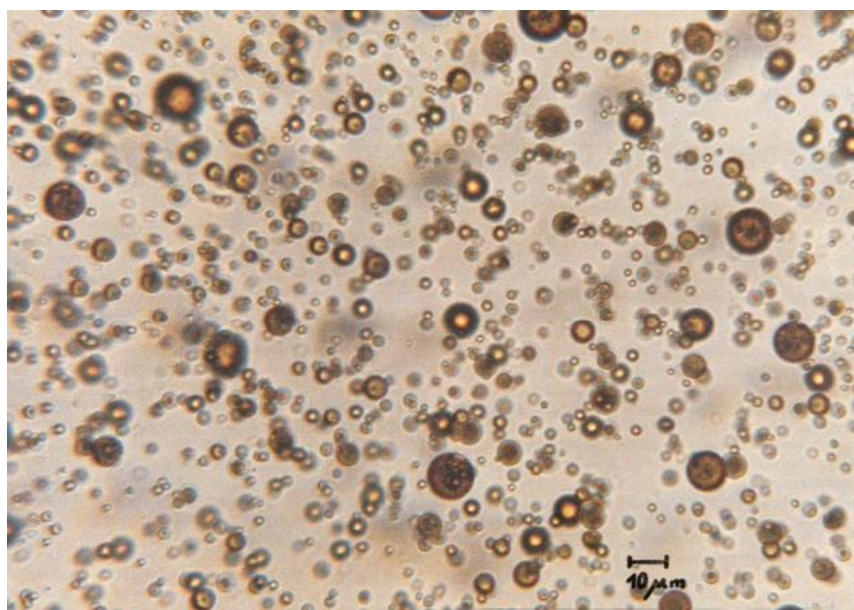
Zdroj: [24]

V současné době je použití asfaltových emulzí v technologiích recyklace na místě za studena považováno za dosti neekonomické, důvodem je především vzestup cen vstupních surovin. Tento fakt zapříčinil to, že v posledních cca třech letech je při použití technologie recyklace za studena uplatněno užití hydraulického pojiva samotného, nebo kombinace pojiva hydraulického spolu se zpěněným asfaltem. [5, 17, 25]



Obrázek 11 - *Zařízení pro výrobu asfaltové emulze v laboratoři*

Zdroj: [vlastní]

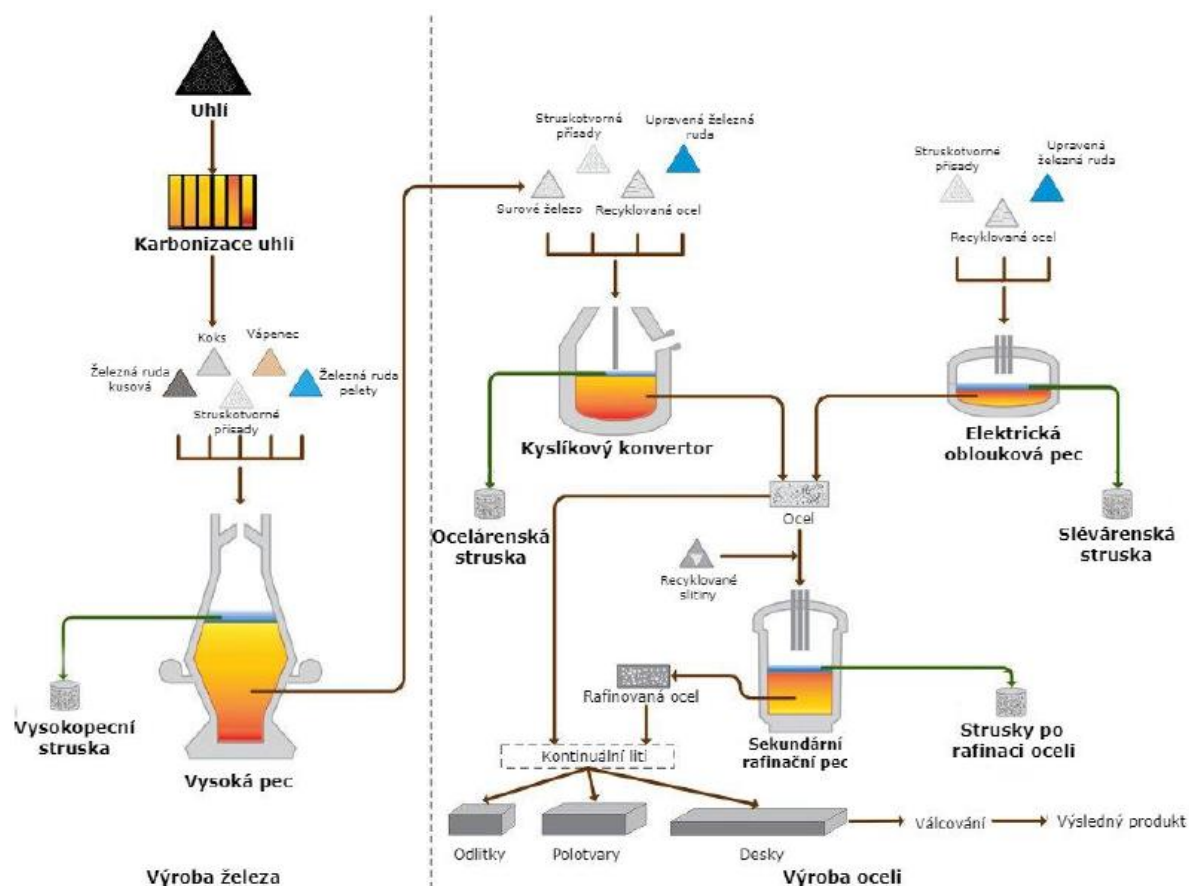


Obrázek 12 - *Struktura asfaltové emulze pod mikroskopem*

Zdroj: [17]

1.6 Vedlejší produkty metalurgického průmyslu

Druhotné materiály metalurgického procesu jsou úzce spjaty s výrobním procesem surového železa a oceli. Výrobní postup úpravy železné rudy a následná její přeměna na ušlechtilé materiály proces, který je známý pro lidstvo již několik tisíciletí, kde tento postup se neustále zdokonaluje. Pokud se podíváme na světovou produkci oceli, tak zde neotřesitelně vládne Asijské země v čele s potřebami Čínské lidové republiky, kde se vyrobí cca 50 % světové produkce oceli. V roce 2017 činila celosvětová produkce oceli téměř 1,7 miliardy tun. Samozřejmě, že ruku v ruce s nárůstem výroby železa a oceli roste i množství odpadních produktů vznikajících při samotném zpracování železné rudy. Z tohoto důvodu se v současné době hledá nějaké efektivní využití těchto vedlejších produktů v ostatních průmyslových odvětvích, kde se jedna z možností využití nabízí v dopravním stavitelství při budování liniových staveb. [23]



Obrázek 13 - Schéma procesu výroby železa a oceli

Zdroj: [23]

1.6.1 Struska

Strusky lze považovat za odpadní produkt vznikající především v hutním a energetickém průmyslu. Jedná se o materiál hrubozrnný s ostrými hranami, v největší míře černé barvy a skelným leskem. Chemické složení a mechanické vlastnosti strusek závisí především na způsobu spalování a na vstupních materiálech, které do výrobního procesu vstupují. Vliv na výsledné vlastnosti strusek má i technologický způsob zpracování, způsob chlazení, či uložení a skladování strusky.

1.6.1.1 Metalurgické strusky

Nejčastějším typem strusek jsou metalurgické strusky. Existují poté ještě vulkanické strusky. Ty vznikají přírodními procesy při vulkanické činnosti, tudíž se nejedná o odpadní materiál, ale spíše o vedlejší přírodní produkt. Vulkanickou strusku tvoří pyroklastický materiál, který je z jícnu sopky vyvrhován při strombolských erupcích. Vulkanickým struskám se ale práce detailněji nevěnuje, jelikož přesahují rozsah práce a ve stavebnictví se využívá většinou jen jako materiál do sypaných kuželů. Posledním typem jsou strusky, které vznikají jako vedlejší produkt při spalování pevných paliv. Těm se ale obecně neříká struska, nýbrž popílek či škvára.

Metalurgické strusky vznikají jako vedlejší produkt ve slévárnách při rafinaci kovů, tedy jako odpadní surovina, která má ale několik důležitých funkcí. Zabraňuje vzniku oxidů železa a redukuje tedy jejich množství, ale také snižuje obsah manganu v železe. Poslední důležitou funkcí strusky je odsíření kovové lázně. Odpadního materiálu, tedy strusky, vzniká přibližně 400 - 600 kg na 1 tunu čistého železa vyrobeného ze surové železné rudy.

Existují dva typy metalurgických strusek. Vysokopecní struska (BFS - Blast Furnace Slag) je nejvyužívanějším typem strusky, nicméně jedná se pouze o jednu z různých druhů strusek, které se liší především procesem, při kterém jako odpadní materiál vznikají. Druhým typem metalurgických strusek je struska ocelářská (BOF - Basic oxygen furnace). Toto dělení je pouze základní, jelikož v každé kategorii existuje několik typů, jenž může stejný proces produkovat jako odpadní materiál. V praxi se ve stavebnictví dnes už celkem běžně používá struska vysokopecní. [1, 2]

Vysokopecní struska

Vysokopecní granulovaná struska vzniká několika způsoby při různých procesech výroby. Prvním případem, při kterém vzniká struska, je výroba surového železa ve vysoké peci. V té jsou železné rudy zahřívány a pomocí vysoké teploty zbaveny kyslíku a nečistot. Právě nečistoty, které se odlučují od železné rudy, tvoří taveninu, která se běžně nazývá vysokopecní struskou. Po prudkém ochlazení materiálu na odvalech vzniká již samotná vysokopecní granulovaná struska. Tento postup se při zpracování železné rudy využívá pro odstranění nečistot z rudy a zabránění tak železu zpětné oxidaci. Do vysoké pece ve slévárně se naveze kromě samotné železné rudy také koks a struskotvorné přísady. Mezi ty patří vápenec a dolomit, které se používají nejčastěji. Struska se tak tvoří ve vysoké peci spolu s čistým železem.

Jedná se o efektivní využití metalurgického odpadu, které zároveň šetří energii a náklady pro konstrukce vozovek pozemních komunikací. Při pohledu na složení vysokopecní granulované strusky závisí na konkrétním složení především složení vstupních materiálů, které byly při výrobě železa (a také strusky) použity. Zásadně složení strusky ovlivňuje složení železné rudy a množství koksu použitého při roztavení železné rudy ve vysoké peci. Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledné složení strusky, je také volba struskotvorné přísady.

Obecně je granulovanou vysokopecní struskou rozuměn struskový písek, který se vyrábí prudkým zchlazením žhavé taveniny strusky ve vodě a následným mletím, aby se zabránilo zvětrávání a vápenatému rozpadu strusky. Chemické složení tohoto druhu strusky je děleno do třech jakostních tříd podle podílu CaO, Al₂O₃ a MgO ve výsledné strusce. Ty také tvoří většinový podíl chemického složení strusky. Další složky, které mohou být ve strusce obsaženy ve stopovém množství, až v množství několika procent jsou například FeO, MnO nebo CR₂O₃. [26–28]



Obrázek 14 - *Vysoká tavící pec*

Zdroj: [29]

Ocelářská struska

Druhým typem metalurgické strusky je struska ocelářská. Ta vzniká ve slévárnách při výrobě oceli ze železa. Může vznikat dvěma různými způsoby podle typu pece a také podle stavu, ve kterém je železo používáno.

Prvním typem vzniku je proces vzniku oceli v konvertorech, do kterých je přivezeno čisté surové žhavé železo. Dále se k němu přidá železný šrot a struskotvorné přísady. Ty bývají stejné jako při výrobě vysokopecní strusky, tedy vápenec nebo dolomit. Do konvertorů se následně pod vysokým tlakem injektuje kyslík. Kyslík se váže na nečistoty v železe během procesu a odstraňuje je ze železa. V případě že se naváže na uhlík, tvoří oxid uhelnatý, který je ve formě plynu odváděn z konvertoru pryč. Pokud se naváže na křemík, fosfor, mangan nebo železo, tvoří tekuté oxidy. Ty se následně navazují na struskotvorné přísady, čímž vzniká struska ocelářská.

Druhým typem, při kterém vzniká ocelářská struska, je proces výroby oceli v elektrických obloukových pecích. Při tomto procesu se, na rozdíl od předchozího typu výroby, nepoužívá surové žhavé železo, ale železný šrot, který je takto možné recyklovat. Do pece jsou zavedeny tři grafitové elektrody, kterými je do železného šrotu puštěn elektrický proud. Elektrickým proudem je železný šrot roztaven. Při tavení jsou do šrotu přidávány další přísady, které upravují výsledné vlastnosti oceli. Po roztavení kovů dochází ke stejnému postupu jako u předchozího typu výroby, a to k vhněnutí kyslíku do pece pod vysokým tlakem. Kyslík se váže na nečistoty a tvoří nad roztavenou ocelí vrstvu nečistot - strusku. Ta je odvedena z pece pomocí jejího nahnutí.

Ocelářské strusky se liší od vysokopecních strusek mírně také svým chemickým složením. Obecné popsání je složitější, jelikož u vysokopecních strusek je primárním materiálem železná ruda, kdežto u výroby oceli je kromě samotného železa používáno ještě dalších kovů a jiných přísad, které ovlivňují vlastnosti výsledné oceli. Proto jsou podstatné pro chemické složení strusky vstupní materiály.

Nejméně se od vysokopecní strusky liší struska ocelářská vyráběná v konvertorech, která má obecně menší podíl křemíku a vyšší podíl manganu. Více se liší ocelářská struska vyráběná v elektrických obloukových pecích. Ta může být charakterizována v některých případech jako nebezpečný odpad, a to díky vysokému podílu chromu. Dále může struska z elektrických obloukových pecí obsahovat vysoký podíl hliníku (ve formě Al_2O_3), díky úpravám vlastností oceli. [2, 30, 31]

Tabulka 12 - Orientační hodnoty chemického složení metalurgických strusek [%]

Složka	Vysokopecní struska	Ocelářské strusky				Reference	
		BOF	EAF - C	EAF - A/S	Ladle	Cement	Andezit
CaO	35-42	30-55	35-60	39-45	30-60	64,2	5,8
SiO ₂	33-38	8-20	9-20	24-32	2-35	22	59,6
FeO	0,1-2,8	10-35	15-30	1-6	0,1-15	3	3,1
MgO	7-12	5-15	5-15	5-20	1-10	1,5	2,8
Al ₂ O ₃	10-15	1-6	2-9	3-7,5	5-35	5,5	17,3
S	1-1,5	0,05-0,15	0,08-0,2	0,1-0,3	0,1-1	2	-
MnO	<1,0	2-8	3-8	0,4-2	0-5	-	-
Cr	-	0,1-0,5	0,1-1,0	0,1-20	0-0,5	-	-
P	<0,1	0,2-2	0,01-0,25	0,01-0,07	0,1-0,4	-	0,2

Zdroj: [32]

1.6.1.2 Vliv chlazení na vlastnosti strusek

Jak již bylo popsáno výše, po oddělení odpadu od surového železa (nebo oceli) se odpad prudce zchladí a vzniklý materiál je obecně nazván struskou. Na procesu ochlazení závisí mineralogické složení dané strusky. To je důležité především pro formu a možnosti využití daného typu strusky. Mineralogické složení strusky (spolu s chemickým) ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti strusky, což má primární dopad na možnosti použití dané strusky.

Zchladit strusky lze několika způsoby za použití různých postupů a materiálů. Nejzákladnějším postupem je chlazení vodou jako postřik nebo hašením. Dalšími postupy jsou například chlazení vodní párou nebo pasivně vzduchem či hašením vzduchem.

Mechanické vlastnosti strusky ovlivňují zásadně například použití dané strusky jako kameniva do betonu. K tomu je vhodná hrudkovitá struska s vysokým podílem hrubé frakce. Tuto mechanickou vlastnost ovlivňuje chlazení strusky. Pro dosažení takového podílu hrubé frakce ve strusce je využíváno pomalé chlazení strusky za použití vzduchu. Tento typ strusky má objemovou hmotnost cca 2100 - 2800 kg/m³ a její úhel vnitřního tření (což je jeden z faktorů ovlivňující použití materiálu ve stavbě pozemních komunikací) je 35° - 40°. Pomalé chlazení se provádí vysypáním, potažmo vylitím žhavé strusky do jámy v zemi, kde struska pozvolna chladne na vzduchu. Jak již bylo zmíněno, tento proces zapříčiní vznik velké hrubosti výsledné strusky. Struska má podobu velkých hrudek a prachu (rozpad β -C2S na γ -C2S při teplotě cca 675 °C, což zapříčiní rozpad jednotlivých krystalů na prach). Rozpad na prach probíhá samovolně i při nižších teplotách, ale pomaleji, tudíž není tak znatelný.

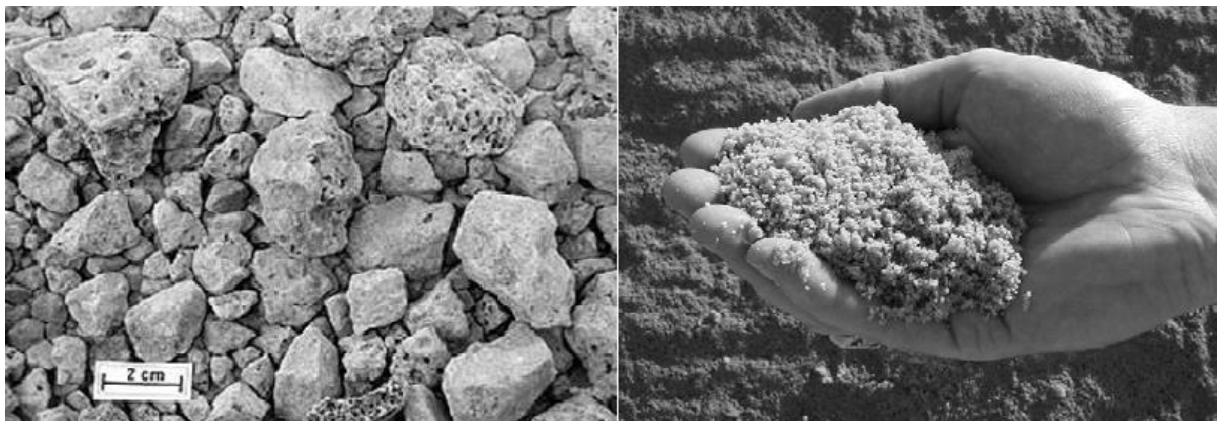
Objemová hmotnost ocelářských strusek se díky odlišnému chemickému složení pohybuje v rozmezí cca 3200 - 3600 kg/m³ a vnitřní úhel tření se pohybuje okolo 40° - 45°. Nicméně typ pomalu chlazené strusky není díky svým vlastnostem (a krystalické struktuře) vhodným materiálem pro výrobu hydraulických pojiv pro stavbu pozemních komunikací.

Další typ chlazení strusky využívá k hašení nebo postřiku vodu. Vodní postřik je variantou, která žhavou strusku ochlazuje rychlejším tempem. Cílem je dosažení stejné struktury a vlastností strusky jako u strusky chlazené vzduchem, ale rychlejším způsobem, který zapříčiňuje v pozdějších fázích chladnutí vodní postřik. V praxi to znamená, že žhavá struska je vysypána do jámy, kde je chlazená vzduchem. Po vzniku hrudkovité struktury je proces chlazení urychlen vodním postřikem. Výsledná struska je obdobná typu chlazenému pouze vzduchem, ale obsahuje převážně jemnější částice, díky urychlené změně teploty materiálu. Tato rychlejší změna teploty také omezuje silikátový rozpad materiálu na prach.

Dalším typem chlazení žhavé strusky je hašení vodou, které již spadá do kategorie prudkého ochlazení. Voda je na žhavou strusku stříkána pod vysokým tlakem. Výsledná struska musí nicméně podstoupit proces vysušení, jelikož část vody z postřiku zůstane ve strusce. Jedná se přibližně o 30 % veškeré vody, která byla použita k postřiku. Produkt vzniklý prudkým ochlazením se nazývá granulovaná struska, většinou vysokopecní, která je nejvyužívanějším materiálem při recyklaci pozemních komunikací, a to jako materiál samotný, nebo jako hydraulické pojivo, či jako přísady, například do cementu. Vysokopecní granulovaná struska se vyznačuje sklovitou strukturou, která je vhodná právě pro využití strusky jako přísady. Tento způsob chlazení se využívá primárně pouze u vysokopecní strusky, díky obsahu křemíku, který způsobuje výslednou sklovitost materiálu. Naproti tomu

není typ chlazení hašení vodou využíván u ocelářské strusky díky nižšímu podílu křemíku, a hlavně díky vyšší viskozitě, kterou se ocelářská struska vyznačuje. Prudké ochlazení by u tohoto typu strusky mohlo vést až k nerovnoměrnému zatuhnutí strusky, které by vedlo k uvěznění vody uvnitř struktury a vzrůstu tlaku uvnitř materiálu. Tento tlak by mohl vést až k prudké explozivní reakci, která by uvolnila vodní páru uvězněnou uvnitř materiálu.

Posledním a nejméně využívaným typem chlazení žhavé strusky je chlazení pomocí vodní páry nebo páry vzdušné. Pro tento typ jsou budovány speciální žlaby, do kterých se skrze síto lije žhavá struska a vodní pára nebo vzduch je ke strusce přiváděn zespodu. Struska je rozfoukána do malých částic, které následně padají do nádrže nebo na stěnu. Tento typ chlazení způsobuje u strusky nižší objemovou hmotnost, a to díky pórovitosti její struktury zapříčiněné rozfoukáním strusky. Tento typ strusky je dále zpracováván na expandovanou strusku, která může sloužit jako pojivo nebo přísada do lehčeného betonu.



Obrázek 15 - *Vysokopeční struska chlazená vzduchem (vlevo) a granulovaná vysokopeční struska (vpravo)*

Zdroj: [32]

Primárními důvody využití jiného typu chlazení, než je pasivní chlazení vzduchem (případě kombinace jednotlivých typů chlazení) je docílení jiné struktury u strusky, a to především menší velikosti jednotlivých částic materiálu a co největšímu zabránění chemických reakcí a následného rozpadu materiálu na prach. Kombinací jednotlivých typů chlazení lze docílit rychlého a účinného procesu, kdy je struska rychle ochlazená a zároveň je eliminováno riziko prudké exploze způsobené tlakem uvězněné vodní páry a je docíleno velikosti jednotlivých částic v materiálu.

Po procesu ochlazení je v dnešní době již aplikován další krok úpravy strusky. V takto ochlazeném surovém stavu obsahuje struska až 15 % železa nebo oceli ze svého celkového objemu. Ponechání strusky v tomto složení by bylo plýtvání železnou rudou, tedy neefektivní

využití přírodních zdrojů, což zabraňuje trvale udržitelnému rozvoji. Ze strusky jsou proto v dalším kroku odstraněny železné a ocelové části magnetem. Zbytkové železo nebo ocel se následně vrací zpět do procesu výroby.

Posledním krokem před výsledným produktem je pomletí či drcení strusky na určenou velikost. Drcení probíhá u typů strusek určené jako náhrada kameniva, příměs do umělého kameniva nebo kamenivo do betonu. Drcením a následně mletím procházejí typy strusek určené jako příměsi do cementu nebo jako jiná hydraulická pojiva. [1, 2, 27, 28, 30, 33]

1.6.1.3 Využití strusek v praxi

Díky různým typům strusky je možné ji využít při různých činnostech a to především jako náhrada vzácnějšího, dražšího nebo méně ekologického materiálu ve stavebnictví. Práce se primárně zabývá recyklací vozovek za studena, a struska je odpadním materiálem, který může nahradit jiné materiály, a zároveň je tak využito odpadu, který produkuje jiná část průmyslu.

Jedním z příkladů využití strusek v praxi je například nahrazení těžného písku, který je nutné vytěžit z přírodního zdroje, vysokopecní granulovanou struskou. Nebo lze strusky použít jako přísady do betonů, jak je uvedeno výše. Nahrazení cementu struskou je i tématem této diplomové práce. Dalším možným využitím strusky je využití v podobě tzv. studeného odvalu. Ten je charakterizován v TP 138 jako použití umělého kameniva ze strusky při konstrukci pozemních komunikací. Prakticky se jedná o hutní suť, která je využívána jako jeden podíl nestrukturní hmoty, která je tvořena velkou diverzitou materiálů a nevytříděnou zrnitostí, která se používá při tvorbě zemních těles při výstavbě násypů, nebo do aktivních zón. Nejefektivnějším využitím strusky, které je v poslední době stále využívanější metodou, je využití strusky jako hydraulického pojiva ve stavebnictví, například při výstavbě pozemních komunikací.

Na efektivnost strusky se v dnešní době dělají rozsáhlé výzkumy, a to především na možnosti náhrady využívaného materiálu podílem strusky, a jak tato náhrada zapůsobí na vlastnosti výsledné stavby. Kanadská studie například prokázala, že beton s náhradou cementu struskou v podílu 25 % prokazuje dokonce lepší odolnost vůči tlaku (tedy pevnost) a síranům (struska ředí citlivý obsah C_3S a $Ca(OH)_2$). Dále také struska pozitivně ovlivňuje (zpomaluje) například proces depasivace v konstrukci. Další vlastnosti přidání strusky do materiálu nijak výrazně neovlivnily.

Důležitým poznatkem je ovšem slovo náhrada a přísada. Při dalších experimentech s vyšším podílem strusky (například 50 %) bylo ovšem zjištěno, že výsledný vzorek již nevykazuje vylepšené vlastnosti původního materiálu, nýbrž výrazně horší. Je tedy nutné brát strusku stále jako doplňkový materiál, který by měl být využíván, ovšem pouze do určitého podílu.

Využití strusky v praxi je tedy nezbytným krokem na cestě k trvale udržitelnému rozvoji metalurgického průmyslu, který nepatří k ekologické skupině typů průmyslu. Je tedy nutné, aby existovala snaha, co nejméně zatěžovat životní prostředí. V praxi je tedy možné využívat strusku v několika různých formách, které byly naznačeny výše.

Prvním praktickým využitím strusky v praxi je využití strusky jako umělé kamenivo. Takto jsou využity typy strusek, které nejsou svým složením nebo vlastnostmi vhodné k využití jako hydraulická pojiva ani jako agregát do cementu.

Druhým příkladem je využití strusky jako kameniva do betonu. Pro toto použití je využíván stejný typ strusky jako pro umělé kamenivo, nicméně je třeba dávat pozor na pórovitost jednotlivých částic. Například při chlazení vodní parou má struska v surovém stavu nižší hmotnost, ale při využití jako kameniva do betonu je nutné počítat se spotřebou cementu, který bude potřeba k zaplnění všech těchto pórů. To může dramaticky zvýšit nebo snížit spotřebu cementu při stavbě a také ovlivní výslednou pevnost. Pro toto použití se doporučuje nahrazovat kamenivo pouze částečně v případě, že je použita struska ocelářská.

Třetím příkladem je využití strusky jako příměsí do směsných cementů typu CEM II A/B (6 - 35% strusky) nebo CEM III A/B/C (36 - 95% strusky). Tato metoda je využívána hlavně z důvodu snížení nákladů na výrobu Portlandského cementu a snížení produkce CO₂, jelikož výroba slínku a tedy i Portlandského cementu je z tohoto hlediska příčinou vzniku velkého množství tohoto skleníkového plynu. Dalším pozitivem je zvýšení chemické odolnosti betonu. Negativní dopad má struska hlavně ve snížení hydratačního tepla a počáteční pevnosti v tlaku betonu. Struska se v tomto případě přimíchává spolu se slínkem na konci procesu vzniku Portlandského cementu. Tento typ využívá především vysokopecní strusku, jelikož ocelářská struska svým složením lehce neodpovídá požadovanému výsledku. Existují ovšem studie naznačující, že by se struska ocelářská mohla používat přímo při výrobě slínku Portlandského cementu spolu s vhodnými příměsemi podle vlastního složení strusky.

Čtvrtým příkladem praktického využití strusky je její použití při výrobě skelných minerálních izolací jako náhrada jiných materiálů. Konkrétně se jedná o čedič nebo diabas.

Roztavením vstupních materiálů (včetně strusky) spolu s tmelícími látkami (polymery) a oleji vzniká směs, která je protlačena skrze otvory o velikosti průměru 2 - 6 μm , čímž vznikají vlákna minerální izolace. Tento typ izolace má i vyšší požární odolnost.

Posledním praktickým využitím, kterému se věnuje i praktická část diplomové práce, je využití strusky zcela jako náhrady Portlandského cementu. Struska se v tomto použití řadí mezi alkalicky aktivovaná pojiva, latentně hydraulicky aktivované látky a geopolymery. Tato náhrada je dnes oblíbená zejména v Asii, kde je struska díky rozvinutému metalurgickému průmyslu produkována ve velkém a zároveň existuje velká poptávka po cementu ve stavebnictví. Alkalickou (chemickou) aktivací rozumíme proces transformace sklovité struktury, které jsou ve strusce (díky křemíku), do kompaktních tvarů. Tato transformace je zapříčiněná narušením vazby mezi křemičitanovými mnohostěny a hlinitanovými mnohostěny ve vysoce alkalickém prostředí, což dále způsobuje přerod těchto roztržených vazeb (a následně vzniklých iontů) do tekuté fáze, ze které jsou následně skládány nové vazby. Tyto nové vazby ztvrdnou a vzniká tak kompaktní tvar. Druhým typem náhrady Portlandského cementu jsou tzv. geopolymery. Teoreticky se jedná o další vývojový stupeň alkalicky aktivovaných pojiv. Geopolymery související se struskou (díky obsahu křemíku a hliníku) se nazývají poly(sialáty). Jedná se o skupinu anorganických polymerů, které mají vnitřní trojrozměrnou strukturu křemíku, hliníku a kyslíku. Ta u alkalicky aktivovaných pojiv chybí. Tato trojrozměrná struktura vytváří různé typy řetězce SiO_4 . Právě tento rozdíl výrazně ovlivňuje mechanické i fyzikální vlastnosti geopolimerů a odlišuje je tak od alkalicky aktivovaných pojiv. Jednou z takových vlastností je trvanlivost geopolimerů a jejich chemická odolnost. Geopolymery vykazují zvýšenou chemickou odolnost, pevnost v tlaku a tahu a minimální známku deformace. Dalším faktorem, který ovlivňuje vlastnosti geopolimerů, je zejména teplota při tvrzení betonu.

Jako netradiční pojivo, která spadá do obsahu této diplomové práce, a zároveň je v posledních letech předmětem diskuzí, je pojivová báze DASTIT®, která je založena na využití fluidního popílku a dalších přísad, které se upravují speciálním typem mletí. Ta se dá připravit i z relativně kyselých materiálů, a to i přesto, že požadovaný materiál je pro stavebnictví zásaditý. Výhoda pojivové báze DASTIT® je především právě v možnostech výroby. Dá se vyrobit z různých typů odpadů, které produkuje energetický průmysl (popílky), sklenářský průmysl (sklářský odpad), metalurgický průmysl (kyselé strusky), nebo uhelné doly či zemní požáry. DASTIT® se skládá z jednotlivých komponent, které jsou mechanicky aktivovány takovým způsobem, aby měly superpucolánové vlastnosti.

Zároveň lze při správných parametrech vstupních materiálů docílit výroby pojivové báze DASTIT® bez přidání jakéhokoliv chemického aktivačního činidla.

Tato pojivová báze je v praxi využívána k náhradě značné části portlandského slínku (35 - 70 %) při výrobě Portlandského cementu. To znamená, že v kombinaci se struskou je možné nahradit větší část Portlandského cementu odpadními materiály a zároveň mu ponechat jeho vlastnosti a kvalitu. Tím je samozřejmě redukována zátěž životního prostředí a jsou podstatně redukovány také náklady na výrobu Portlandského cementu, a to až o 30 - 60 %.

V dnešních dnech je nově vyvíjeno pojivo DASTON, které může fungovat samostatně jako hydraulické pojivo, které v určitých případech dokáže zcela nahradit jinou stavební hmotu buďto samostatně pouze s vodou, nebo s různými plnivými.

Výše se kapitola věnovala surové strusce. Nicméně existují také postupy, jak strusku recyklovat. Jedná se o strusku vyrobenou dříve, než bylo možné ji recyklovat. Taková struska byla obvykle odvezena na haldu, a tam zůstala. Jedná se například o vzduchem chlazenou vysokopeční strusku, která je ovšem téměř zcela zkarbonatovaná. Dá se použít ve formě odprašků a do směsi umělého kameniva. Pro takové účely je třeba strusku aktivovat, aby bylo vhodně ji použít pro recyklaci a následně například jako hydraulické pojivo. Aktivace se provádí mechanicky, a to například vysokorychlostním mletím, kde dochází ke zmenšování jednotlivých částic, ale také k aktivaci energie a vazeb mezi jednotlivými částicemi, tedy zvýšení její chemické reaktivity. Druhým typem aktivace je chemická aktivace strusky. Ta se provádí ve chvíli, kdy je mechanická aktivace (mechano-chemická nebo tribochemická) strusky nedostatečná a přistoupí se k aplikaci příměsí. Jako chemické příměsí se používají například hašené vápno, vodní sklo na bázi sodíku nebo draslíku. Touto aktivací vzniká struska vhodná k využití jako hydraulické (Románské, Kuffstenské) vápno nebo k výrobě směsných cementů s portlandským slínkem.

Podmínky využití strusky při rekonstrukci pozemních komunikací jsou určeny normami ČSN 73 6133 Navrhování o provádění zemního tělesa pozemních komunikací a ČSN 73 6121 - 30 Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy. Primárně je určující mineralogické a chemické složení strusky, aby byla zaručena nerozpadavost materiálu a její neobtnavost. Bobtnání strusky je problém, který například způsobil zvlnění dálnice D1 v Moravskoslezském kraji. [2, 3, 27, 28, 30, 31, 34–36]

1.6.2 Popílek a škvára

Další alternativou je také odpad podobný strusce. Jedná se o popílky a škváry, což je odpad z elektrárenských a teplárenských provozů, který vzniká spalováním uhlí při teplotách 1200 - 1700 °C. Nejčastěji se používají k výrobě cementu, umělého kameniva a stavebních násypů v konstrukcích vozovky. Problematikou využívání tohoto materiálu je jeho nestejnoroďá kvalita a různé proměnlivé vlastnosti. Tato nestejnoroďost vzniká díky různoroďé kvalitě uhlí a dalšími podmínkami, které působí na uhlí při vzniku popílků a škváry.

Popílek je charakterizován jako odpadní materiál, který vzniká při procesu spalování uhlí, jak již bylo zmíněno výše. Velký podíl složení popílku zastupují křemičitanové sklo, mullit a SiO₂. Jedná se o směs velmi jemných reaktivních částic.

Škvára je v podstatě teplárenská struska, která má porézní a skelný charakter. Jednotlivé částice škváry jsou velikostně i tvarově podobné. Jedná se o zbytky, které zůstávají na granulačních a roštových kotlích po procesu spálení černého nebo hněďého uhlí. Po procesu spálení je struska expedována do vodních lázní. Po následném odvodnění vzniká výsledný produkt - škvára. Škvára je jiným typem strusky a svými vlastnostmi a podobou připomíná špatně zrněné písky. Škvára se, stejně jako struska chlazená například vzduchem, používá jako zásyp pro zemní vrstvy stavebních konstrukcí PK. Dalším jejím možným využitím je ostřivo při cihlářské výrobě. [2]

2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Úkolem diplomové práce je podat jejímu čtenáři ucelený obraz o technologii recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena, jak z hlediska prováděcích technologií, tak z hlediska možných použitelných vstupních materiálů. Na základě shromáždění informací o cementech a struskách používaných při možném návrhu směsí pro recyklace za studena je sledován vliv míry substituce cementu vysokopecními struskami na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti jak čerstvých variantních laboratorních směsí, tak i vliv náhrady cementu vysokopecními struskami na kontrolní parametry zkoušek realizovaných na hotových zkušebních tělesech. Základní (referenční) receptura, s kterou jsou pozdější dosažené výsledky porovnány, je tvořená směsí štěrkodrti, asfaltového R-materiálu, portlandského směsného cementu a asfaltové emulze.

Na základě rešeršní činnosti byly stanoveny následující cíle:

- Klasifikace geometrických a fyzikálních vlastností základních složek plniva použitých do navržených kompozitních směsí (kusová zrnitost, suchá laboratorní srovnávací objemová hmotnost, optimální vlhkost, maximální objemová hmotnost směsi).
- Klasifikace materiálových charakteristik na zhotovených tělesech provedených z navržených kompozitních směsí (objemová hmotnost zkušebních těles, mezerovitost směsí, pevnost v příčném tahu a odolnost proti vodě, modul tuhosti, šíření trhliny zkouškou ohybem).
- Možnost substituce hydraulických pojiv ve stmelených směsích vysokopecními struskami.
- Stručná finanční analýza receptur s využitím vysokopecních strusek jako náhrady portlandského směsného cementu ve směsích stmelených hydraulickými pojivy

V závěru práce je provedeno celkové vyhodnocení výsledků na vhodnost použití vysokopecních strusek ve stmelených směsích. Zjištěné výsledky jednotlivých zkoušek jsou následně vyhodnoceny a porovnány podle platných předpisů a norem. Na jejich základě je určena vhodnost použití tohoto odpadního materiálu do konstrukčních vrstev liniových staveb a další doporučení pro budoucí vědecké práce.

3 METODY MĚŘENÍ VLASTNÍHO EXPERIMENTU

V této části diplomové práce je popsáno materiálové složení všech navržených stmelených směsí. Pro veškeré zhotovené směsi je použito asfaltové a hydraulické pojivo s tím, že u všech vyrobených směsí je jako asfaltové pojivo zvolena speciálně mísitelná kationaktivní asfaltová emulze pod názvem Emultech P (C60B7), darovaná pro potřeby experimentu firmou Eurovia CS, a.s., závodu Emulze Kolín a dávkování asfaltové emulze je u všech typů záměsí stejné, bez ohledu na to, jaké hydraulické pojivo je v té či oné směsi použito. Z předešlého souvětí lze vyvodit myšlenku, že hydraulické pojivo nebude u všech typů směsí totožné a navíc se bude variovat i jeho dávkování. K potřebám experimentu je užito jednak hydraulické pojivo ve formě cementu s typovým označením CEM II/B-S 32,5 R z cementárny Radotín v Praze, a 4 typy vysokopecních strusek, které byly obstarané skrze katedru silničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze. Plnivo je pro všechny směsi stejné, skládá se ze dvou složek. První je šterkodrt' s označením ŠD_A, frakce 0/32, obstaranou v kamenolomu v Plaňanech. Druhou složkou je R-materiál o frakci 0/11, se zbytkovým obsahem asfaltového pojiva 5,6 %, darovaným Východočeskou obalovnou, provozovna Plačice.

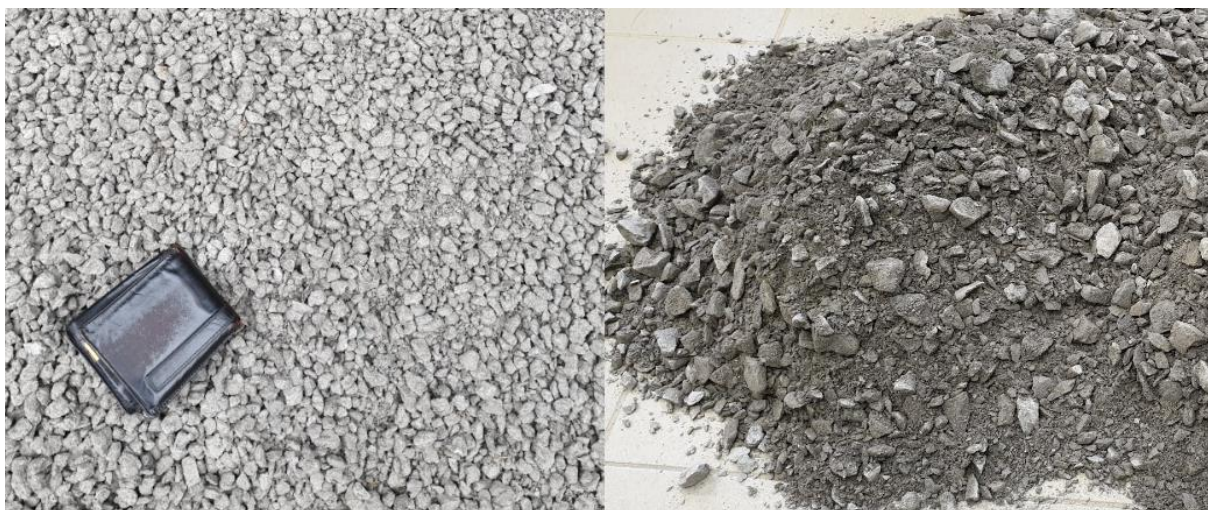
V další části této diplomové práce je popsána příprava použitých receptur s následnou výrobou zkušebních těles. Po uplynutí časových intervalů (dle norem a příslušných TP) jsou na vytvrdnutých zkušebních tělesech provedeny kontrolní laboratorní zkoušky (pevnost v příčném tahu, modul tuhosti, šíření trhliny zkouškou ohybem). V závěrečné části práce jsou výsledky experimentů vzájemně porovnány a prodiskutovány.

3.1 Použité směsi a jejich výroba

Snahou této diplomové práce je najít reálnou substituci směsných cementů ve stmelených směsích používaných u recyklace za studena pomocí vysokopecních strusek. K výrobě variant zkušebních směsí bylo použito plnivo složeného z kombinace šterkodrti o frakci 0/32 s asfaltovým R-materiálem frakce 0/11 ve vzájemném poměru 1:1. Vyrobené směsi obsahují zvolený typ hydraulického pojiva (vysokopecní struska, cement) v proměnlivém dávkování dle jednotlivých receptur a asfaltovou emulzi C60B7, jejíž dávkování bylo u všech směsí konstantní.

Veškeré porovnávací zkušební směsi, tedy směsi A - F, respektive dosažené výsledky na tělesech vyhotovených z těchto směsí, se porovnaly s výsledky, které byly naměřeny na tělesech vyrobených ze směsi referenční (směs REF) pomocí laboratorních zkoušek.

Poměr štěrkodrti k asfaltovému recyklátu v poměru 1:1 byl zvolen z toho důvodu, aby se namíchané zkušební směsi blížily svými vlastnostmi a množstvím materiálům, ze kterých se mísí stmelené vrstvy v praxi. Ve skutečnosti totiž není příliš obvyklé, aby se budoucí stmelená vrstva skládala pouze z jednoho homogenního materiálu, zpravidla tam nějaký vzájemný poměr štěrkodrti a asfaltového pojiva je. Výjimečný případ potvrzující toto pravidlo se ale nabízí například při modernizacích dálnic, kdy se za studena recyklují původní vrstvy stmelené cementem.



Obrázek 16 – Použité materiály: R-materiál 0/11 (vlevo); ŠDA 0/32 (vpravo)

Zdroj: [vlastní]

Varianta použitých pojiv v podobě cement + asfaltová emulze byla upřednostněna před variantou cementu se zpěněným asfaltem. Důvody jsou logické, lepší zpracovatelnost laboratorních směsí a menší náročnost na technickou vybavenost laboratoře.

Nyní se zaměříme na přípravu jednotlivých složek a postupu při mísení. Před mísením v rotační míchačce se musely veškeré vysušené komponenty (ŠD, R-materiál) zkušebních směsí pečlivě navážít na laboratorních vahách. Hmotnostní zastoupení materiálů např. u referenční směsi je uvedeno v následující tabulce (obdobným způsobem byly naváženy všechny zkušební směsi):

Tabulka 13 - Materiálové složení referenční směsi

Směs Referenční REF	Zastoupení složek [%]	Hmotnost [g]
Složení suché směsi:	100,0%	5 000
ŠD _A 0/32	50,0%	2 500
R-materiál 0/11	50,0%	2 500
Cement II/B-S 32,5 R	3,0%	150
Asfaltová emulze	3,0%	150
Voda	3,0%	150
Struska	0,0%	0

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 17 - Mísení směsi v laboratorní míchačce (vlevo); Ověření optimální vlhkosti metodou koule (vpravo)

Zdroj: [vlastní]

Navážené suché složky (ŠD, R-materiál, cement, struska) se postupně nasypaly do míchací nádoby a pomocí rotační míchačky se smíchaly. Po promísení suchých složek byla za stálého míchání přidávána do míchačky postupně voda (cca polovina její navážky), po chvíli veškerý obsah asfaltové emulze a zbytkové množství vody. Potřebné množství vody ve zkušebních směsích bylo odhadováno dle citu pomocí metody koule (realizována Proctorova zkouška byla provedena pouze z informativního důvodu). Z důkladně promísené směsi se poté vyhotovila válcová zkušební tělesa.

Složení jednotlivých směsí jsou uvedeny v *Tabulka 144* s tím, že mísení samotných směsí probíhalo ve 2 etapách. V prvním kole byla vyhotovena směs referenční, která byla označena jako REF společně se čtyřmi prvotními srovnávacími variantami (ozn. A - D). Tyto porovnávací variantní směsi měly stejné procentní zastoupení jednotlivých složek

(ŠD, R-materiál, AE, struska), jen se v těchto směsích měnil druh použité vysokopecní strusky. Po vyhodnocení výsledků u prvotních srovnávacích směsí byla vybrána směs s nejlepšími výsledky, jejíž naměřené parametry se nejvíce podobaly parametrům referenční směsi a z této v uvozovkách nejlepší varianty se následně provedla úprava původní receptury na další dvě (směsi E - F).

Celkem bylo vyrobeno sedm (7) zkušebních směsí. Ani v jedné stmelené směsi nebylo použito chemických přísad a příměsí. Zvolené varianty receptur jednotlivých zkušebních směsí pro experiment této diplomové práce byly společně s použitými typy vysokopecních strusek konzultovány v průběhu experimentu s Fakultou stavební ČVUT v Praze a s Univerzitou Pardubice.

Tabulka 14 - Zastoupení jednotlivých komponent v navržených zkušebních směsích [%]

Složky materiálů ve směsích recyklace za studena	Podíly jednotlivých složek ve směsi [%]						
	REF	A	B	C	D	E	F
Štěrkodrt' ŠD _A 0/32	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
R-materiál 0/11	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Cement II/B-S 32,5R	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
Asfaltová emulze Emultech P	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Voda	3,9	4,0	3,8	4,3	5,1	4,3	5,2
MS-PT (pánvová)	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MS-KVP (vzduchem chlazená)	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MS-TG (granulovaná vysokopecní)	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0
MS-TG + DASTIT (poměr 50:50)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	3,0	4,0

Zdroj: [vlastní]

3.1.1 Druhy alternativních pojiv použitých při experimentu

Všechny typy použitých strusek byly upraveny vysokorychlostním mletím a obstarány skrze Fakultu stavební ČVUT v Praze.

V ČR jsou zdroje strusek ze zpracování železitých kovů dobře dostupné především ve třech lokalitách (ložiscích), jde o ložiska v Kladně, Třinci a Ostravě. Alternativu k těmto místním zdrojům lze nalézt například za státními hranicemi s Rakouskem v severorakouském Linci. Pojivová popílková báze DASTIT® se momentálně vyrábí v Plzni.

MS-PT

Jedná se o vysokopecní pánvovou strusku původem z Třince, ve které je oxid vápenatý obsažen ve stopovém množství. Chemické složení této vysokopecní strusky uvedeno níže.

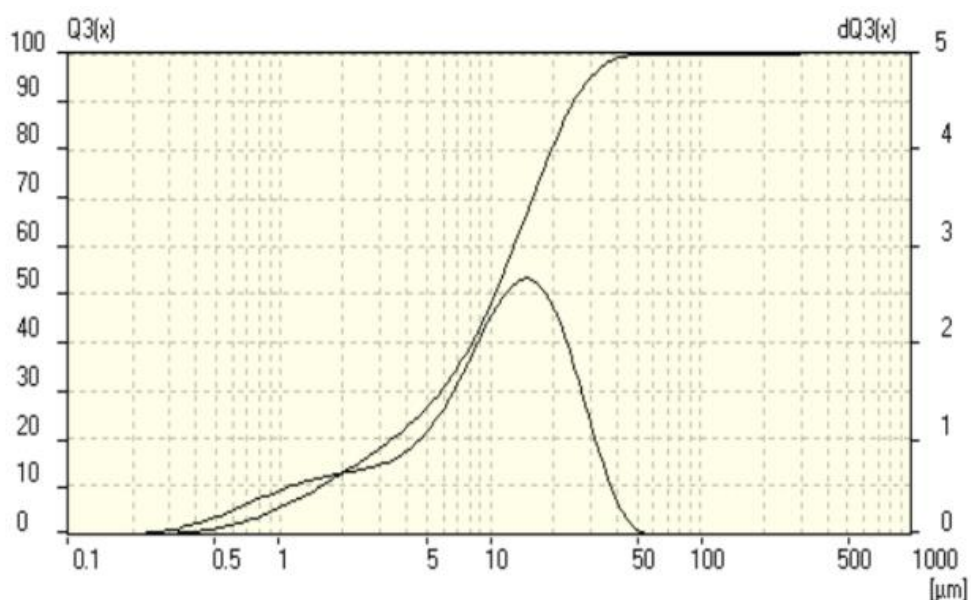
Tabulka 15 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-PT, stanovené XRF analýzou

Vybrané oxidy	Obsah ve strusce [%]
Na ₂ O	< 0,01
MgO	< 0,00
Al ₂ O ₃	< 0,00
SiO ₂	34,03
SO ₃	< 0,00
CaO	< 0,00
MnO	2,96
Fe ₂ O ₃	16,97

Zdroj: [37]

MS-KVP

V tomto případě jde o stabilizovanou vzduchem chlazenou vysokopecní strusku původem z haldy Koněv patřící do vlastnictví firmy DESTRO v Kladně. Zpracována mletím v desintegrátoru, její měrný povrch je zpracován metodou podle Blaine a činí 370 kg/m² (zpracovala Fakulta stavební ČVUT v Praze). Přítomnost relativně vysokého obsahu volného vápna (CaO), jak je patrné z *Tabulka 16*, je dobrým předpokladem patentní hydraulické aktivity tohoto materiálu a lze předpokládat, že bude využitelná jako částečná náhrada klasického cementu.



Obrázek 18 - Granulometrie strusky MS-KVP

Zdroj: [38]

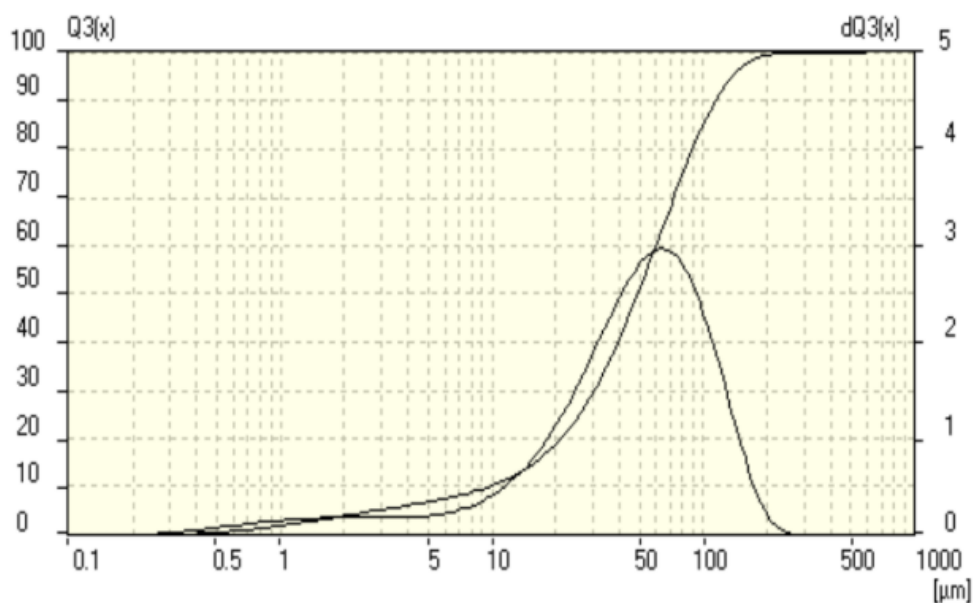
Tabulka 16 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-KVP, stanovené XRF analýzou

Vybrané oxidy	Obsah ve strusce [%]
Na ₂ O	2,01
MgO	5,09
Al ₂ O ₃	11,27
SiO ₂	24,07
SO ₃	4,46
CaO	37,97
MnO	1,11
Fe ₂ O ₃	4,33

Zdroj: [39]

MS-GT

Opět se jedná o vysokopecní granulovanou strusku mletou v desintegrátoru, původem z Třineckých železáren, měrný povrch stanovený dle Blaine je v případě použitého vzorku podstatně nižší než u strusky předchozí a dosahuje pouze 84 kg/m².



Obrázek 19 - Granulometrie strusky MS-GT

Zdroj: [40]

Tabulka 17 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-GT, stanovené XRD analýzou

Vybrané oxidy	Obsah ve strusce [%]
CaO	42,3
MgO	8,81
SiO ₂	40,1
Al ₂ O ₃	6,42
SO ₃	0,15
Sulfidy	0,49
Chloridy	0,022

Zdroj: [41]

MS-GT + DASTIT®

Kombinace vysokopecní granulované strusky s pojivovou popílkovou bází DASTIT® byla namíchána na Fakultě stavební ČVUT v Praze ve vzájemném poměru 1:1. Struska pochází z Třineckých železáren a báze DASTIT® je původem z Plzně.

Tabulka 18 - Chemické složení pojivové báze DASTIT®, stanovené CRF analýzou

Vybrané oxidy	Obsah ve strusce [%]
SiO ₂	31,16
TiO ₂	1,36
Al ₂ O ₃	15,19
Fe ₂ O ₃	6,67
SO ₃	12,61
CaO	25,76
MgO	1,01

Zdroj: [42]



Obrázek 20 - Použité vysokopecní strusky

Zdroj: [vlastní]

3.2 Výroba zkušebních těles

Po namíchání stmelných směsí v rotační míchačce byla vyrobena zkušební tělesa dle níže uvedeného postupu. K výrobě zkušebních těles pro zkoušku v příčném tahu a odolnosti proti vodě bylo použito 6 laboratorních ocelových forem válcového tvaru o průměru 150 mm a výšky 130 mm. Vymazaná zkušební forma se vložila do ručního hydraulického lisu, na horní stranu formy se vložil nástavec a na dno formy se vložil filtrační papír. Namíchaná stmelná směs o známé navázce se laboratorní lopatkou opatrně vkládala do formy cca do 1/3 její výšky a následně se dusadlem přibližně 15-ti údery rovnoměrně rozloženými po celé ploše zhutnila. Tímto způsobem byly zhutněny další 2 následující vrstvy a na horní povrch zhutněné směsi se opět vložil filtrační papír. Poté se sestavil ruční hydraulický lis do zkušebního provozu. Zkušební těleso se poté zhutnilo lisováním osovou silou ($88,5 \pm 0,5$) kN. Při působení síly vlivem dohutňování zkušebního vzorku docházelo k jejímu poklesu, z tohoto důvodu bylo nutné osovou sílu neustále dorovnávat (přibližně 8 stlačovacích cyklů). Těleso bylo dostatečně stlačeno, když osová síla neměnila po dobu cca 30 s svojí velikost. Po zhutnění se zkušební těleso vyndalo z lisu a z důvodu malého počtu zkušebních forem (6) a vysokému počtu zkušebních těles bylo nutné těleso ještě ten den odformovat.



Obrázek 21 - Ruční hydraulický lis (vlevo); Vyhotovené zkušební válcové těleso pro zkoušku pevnosti v příčném tahu (vpravo)

Zdroj: [vlastní]

Jelikož se jedná o tělesa vytvořená ze směsí stmelných hydraulickými pojivky v kombinaci s asfaltovou emulzí, vyhotovená a odformovaná tělesa se nechala po jejich zhotovení 24 hodin na vzduchu o teplotě kolem 20 °C. Po uplynutí této doby se tělesa přendala na následujících 48 hodin do klimatizační komory při 100 % vlhkosti vzduchu a teplotě vzduchu 20 °C. Dále se tělesa uložila při cca 50 % vlhkosti vzduchu a při teplotě pohybující se okolo 20 °C. Po uplynutí 7 dní od výroby těles a podmínek uložení uvedených výše se část těles podrobila zkouškám pevnosti v příčném tahu. Tělesa, na kterých se později prováděla zkouška odolnosti proti vodě, se po uplynutí 7 dní, co byla tělesa uložena na vzduchu, následně uložila na 7 dní do vodní lázně o teplotě vody (20 ± 2) °C. Po odzkoušení odpovídajícího počtu těles zkouškou pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě se počet zbylých těles ponechala zrát na vzduchu ve stinné místnosti, a to do 28. dne od vyrobení, respektive do 56. dne od vyrobení. Tato tělesa se následně upravovala do požadovaných tvarů a rozměrů k podrobení zkouškám stanovení modulu tuhosti a odolnosti šíření trhliny v daných časových intervalech, úprava těchto těles je popsána v kapitole 3.3.8 Stanovení modulu tuhosti, respektive v kapitole 3.3.9 Šíření trhliny zkouškou ohybem.

3.3 Provedené zkoušky experimentu

V této části diplomové práce je uveden pracovní postup jednotlivých kontrolních laboratorních zkoušek provedených při provádění experimentu. Laboratorní zkoušky se týkají nejen základních surovin (ŠD, R-materiál) použitých k výrobě zkušebních směsí, ale i směsí samotných, a v neposlední řadě také samozřejmě zhotovených válcových těles, která se upravovala v závislosti na tom, jaký typ kontrolní zkoušky byl na daném zkušebním tělese proveden.

Volba typu laboratorních zkoušek pro experimentální část diplomové práce vychází z nejdůležitějšího předpisu pro recyklace za studena, kterým jsou TP 208. V zásadě jsou provedeny veškeré zkoušky, které se běžně provádí v praxi při návrhu receptury recyklovaných směsí.

3.3.1 Stanovení kusové zrnitosti

Metodika stanovení zrnitosti směsi se stanovuje dle platné ČSN EN 933 - 1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. Principem zkoušky je roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic, přičemž počet a velikost otvorů sít se volí podle druhu zkoumaného vzorku a cílené přesnosti. Hmotnost částic zachycených na jednotlivých sítích se uvádí ve vztahu k počáteční hmotnosti materiálu v procentech. Pro přehlednost lze vyjádřit propady na sítích v grafické podobě ve formě křivky zrnitosti.

Pomůcky:

Prosévací přístroj, sada zkušebních sít, laboratorní sušárna, laboratorní váhy, kyblík s vodou.

Postup zkoušky:

Před samotným provedením zkoušky zrnitosti je nutné stanovit minimální množství zkušebního vzorku, což lze zjistit z výše uvedené normy, ze které se dozvíme, že pro kameniva maximální frakce 31,5 mm (naš případ) je nutno mít vzorek o hmotnosti kolem 10 kg. Jelikož se navážka pro experiment skládá ze smíchané štěrkodrti s R-materiálem v poměru 1:1, je potřeba nejprve zkušební reprezentativní vzorek smíchané směsi pro zkoušku zrnitosti odebrat. Pomocí kvartace se odebere potřebné množství ŠD a R-materiálu a tyto dvě složky se promísí. Takto smíchaný reprezentativní zkušební vzorek se vloží do nádoby s vodou tak, aby byla navážka ponořena a směs se promísí. Aby došlo

k rozpadu hrudek, je vzorek ve vodě ponechán na dobu cca 24 hodin. Nasáklý zkušební vzorek se poté propere dle postupu uvedeného v normě pro síťový rozbor. Propraný vzorek se následně vloží do sušárny k jeho vysušení při teplotě (50 ± 5) °C do ustálení hmotnosti. Po ustálení hmotnosti se směs vyndá z trouby, nechá se zchladnout na okolní teplotu a zaznamená se její hmotnost (M_2) v g.

Dalším krokem je příprava prosévacího stroje společně se sítí. Jednotlivá zkušební síta se do přístroje ukládají vzestupně, od nejmenší frakce po největší. Aby nedošlo v průběhu zkoušky zrnitosti k úniku naváženého materiálu vlivem prosetí a třesení, je nutno sloupec sít uzavřít dnem a víkem. Na takto připravený sloupec síťových ok se nasype reprezentativní zkušební navážka, se kterou je poté mechanicky třeseno. Po setřesení se jednotlivá síta o různých frakcích včetně posledního dna z přístroje postupně odeberou. Zachycený materiál na jednotlivých sítích se zváží pomocí laboratorních vah a jednotlivé hmotnosti jsou zaznamenány k dalšímu zpracování. Zachycená hmotnost materiálu na každém síti je vypočítána jako procento k původní suché hmotnosti reprezentativní směsi (M_1). Vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k síti 0,063 mm, které se vyloučí a vypočítá se procento jemných částic propadlých tímto sítem. Pro lepší pochopení získaných výsledků jsou výsledky znázorněny graficky. [43]

Pro lepší pochopení průběhu křivky zrnitosti se počítají následující charakteristiky:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

kde C_c je číslo křivosti [-]

d_{10} je průměr zrn odpovídající 10 % propadu zrn [mm]

d_{30} je průměr zrn odpovídající 30 % propadu zrn [mm]

d_{60} je průměr zrn odpovídající 60 % propadu zrn [mm].

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

kde C_u je číslo nestejnozrnnosti [-]

d_{10} je průměr zrn odpovídající 10 % propadu zrn [mm]

d_{60} je průměr zrn odpovídající 60 % propadu zrn [mm]. [44]

Technické podmínky pro recyklace za studena uvádějí doporučené požadavky na zrnitost stmelených konstrukčních vrstev. Požadavky na zrnitost směsí se liší podle druhu použitého pojiva. *Tabulka 1919* Tabulka 20 uvádí doporučené hodnoty zrnitosti v případě

použití cementu nebo jiného hydraulického pojiva, či kombinace cementu s asfaltovou emulzí/zpěněným asfaltem. Při užití asfaltového pojiva samotného, zpěněného asfaltu nebo asfaltové emulze, jsou doporučené požadavky na zrnitost směsi uvedeny v *Tabulka 2020*. [5]

Tabulka 19 - *Doporučené požadavky na zrnitost směsí při použití hydraulických pojiv*

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	

Zdroj: [5]

Tabulka 20 - *Doporučené požadavky na zrnitost směsí při použití asfaltových pojiv*

Velikost síta (mm)	Propad zrn v % hmotnosti
45	100
31,5	95 – 100
22,4	75 – 100
16	60 – 100
8	35 – 70
2	15 – 43
0,063	0 – 8 ¹⁾
¹⁾ Při použití asfaltové pěny 5 - 15	

Zdroj: [5]

3.3.2 Stanovení suché laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a optimální vlhkosti

Tato zkouška je provedena podle platné normy ČSN EN 13286-2: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška. Výše uvedená norma popisuje šest podobných zkoušek zhutnitelnosti, jednotlivé zkušební postupy se liší podle maximální velikosti částic zkoušené směsi. Standartní Proctorova zkouška využívá k hutnění Proctorův pých o hmotnosti 2,5 kg, modifikovaná Proctorova zkouška používá pých těžší, popřípadě se mění výška dopadu pých na tenčí vrstvu materiálu v moždíři, čímž se dosahuje

daleko vyšší míry zhutnění, než je tomu u Proctorovy zkoušky standartní. Podstatou zkoušky je stanovení vzájemného vztahu mezi vlhkostí a srovnávací objemovou hmotností hydraulicky stmelých nebo nestmelých směsí při maximální míře zhutnění.

Pomůcky:

Moždíř se základnou a nástavcem, automatický hutnicí stroj, laboratorní váhy, hladítko, laboratorní plech, laboratorní sušárna, nůž, lopatka.

Postup zkoušky:

Pro tuto zkoušku je tedy využita výše uvedená norma ČSN EN 13286-2 s tím, že je použita metoda modifikované Proctorovy zkoušky s Proctorovým moždířem o rozměrech (B). Rozměry použitých Proctorových moždířů pro tu či onu zvolenou metodu musí odpovídat rozměrům uvedeným v níže uvedené tabulce.

Tabulka 21 - Rozměry Proctorových moždířů

Proctorův moždíř	průměr d_1 [mm]	výška h_1 [mm]	Tloušťka [mm]	
			stěna t_w	základní deska t
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

Zdroj: [45]

Stanovení optimální vlhkosti a suché laboratorní srovnávací objemové hmotnosti je provedeno pouze u základního skeletu všech směsí, tedy 50 % ŠD_A a 50 % R-materiálu bez přidání jakýchkoli pojiv, a to z důvodu informativního a z důvodu vytíženosti laboratoří. Při výrobě jednotlivých záměsí s předepsaným dávkováním pojiv je využita ke stanovení optimální vlhkosti metoda koule. Do smíšeného dvousložkového skeletu ze štěrkodrti a R-materiálu je přidáváno různé množství vody k získání dostatečného počtu bodů pro určení optimální vlhkosti zkoumané směsi. K hutnění vlhkého materiálu uloženého ve formách je použit automatický hutnicí přístroj s odpovídajícím hutnicím pěchem. Modifikovaná Proctorova zkouška je provedena následujícím pracovním postupem. Vymazaná sestava (základní deska, moždíř, nástavec) se umístí a připevní do automatického hutnicího zařízení. Do upevněné moždířové formy odpovídajících rozměrů se postupně vkládá pomocí lopatky namíchaná nestmelaná směs v množství takovém, aby tato směs naplnila po zhutnění více než jednu pětinu výšky formy moždíře. Jednotlivé vrstvy směsi v moždíři se hutní 56 údery pěchu o hmotnosti 4,5 kg, který dopadá z výšky 457 mm nad povrchem směsi při řízení vodící tyčí. Jednotlivé údery jsou rozděleny rovnoměrně

po obvodu moždíře a je nutno se přesvědčit, že pěch vždy dopadá volně a nepřekáží mu směs ve vodící tyči nebo na ní. Tento postup se opakuje ještě čtyřikrát, aby množství směsi naplnilo těleso moždíře a povrch směsi nebyl více než 10 mm nad horním okrajem tělesa moždíře. Po zhutnění poslední vrstvy v moždíři se sestava vyjme z automatického hutnicího přístroje, vrchní nástavec se sejme, přebytečná směs se pomocí nože odstraní a povrch směsi se pečlivě zarovná hladítkem s okraji moždíře. Pokud vlivem hrubých částic vznikne v urovnaném povrchu prohlubeň, zasype se tato jemným materiálem, který se vtlačí dovnitř a opět se pečlivě urovná hladítkem. Takto vyplněný moždír se společně se základní deskou zváží na laboratorních vahách s přesností na 5 g a zaznamená se hmotnost (m_2). Zhutněná směs se vyjme opatrně z moždíře a rozprostře se na očištěný a suchý laboratorní plech o známé hmotnosti (misku) ke stanovení vlhkosti sušením v sušárně. Plech s vlhkou směsí se zváží. Hmotnost samostatné vlhké navážky se vypočte odečtením hmotnosti plechu od celkové hmotnosti plechu s vlhkou navážkou. Laboratorní plech s vlhkou navážkou se vloží do laboratorní sušárny k vysušení při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a suší se do okamžiku, kdy se ustálí hmotnost navážky. Po vysušení se vysušená navážka s plechem zváží a tato hmotnost se zaznamená.

Získané výsledky vlhkosti jsou vyneseny do grafického vyjádření, ze kterého pak lze odečíst optimální vlhkost (w_{opt}) při maximální objemové hmotnosti ($\rho_{d,max}$). [45]

Objemová hmotnost vlhké směsi (ρ) se určí následovně ze vztahu:

$$\rho = [(m_2 - m_1) \cdot 1000] / V$$

kde ρ je objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m^3]

m_1 je hmotnost moždíře a základní desky [g]

m_2 je hmotnost moždíře, základní desky a zhutněné vlhké směsi [g]

V je objem moždíře [cm^3].

Vlhkost směsi je určena dle vztahu:

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

kde w je vlhkost směsi [%]

M_1 je hmotnost zkušební navážky [g]

M_2 je hmotnost suchého a čistého zkušebního plechu [g]

M_3 je ustálená hmotnost vysušené zkušební navážky [g].

Objemová hmotnost zhutněné suché směsi (ρ_d) se určí pomocí vztahu uvedeného níže:

$$\rho_d = (100 \cdot \rho) / (100 + w)$$

kde ρ_d je objemová hmotnost zhutněné suché směsi [kg/m^3]

ρ je objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m^3]

w je vlhkost směsi [%].

Výsledná maximální objemová hmotnost suché směsi ($\rho_{d,max}$) se zaokrouhlí na nejbližší $10 \text{ kg}/\text{m}^3$. Optimální vlhkost (w_{opt}) se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 % pro hodnoty menší než 10 a na nejbližší 1 % pro hodnoty 10 a vyšší. [45, 46]

3.3.3 Stanovení laboratorní objemové hmotnosti zkušebních těles

Stanovení laboratorní objemové hmotnosti zkušebních těles se provede podle platné normy ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa s tím, že se zkouška provede podle přílohy A1 a postupu D (objemová hmotnost podle rozměrů). Z pohledu TP 208 je tato norma pro účely těchto technických podmínek použitelná.

Pomůcky:

Posuvné měřítko, laboratorní váhy.

Postup zkoušky:

Objemová hmotnost zkušebního tělesa se stanoví z hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu. K výpočtu objemu je nutné znát rozměry vyrobených těles. Jednotlivé rozměry zhotovených válcových těles se určí podle ČSN EN 12697-29 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. Měření výšky válcových těles se provede ve čtyřech bodech rovnoměrně od sebe vzdálených na obvodu každého zkušebního tělesa. Výška zkušebního tělesa je definována jako průměr ze čtyř měření a uvádí se s přesností 0,1 mm. Místa měření se na tělese zřetelně vyznačí. Co se týká průměru těles, tak ten se stanoví opět jako průměr ze šesti měření s přesností 0,1 mm, přičemž se provádí dvě měření ve směrech na sebe přibližně kolmých v horní, střední a spodní části zkušebního tělesa. Následně se stanoví hmotnost suchých válcových těles (m_1) pomocí laboratorních vah. [47, 48]

Objemová hmotnost podle rozměrů válcového zkušební tělesa ($\rho_{b,dim}$) se vypočítá s přesností na 0,001 Mg/m³ následovně:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^3$$

kde $\rho_{b,dim}$ je objemová hmotnost zkušební tělesa podle rozměrů [Mg/m³]

m_1 je hmotnost suchého zkušební tělesa [g]

h je výška zkušební tělesa [mm]

d je průměr zkušební tělesa [mm]. [47]

3.3.4 Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi

Pro zjištění maximální objemové hmotnosti směsi je použita norma ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Maximální objemová hmotnost se určí na dvou vzorcích zkouškou ve vodě podle ČSN EN 12697-5+A1 postup A (postup volumetrický). I když je výše uvedená norma primárně určena pro zkoušení horkých asfaltových směsí, je možno pro účely TP 208 pro recyklace za studena tuto zkušební metodu použít.

Pomůcky:

Laboratorní sušárna, laboratorní plech, laboratorní váhy, teploměr, destilovaná voda, pyknometr s těsně přiléhajícím nástavcem, vývěva s vakuometrem, míchátko, lopatka, trychtýř.

Postup zkoušky:

Prvotní úlohou při realizaci této zkoušky je vysušit základní materiál. Ten je tvořen v případě potřeb experimentu této diplomové práce smísenou směsí ze šterkodrti frakce 0/32 s R-materiálem frakce 0/11 v poměru 1:1. Potřebné množství takto smíchané směsi se získá ze souhrnného vzorku po homogenizaci kvartací a následně se vloží do laboratorní sušárny k vysušení při teplotě (50 ± 5) °C a to do té doby, dokud změna hmotnosti mezi dvěma váženími provedenými v intervalu nejméně 30 minut není menší než 0,1 % hmotnosti. Teplota v sušárně (50 °C) je oproti normové teplotě (110 °C) snížena z důvodu přítomnosti asfaltového recyklátu ve směsi, vysoká teplota by mohla zapříčinit spečení směsi. Vysušený zkušební vzorek se vyndá ze sušárny a nechá se temperovat na okolní teplotu.

Veškeré hmotnosti musí být stanoveny v gramech s přesností 0,1 g. Objem použitého pyknometru poté musí být stanoven v metrech kubických s přesností 0,5 · 10⁻⁶ m³.

Následně je nutno stanovit hmotnost prázdného pyknometru s nástavcem (m_1) o známém objemu (V_p). Vysušený vzorek zkušební směsi se poté nasype pomocí trychtýře do pyknometru a zjistí se celková hmotnost pyknometru, materiálu a nástavce (m_2). Následně se pyknometr naplní odvzdušněnou destilovanou vodou do výšky nejvýše 30 mm pod okraj hrdla pyknometru. Obsah pyknometru se promíchá z důvodu úniku co možná největšího množství vzduchových bublin ze směsi míchátkem (lze použít i vibrační stůl). Takto naplněný pyknometr se bez nástavce umístí následně do částečného vakua (zbytkový tlak ve vakuu je 4 kPa) na dobu (15 ± 1) min. Po odvzdušnění směsi se pyknometr vyjme z částečného vakua a umístí se do vodní lázně s rovnoměrnou zkušební teplotou (± 1 °C) na dobu nejméně 30 minut, nejdéle však 180 minut k vyrovnání teploty vzorku a vody v pyknometru s teplotou vody ve vodní lázni. Po skončení temperování se nasadí nástavec pyknometru a opatrně se dolije odvzdušněná voda až téměř po referenční značku nástavce tak, aby nedošlo k vniknutí vzduchu a s tím, že teplota vody k doplňování musí být totožná s teplotou vody zkušební vodní lázně. Takto doplněný pyknometr se vyjme z vodní lázně, osuší se a z vnější strany a stanoví se jeho hmotnost (m_3). [49]

Maximální objemová hmotnost se poté vypočte dle následujících matematických vztahů:

$$\rho_w = 1,00016584 + \left(\frac{7,93 \cdot t - 5,29 \cdot t^2}{1\,000\,000} \right)$$

kde ρ_w je hustota vody [Mg/m³]

t je teplota vody [°C]

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

kde ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost směsi stanovená volumetrickým způsobem [Mg/m³]

m_1 je hmotnost pyknometru a nástavce [g]

m_2 je hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g]

m_3 je hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody [g]

V_p je objem pyknometru při naplnění po referenční značku [m³]

ρ_w je hustota vody [Mg/m³].

Maximální objemová hmotnost (ρ_{mv}) stanovená volumetrickým způsobem se vypočítá s přesností 0,001 Mg/m³. [49]

3.3.5 Stanovení mezerovitosti

Mezerovitost nám udává podíl objemu mezer mezi zrny k celkovému objemu kameniva. Výpočet mezerovitosti se provede dle vzorce uvedeného v TP 208 - Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena.

Zmíněný matematický vztah je uveden níže:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m} \cdot 100\%$$

kde V_m je mezerovitost směsi zkušební tělesa [%]

ρ_m je maximální objemová hmotnost směsi [Mg/m^3]

ρ je objemová hmotnost zkušební tělesa [Mg/m^3]. [5]

3.3.6 Stanovení skutečné vlhkosti směsi sušením v sušárně

Stanovení reálné vlhkosti vyrobené směsi se provede podle postupu uvedeného v normě ČSN EN 1097-5 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně. Podstatou zkoušky je zjištění celkového množství přítomné vody ve směsi šterkodrti s asfaltovým R-materiálem. Voda může být ve směsi přítomna jak na povrchu, tak v pórech zrn kameniva, potažmo recyklátu. Celkový obsah přítomné vody se stanoví jako rozdíl hmotnosti mezi vlhkým a suchým vzorkem a výsledek se vyjádří v procentech hmotnosti vysušené navážky.

Pomůcky:

Laboratorní plech, laboratorní váhy, laboratorní sušárna Binder, špachtle, kulatý štětec.

Postup zkoušky:

Suchý a očištěný zkušební plech se zváží a zaznamená se jeho hmotnost (M_2). Vyrobená zkušební směs dle výše uvedených receptur se rozprostře na zkušební plech a následným odečtením hmotnosti prázdného zkušební plechu se zjistí hmotnost vlhké zkušební navážky (M_1). Plech se zkušební navážkou se poté vloží do sušárny o teplotě $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ a navážka se suší až do ustálení její hmotnosti. Vysušená směs s plechem se poté nechá vychladnout, zváží se a zaznamená se hmotnost vysušené navážky odečtením hmotnosti plechu (M_3). [46]

Výsledná vlhkost směsi (w) se poté vypočte z následujícího vztahu:

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

kde w je výsledná vlhkost směsi [%]

M_1 je hmotnost zkušební navážky [g]

M_2 je hmotnost suchého a čistého zkušební plechu [g]

M_3 je ustálená hmotnost vysušené zkušební navážky [g].

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 %. [46]

3.3.7 Stanovení pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě

Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickými pojivy se provádí dle ČSN EN 13286-42 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickými pojivy. Dle technických podmínek TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena se pevnost v příčném tahu zjišťuje ve dvou časových intervalech. První série zkoušek se provede na tělesech starých 7 dní od vyrobení a umístěných na vzduchu. Druhá série se realizuje na tělesech starých 14 dní od zhotovení, přičemž jsou prvních 7 dní uložena na vzduchu a následujících 7 dní ve vodě. Pro lepší interpretaci výsledků a vztahy mezi nimi byly zkoušky pevnosti v příčném tahu provedeny ještě navíc na tělesech starých 28, respektive 56 dní od jejich vyrobení (tvrdnutí těchto těles probíhala pouze na vzduchu ve stinné místnosti o teplotě okolo 20 °C).

Pomůcky:

Zkušební lis, tlačné pásky, laboratorní váhy, posuvné měřítko.

Postup zkoušky:

Před samotnou zkouškou pevnosti v příčném tahu je nutno zkušební tělesa nechat temperovat na vzduchu po dobu 4 hodin při teplotě 15 ± 1 °C a následně stanovit rozměry zkušebních těles pomocí posuvného měřítka, kdy se měří průměrná výška (průměr ze 4 měření) a průměr tělesa d s přesností $\pm 0,25$ mm. Zkušební těleso má mít výšku 125 ± 20 mm. Prostřednictvím digitální váhy se stanoví hmotnost jednotlivých těles s přesností ± 1 g. Před uložení zkušební tělesa do lisu je nutno zajistit čistotu povrchu tělesa a tlačných desek. Zkušební těleso a tlačné pásky musí být umístěny ve středu tlačných desek s přesností 1 mm. Zkušební lis se nastaví tak, aby došlo ke kontaktu lisu společně

se zkušební tělesem. Po pečlivém uložení zkušební tělesa do lisu se nastaví konstantní rychlost zatěžování, nejvýše 0,2 MPa/s. Při porušení zkušební tělesa se zkouška ukončí a zaznamená se maximální síla (F). Zdeformované těleso se vyjme ze zkušební lisu a zkontroluje se, zda nedošlo k nevyhovujícímu porušení. Výsledná pevnost v příčném tahu se vypočte podle vztahu:

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD}$$

kde R_{it} je pevnost v příčném tahu [MPa]

F je maximální zatěžovací síla při porušení zkušební tělesa [N]

H je výška zkušební tělesa [mm]

D je průměr zkušební tělesa [mm].

Výsledná pevnost v příčném tahu se zaokrouhlí na nejbližší 0,01 MPa. [5, 50]

Pro stanovení poklesu pevnosti v příčném tahu platí vzorec následující:

$$R = \frac{R_{it}}{R_w} \cdot 100\%$$

kde R_{it} je pevnost v příčném tahu po 7 dnech [MPa]

R_w je pevnost v příčném tahu (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě) [MPa]

R je pokles pevnosti v příčném tahu [%]. [5]

3.3.8 Stanovení modulu tuhosti

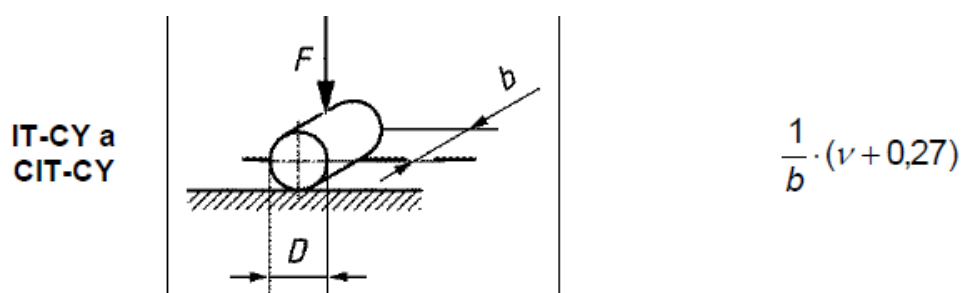
Pro potřeby experimentu provedeného v této diplomové práci je stanovení modulu tuhosti asfaltových zkušebních těles provedeno dle platné normy ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost, přílohy C - Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY). Jedná se o nedestruktivní opakované namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech. Zkušební tělesa jsou vyrobena stejným způsobem, jak je tomu u těles vyhotovených pro potřeby zkoušek pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě, tedy dle postupu uvedeném v technických podmínkách TP 208 pro recyklace za studena s tím rozdílem, že je jejich výsledný tvar po vytvrnutí upraven pro potřeby experimentu stanovení modulu tuhosti dle výše uvedené normy a přílohy.

Pomůcky:

Upínací zařízení, pila, zkušební zařízení, PC s odpovídajícím softwarem, posuvné měřítko, zkušební univerzální dynamický tester.

Postup zkoušky:

Před zahájením zkoušky musí být zkušební tělesa mezi 14 dny a 28 nebo 56 dny od doby jejich výroby skladovány na rovném povrchu při teplotě nejvýše 20 °C. Tělesa musí být vysušena do konstantní hmotnosti na vzduchu při relativní vlhkosti vzduchu nižší než 80 % při teplotě maximálně do 20 °C. Objemová hmotnost musí být určena v souladu s ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení maximální objemové hmotnosti zkušebního tělesa. Ke stanovení modulu tuhosti jsou zkoušena minimálně 4 zkušební tělesa. Modul tuhosti zkoušené směsi se stanoví z průměru těchto výsledků.



Obrázek 22 - Zatěžovací schéma zkoušky modulu tuhosti

Zdroj: [51]

Pro potřeby zkoušky stanovení modulu tuhosti je nutno upravit tělesa do požadovaného tvaru. Rozměry válcových zkušebních těles jsou závislé na výskytu maximální velikosti zrn kameniva ve směsi. Požadované rozměry zkušebních těles jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 22 - Požadované rozměry zkušebních těles pro stanovení modulu tuhosti

Maximální velikost zrna kameniva mm	Průměr zkušebního tělesa mm	Výška zkušebního tělesa mm
≤ 16	100 ± 3 150 ± 3	40 až 60 ± 2
> 16 a < 32	150 ± 3	60 ± 2
≥ 32	150 ± 3	90 ± 2

Zdroj: [51]

Tloušťky jednotlivých zkušebních těles se stanoví dle ČSN EN 12697-29 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. Pomocí značkovače se naznačí a označí na rovný povrch tělesa 2 průměry (přibližně vzájemně na sebe kolmé).

Jakmile dosáhne zkušební těleso požadované teploty, umístí se do zkušební polohy s jedním z označených průměrů ve svislém směru. Je nutné dbát na precizní uchycení snímačů na těleso. Použije se minimálně 10 kontrolních zatěžovacích pulzů tak, aby se nastavilo zkušební zařízení na velikost zatížení a dobu pulzu. Následně se vyvodí dalších 5 zatěžovacích pulzů na zkušební válec a při každém pulzu se zaznamená průběh vyvolaného zatížení v čase společně s horizontální deformací zkušebního tělesa. Modul tuhosti se vypočítá dle níže uvedeného vztahu:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

kde E je modul tuhosti [MPa]

z je amplituda pružné horizontální deformace [mm]

F je zatěžovací síla [N]

h je průměrná výška zkušebního tělesa [mm]

v je Poissonovo číslo [-]. [51]

Zkušební tělesa se vyjmou ze zkušebního zařízení, otočí se přibližně o 90° kolem svislé osy a znovu se osadí pro zkoušení a celý zkušební postup se následně opakuje dle výše uvedeného postupu. Pro každé zkušební těleso je výsledkem průměr měření modulu tuhosti v obou směrech, přičemž pro celou sadu zkušebních těles jedné směsi norma stanoví přípustné odchylky od průměru. Moduly tuhosti byly pro potřeby experimentu této diplomové práce měřeny na zkušebních tělesech ve třech teplotních škálách (0 °C; 15 °C; 27 °C). [51]

3.3.9 Šíření trhliny zkouškou ohybem

Pro tento typ zkoušky je použita platná norma ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese. Podstatou zkoušky je zatížení zkušebního půlválcového tělesa s drážkou umístěnou ve středu půlválcové podstavy trojbodovým ohybem s tím, že spodní líc tělesa je vystaven tahovému napětí. V průběhu zkoušení se zvyšuje deformace při konstantním zatěžování. Odpovídající zatížení se zvyšuje až na maximální hodnotu (F_{max}), která je přímo vztažena k odolnosti tělesa proti lomu, označována též jako lomová houževnatost. [52]

Pomůcky:

Posuvné měřítko, klimatizační komora, pila, zkušební přístroj.

Postup zkoušky:

Válcová zkušební tělesa se upraví na odpovídající rozměry, průměr zkušební tělesa má být (150 ± 1) mm a tloušťka (50 ± 3) mm. Válcové těleso se poté rozřízne na poloviny v místě jejich průměru. Uprostřed líce půlválcové podstavy se vyhotoví vhodným řezacím nástrojem drážka o stanovených rozměrech, šířce $(0,35 \pm 0,10)$ mm a hloubce $(10,0 \pm 1,0)$ mm. Před zkoušením musí být stanoveny rozměry zkušebních těles (průměr, výška, tloušťka, hloubka drážky). Pokud jsou tělesa zkoušena při různých teplotách, musí být uložena v klimatické komoře při dané teplotě po dobu nejméně 4 hodin. Temperované zkušební těleso se vyjme z klimatizační komory a vloží se do středu zkušebního zařízení a navíc tak, aby se těleso dotýkalo horního zatěžovacího pásku. Nastaví se počáteční deformace na nulu a aplikuje se přiměřené zatížení na zkušební těleso tak, aby bylo dosaženo rychlosti deformace 5,0 mm/min. Na základě konzultace s katedrou silničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze byla tato rychlost upravena na 2,5 mm/min. Tuto úpravu aplikuje ČVUT v Praze již několik let z důvodu zajištění lepšího záznamu hodnot deformace a síly při dané deformaci. Zaznamená se síla s přesností na 1 N a svislý posun s přesností na 0,1 mm. [52]

Po provedeném experimentu se vypočtou následující veličiny:

Přetvoření (ε_{max}) při maximální síle:

$$\varepsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \cdot 100 \%$$

kde $\varepsilon_{max,i}$ je přetvoření při maximální síle [%]

W_i je výška zkušební tělesa [mm]

ΔW_i je svislý posun i při maximální síle [mm].

Maximální napětí při porušení (σ_{max}):

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 \cdot F_{max,i}}{D_i \cdot t_i}$$

kde D_i je průměr zkušební tělesa [mm]

t_i je tloušťka zkušební tělesa [mm]

$F_{max,i}$ je maximální síla zkušební tělesa [N].

Odolnost vůči lomu ($K_{lc,i}$) zkušebního tělesa:

$$K_{lc,i} = \sigma_{max,i} \cdot f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$$

kde W_i je výška zkušebního tělesa [mm]

a_i je hloubka drážky zkušebního tělesa [mm]

$\sigma_{max,i}$ je maximální napětí při porušení zkušebního tělesa [N/mm²]

$f(a_i/W_i)$ je geometrický faktor zkušebního tělesa [-].

Odolnost materiálu vůči lomu (K_{lc}) [N/mm^{3/2}]:

$$K_{lc} = \frac{\sum_{i=1}^4 K_{lc,i}}{4}$$

Zdroj: [52]

Na základě zkušeností a spolupráce s katedrou silničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze zkouška nebyla prováděna jen do dosažení maximální síly, nýbrž i po odtěžovací fázi vlastní zkoušky. Při dosažení maximální síly se vlastní trhliny iniciuje, což je důležitá informace, nikoli však ucelená. Pokud test pokračuje, dochází k postupné propagaci trhliny, přičemž opět ze zkušenosti dlouhodobých výzkumů se na ČVUT jako mezní hodnota síly stanovilo 0,3 kN. Při dosažení této síly na poklesové části křivky pracovního diagramu je zkouška ukončena. Takto získaná data umožňují vedle normou požadovaných hodnot (viz výše) určit též další charakteristiky jako ne např. lomová energie do maximální síly nebo pro celý průběh zkoušky. Pomocí těchto hodnot lze mnohem lépe interpretovat chování kompozitní směsi. Dále doplňuji, že hodnoty byly v této diplomové práci spočteny podle verze normy platné od roku 2010, ačkoli v září 2019 by měla vyjít revidovaná verze normy, kde se některé výpočty upravují. Tato změna však již není v práci promítnuta.

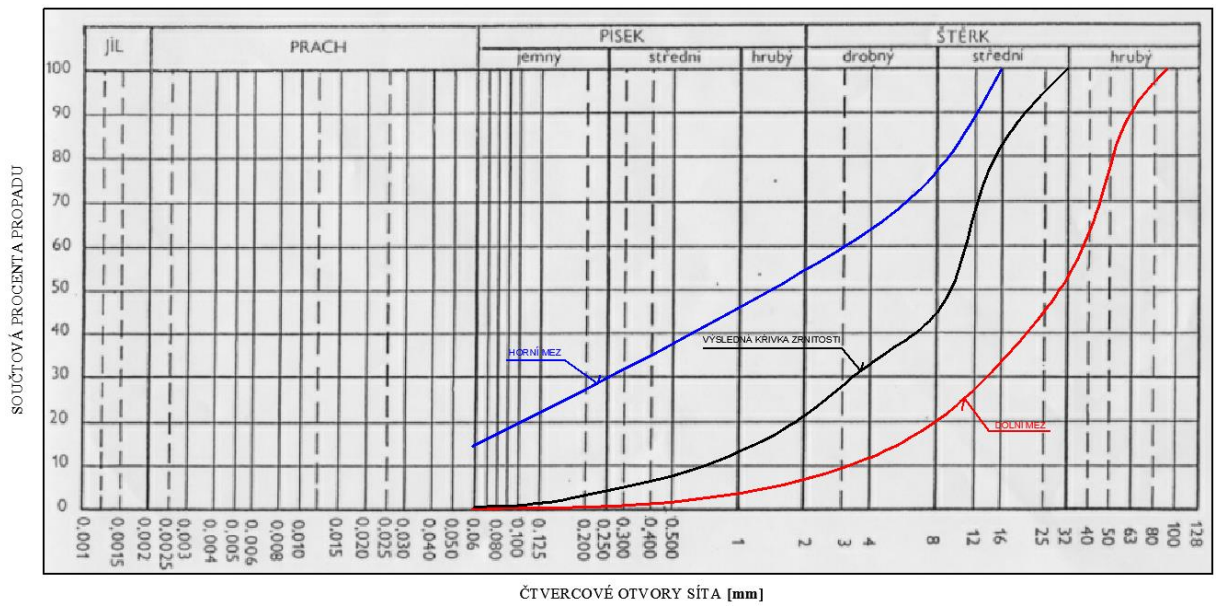
4 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH MĚŘENÍ

4.1 Sítový rozbor

Tabulka 23 - Výsledky zkoušky sítového rozboru

Název zkoušky:		Sítový rozbor								
Identifikace zkušební vzorku:		Plnivo všech směsí (50 % ŠD _A 0/32 + 50 % R-materiál 0/11)								
Frakce zkušební směsi:		0/32								
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Kolín								
Datum provedení:		3. 5. 2019								
Vypracoval:		Bc. Martin Živný								
Velikost sít [mm]	Hmotnost materiálu zachyceného na sítích [g]							Celková hmotnost zachycených zrn [g]	Zbytek na sítích [%]	Celkový propad zrn [%]
	Rozbor 1	Rozbor 2	Rozbor 3	Rozbor 4	Rozbor 5	Rozbor 6	Rozbor 7			
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
22	145,86	163,25	141,58	149,24	165,75	143,82	156,87	1 066,37	10,55	89,45
16	112,62	135,68	120,70	125,37	108,87	98,74	132,84	834,82	8,26	81,19
11,8	215,51	208,79	186,39	156,93	178,31	164,39	184,34	1 294,66	12,81	68,37
8	186,98	222,33	197,22	212,54	237,84	184,22	189,46	1 430,59	14,16	54,22
5,6	151,22	117,68	189,86	187,03	176,20	167,12	154,28	1 143,39	11,32	42,90
4	122,47	133,63	131,94	138,12	183,35	148,76	118,27	976,54	9,66	33,24
2	188,91	183,65	155,64	193,67	167,41	152,35	172,52	1 214,15	12,02	21,22
1	188,65	161,10	97,82	116,74	99,36	119,63	91,08	874,38	8,65	12,57
0,5	85,53	76,69	63,47	47,88	84,23	68,41	71,06	497,27	4,92	7,65
0,25	63,74	51,53	36,25	50,01	64,49	49,60	55,80	371,42	3,68	3,97
0,125	41,52	37,17	15,84	22,46	28,98	41,08	33,39	220,44	2,18	1,79
0,063	33,38	25,68	16,72	18,95	17,71	24,83	18,75	156,02	1,54	0,25
< 0,063	2,89	4,05	2,98	3,36	4,02	4,43	3,25	24,98	0,25	0,00
Celkem	1539,28	1521,23	1356,41	1422,30	1516,52	1367,38	1381,91	10105,03	100,00	

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 23 – Výsledná křivka zrnitosti

Zdroj: [vlastní]

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{3,5^2}{0,75 \cdot 11} = 1,48$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{11}{0,75} = 14,7$$

Závěr:

Křivka je středně zrněná, její průběh lze považovat za plynulý a nechybí jí významně žádná frakce. Křivka se bez problémů vešla do mezí zrnitosti, které předepisují technické podmínky TP 208.

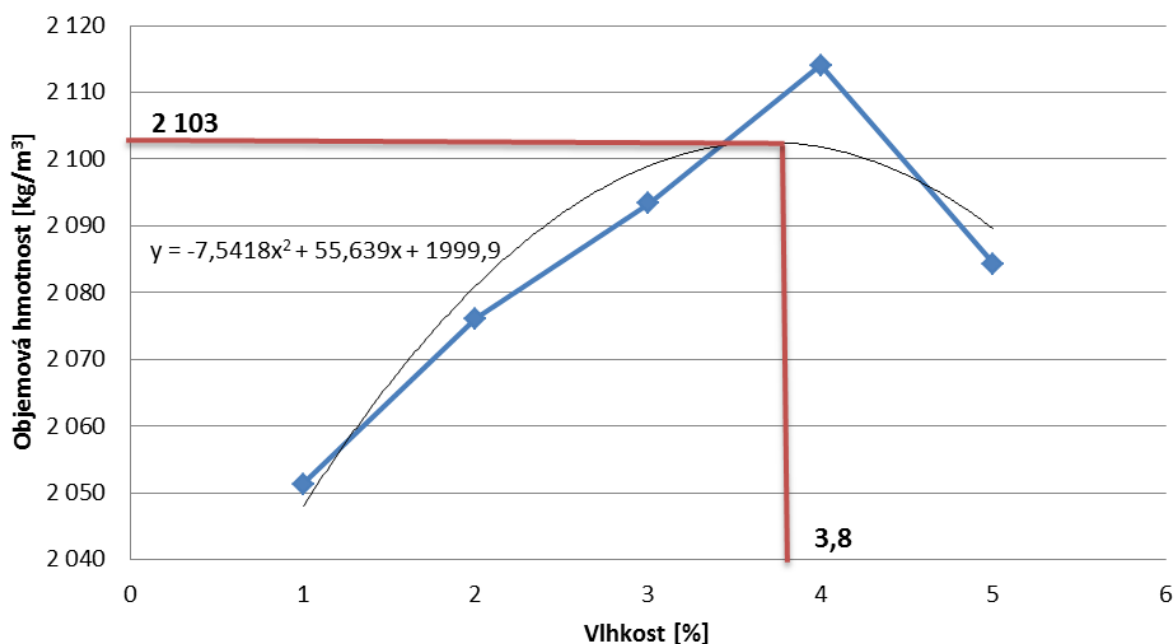
4.2 Suchá laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost

Tabulka 24 - Proctorova zkouška plniva (ŠD_A + R-materiál)

Název zkoušky:		Proctorova zkouška				
Identifikace zkušebního vzorku:		50 % ŠD _A 0/32 + 50 % R-materiál 0/11				
Datum provedení:		3.5.2019				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
Zkouška č.	Jednotky	1	2	3	4	5
Objem moždíře	[cm ³]	2 120,6	2 120,6	2 120,6	2 120,6	2 120,6
Hmotnost moždíře	[g]	10 222,3	10 222,3	10 222,3	10 222,3	10 222,3
Hmotnost moždíře se směsí	[g]	14 725,4	14 765,8	14 846,5	15 036,0	15 025,0
Hmotnost vlhké směsi	[g]	4 503,1	4 543,5	4 624,2	4 813,7	4 802,7
Objemová hmotnost vlhké směsi	[kg/m ³]	2 123,5	2 142,6	2 180,6	2 270,0	2 264,8
Hmotnost misky + vlhké směsi	[g]	5 473,5	5 572,1	5 678,9	5 838,3	5 758,1
Hmotnost misky + suché směsi	[g]	5 380,1	5 432,6	5 500,2	5 555,1	5 450,0
Hmotnost misky	[g]	1 030,0	1 030,0	1 061,0	1 072,0	1 030,0
Hmotnost suché směsi	[g]	4 350,1	4 402,6	4 439,2	4 483,1	4 420,0
Hmotnost vody	[g]	93,4	139,5	178,7	283,2	308,1
Vlhkost směsi	[g]	3,5	3,2	4,2	7,4	8,7
Objemová hmotnost suché směsi	[kg/m ³]	2 051,4	2 076,1	2 093,4	2 114,1	2 084,3
Optimální vlhkost	[%]	3,8				
Maximální objemová hmotnost	[kg/m³]	2 103				

Zdroj: [vlastní]

Graf 1 - Proctorův graf (ŠD_A + R-materiál)



Zdroj: [vlastní]



Obrázek 24 - Proctorova zkouška

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Ze získaného výsledku provedené Proctorovy zkoušky vyplývá, že optimální vlhkost navržených směsí by se měla orientačně pohybovat kolem 4 %. Tato skutečnost byla brána v úvahu při výrobě jednotlivých receptur, kde výsledek Proctorovy zkoušky posloužil jako dobré vodítko k odhadu potřebného množství vody při mísení směsí k dosažení optimální vlhkosti.

4.3 Laboratorní objemová hmotnost zkušebních těles

Pro přesnější dosažené výsledky byl počet vyhotovených zkoušek na dílčích vzorcích zvýšen z původního počtu dvou (2) na šest (6), přičemž se laboratorní objemová hmotnost vypočítala u každé navržené receptury zvlášť.

Tabulka 25 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs REF

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		REF (3,0 % AE, 3,0 % CEM)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		11. 5. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	I	II	III	IV	V	VI
h₁ [mm]	120,75	120,25	121,75	121,50	122,25	121,75
h₂ [mm]	120,25	123,00	122,75	121,50	122,75	120,75
h₃ [mm]	121,25	122,50	123,00	121,75	122,50	123,00
h₄ [mm]	120,50	121,75	124,00	122,25	121,75	124,50
Ø h [mm]	120,69	121,88	122,88	121,75	122,31	122,50
d₁ [mm]	150,25	150,00	150,75	150,50	150,25	151,00
d₂ [mm]	150,00	150,00	150,50	150,50	150,00	151,25
d₃ [mm]	150,25	150,00	151,00	150,50	150,50	151,00
d₄ [mm]	150,50	150,25	150,75	150,75	150,25	150,50
d₅ [mm]	150,25	150,00	150,75	150,25	150,50	151,00
d₆ [mm]	150,50	149,50	151,00	150,25	150,00	151,25
Ø d [mm]	150,29	149,96	150,79	150,46	150,25	151,00
m [g]	4 936	4 944	4 977	4 960	4 976	4 976
V [m³]	0,0021410	0,0021525	0,0021944	0,0021647	0,0021687	0,0021937
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 305,44	2 296,85	2 268,09	2 291,34	2 294,51	2 268,30
Objemová hmotnost těles vyhotovených z referenční směsi [kg/m³]:						2 287,42

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 25 - Stanovení rozměrů zkušebních těles posuvným měřítkem

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 26 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs A

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs A (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-PT)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		16. 5. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	A I	A II	A III	A IV	A V	A VI
h₁ [mm]	121,00	120,50	121,00	122,00	122,50	121,25
h₂ [mm]	120,75	120,75	121,50	121,50	122,50	120,25
h₃ [mm]	121,00	120,75	121,75	121,25	122,50	120,75
h₄ [mm]	120,75	120,50	122,75	121,00	122,25	121,25
Ø h [mm]	120,88	120,63	121,75	121,44	122,44	120,88
d₁ [mm]	151,00	151,25	151,50	150,75	150,25	151,00
d₂ [mm]	150,50	150,75	150,75	150,25	150,00	151,25
d₃ [mm]	150,75	150,75	151,00	150,50	150,50	151,25
d₄ [mm]	150,50	150,25	151,00	150,75	150,25	150,75
d₅ [mm]	151,00	150,50	150,75	150,50	150,50	150,50
d₆ [mm]	150,75	151,00	151,25	150,25	150,25	150,75
Ø d [mm]	150,75	150,75	151,04	150,50	150,29	150,92
m [g]	4 971	4 970	4 975	4 976	4 984	4 957
V [m³]	0,0021575	0,0021530	0,0021815	0,0021603	0,0021721	0,0021622
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 304,11	2 308,42	2 280,56	2 303,38	2 294,58	2 292,55
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi A [kg/m³]:						2 297,26

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 27 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs B

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs B (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-KVP)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		17. 5. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	B I	B II	B III	B IV	B V	B VI
h₁ [mm]	121,75	121,25	121,25	121,50	120,75	122,00
h₂ [mm]	122,25	121,75	121,25	121,25	122,00	122,00
h₃ [mm]	122,50	122,25	121,75	122,00	120,00	122,00
h₄ [mm]	122,00	122,00	122,00	122,00	120,50	122,25
Ø h [mm]	122,13	121,81	121,56	121,69	120,81	122,06
d₁ [mm]	150,75	150,25	150,00	150,50	150,00	150,25
d₂ [mm]	150,50	150,25	150,25	150,75	150,50	150,75
d₃ [mm]	150,50	150,50	150,50	151,00	150,25	150,50
d₄ [mm]	151,00	150,25	150,50	150,75	150,00	150,75
d₅ [mm]	150,75	150,50	150,25	150,50	150,25	150,70
d₆ [mm]	150,50	150,00	150,00	150,75	150,25	151,00
Ø d [mm]	150,67	150,29	150,25	150,71	150,21	150,66
m [g]	4 977	4 987	4 957	4 976	4 969	4 975
V [m³]	0,0021774	0,0021610	0,0021554	0,0021708	0,0021409	0,0021760
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 285,80	2 307,75	2 299,85	2 292,29	2 321,02	2 286,31
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi B [kg/m³]:						2 298,84

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 28 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs C

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs C (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		24. 5. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	C I	C II	C III	C IV	C V	C VI
h₁ [mm]	120,25	120,25	121,75	123,25	122,25	122,50
h₂ [mm]	120,00	120,75	123,50	122,50	120,00	123,00
h₃ [mm]	120,00	121,00	123,50	122,00	120,50	122,50
h₄ [mm]	120,25	120,75	122,50	122,50	121,50	123,00
Ø h [mm]	120,13	120,69	122,81	122,56	121,06	122,75
d₁ [mm]	150,75	151,25	151,00	149,75	150,00	150,75
d₂ [mm]	150,50	151,00	150,75	150,25	150,50	150,50
d₃ [mm]	151,00	150,75	150,50	150,25	150,25	150,50
d₄ [mm]	150,75	151,00	150,75	150,00	150,25	151,00
d₅ [mm]	150,50	150,75	151,00	149,75	150,00	150,75
d₆ [mm]	150,75	150,75	151,00	150,25	150,25	151,00
Ø d [mm]	150,71	150,92	150,83	150,04	150,21	150,75
m [g]	4 961	4 984	4 974	4 980	4 978	4 987
V [m³]	0,0021429	0,0021589	0,0021945	0,0021671	0,0021453	0,0021909
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 315,11	2 308,61	2 266,62	2 298,04	2 320,42	2 276,22
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi C [kg/m³]:						2 297,50

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 29 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs D

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs D (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		25. 5. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	D I	D II	D III	D IV	D V	D VI
h₁ [mm]	120,50	120,00	121,50	122,00	120,00	119,50
h₂ [mm]	120,50	120,50	120,50	121,50	121,50	120,50
h₃ [mm]	120,00	121,00	121,25	120,00	121,00	120,50
h₄ [mm]	120,00	121,00	120,75	120,00	121,00	120,00
Ø h [mm]	120,25	120,63	121,00	120,88	120,88	120,13
d₁ [mm]	150,25	151,00	150,00	150,75	151,50	151,25
d₂ [mm]	150,25	150,75	150,25	151,00	151,50	151,00
d₃ [mm]	150,50	151,00	150,25	150,75	151,25	150,75
d₄ [mm]	150,25	150,50	150,50	151,00	151,50	150,75
d₅ [mm]	150,50	150,75	150,50	151,25	151,00	150,75
d₆ [mm]	150,25	150,75	150,25	151,00	151,00	151,00
Ø d [mm]	150,33	150,79	150,29	150,96	151,29	150,92
m [g]	4 934	4 939	4 920	4 959	4 931	4 914
V [m³]	0,0021344	0,0021542	0,0021466	0,0021634	0,0021730	0,0021488
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 311,60	2 292,75	2 292,03	2 292,21	2 269,23	2 286,85
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi D [kg/m³]:						2 290,78

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 30 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs E

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs E (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 3,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		4. 7. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	E I	E II	E III	E IV	E V	E VI
h₁ [mm]	121,25	124,00	121,75	120,25	121,50	120,50
h₂ [mm]	122,50	123,50	120,75	120,00	120,00	120,75
h₃ [mm]	121,50	123,00	120,00	119,75	120,50	121,75
h₄ [mm]	122,75	123,00	120,25	120,25	121,50	122,00
Ø h [mm]	122,00	123,38	120,69	120,06	120,88	121,25
d₁ [mm]	151,50	150,75	150,75	151,00	150,75	151,50
d₂ [mm]	151,25	150,50	151,00	150,75	150,50	151,00
d₃ [mm]	151,25	151,00	150,75	150,50	151,00	151,00
d₄ [mm]	151,00	150,75	150,50	150,75	150,75	151,25
d₅ [mm]	151,25	150,50	150,25	151,00	150,50	151,25
d₆ [mm]	151,00	150,75	150,50	151,25	150,50	151,00
Ø d [mm]	151,21	150,71	150,63	150,88	150,67	151,17
m [g]	4 960	4 988	4 954	4 961	4 951	4 967
V [m³]	0,0021908	0,0022009	0,0021505	0,0021465	0,0021551	0,0021761
ρ_{b,dim} [kg/m³]	2 264,02	2 266,39	2 303,61	2 311,20	2 297,38	2 282,50
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi E [kg/m³]:						2 287,52

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 31 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs F

Název zkoušky:		Objemová hmotnost zkušebních těles				
Identifikace receptury:		Směs F (3,0 % AE; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Použitá zkušební metoda:		podle rozměrů				
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení:		5. 7. 2019				
Vypracoval:		Bc. Martin Živný				
	F I	F II	F III	F IV	F V	F VI
h₁ [mm]	120,25	119,75	120,00	120,00	120,50	121,00
h₂ [mm]	120,25	120,25	120,00	120,25	121,25	121,25
h₃ [mm]	119,75	119,75	120,25	119,75	120,50	120,25
h₄ [mm]	119,00	119,25	120,50	119,50	120,25	120,50
Ø h [mm]	119,81	119,75	120,19	119,88	120,63	120,75
d₁ [mm]	151,00	150,50	150,50	150,50	150,50	151,00
d₂ [mm]	151,25	150,25	150,75	150,50	150,75	151,50
d₃ [mm]	151,00	150,50	151,00	150,25	150,50	151,25
d₄ [mm]	150,75	150,50	150,75	150,50	150,25	151,00
d₅ [mm]	151,00	150,25	150,50	150,75	150,75	150,75
d₆ [mm]	151,25	150,50	150,50	150,75	151,00	150,75
Ø d [mm]	151,04	150,42	150,67	150,54	150,63	151,04
m [g]	4 893	4 885	4 920	4 899	4 938	4 944
V [m³]	0,0021468	0,0021279	0,0021428	0,0021337	0,0021494	0,0021636
ρ_{b, dim} [kg/m³]	2 279,24	2 295,66	2 296,05	2 296,02	2 297,36	2 285,11
Objemová hmotnost těles vyhotovených ze směsi F [kg/m³]:						2 291,57

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 32 - Objemové hmotnosti zkušebních těles - Celkový přehled výsledků

Sledované veličiny	Směs						
	REF	A	B	C	D	E	F
Aritm. průměr [kg/m³]	2 287,42	2 297,26	2 298,84	2 297,50	2 290,78	2 287,52	2 291,57
Maximální OH [kg/m³]	2 305,44	2 308,42	2 321,02	2 320,42	2 311,60	2 311,20	2 297,36
Minimální OH [kg/m³]	2 268,09	2 280,56	2 285,80	2 266,62	2 269,23	2 264,02	2 279,24
Sm. odchylka [kg/m³]	15,6117	10,1706	13,73	21,75	13,57	19,70	7,54

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Zkouška pro zjištění objemové hmotnosti ztvrdlých zkušebních válcových těles ověřila skutečnost, že samotný druh použitého hydraulického pojiva ve směsi má na celkovou objemovou hmotnost ztvrdlých těles minimální vliv. Naopak vliv značný na výslednou objemovou hmotnost vyztužených těles má zcela nepochybně druh a poměr mezi hlavními složkami plniva, šterkodrti s R-materiálem. Ale protože se vzájemný poměr mezi šterkodrti s asfaltovým R-materiálem v jednotlivých směsích nemění (1:1) a zůstávají konstantní i jejich návážky, vypočtené hodnoty objemových hmotností se díky tomuto faktu od sebe příliš neodlišují.

4.4 Maximální objemová hmotnost směsi

Tabulka 33 - *Výsledky zkoušky stanovení maximální objemové hmotnosti směsi*

Název zkoušky:		Maximální objemová hmotnost					
Identifikace zkušebního vzorku:		50 % ŠD _A 0/32 + 50 % R-materiál 0/11					
Použitá zkušební metoda:		Volumetricky					
Směrodatná odchylka:		$\sigma_R = 0,008 \text{ Mg/m}^3$					
Místo a datum provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Kolín, 3. 5. 2019					
Médium:		Voda		Vypracoval:		Bc. Martin Živný	
Č. vzorku	$\rho_w [\text{Mg/m}^3]$	$m_1 [\text{g}]$	$m_2 [\text{g}]$	$m_3 [\text{g}]$	$t [^\circ\text{C}]$	$V_p [\text{m}^3]$	$\rho_{mw} [\text{Mg/m}^3]$
1	0,000	703,9	2 398,2	4 257,8	25,0	0,002505	2,648
2	0,000	703,9	2 572,6	4 368,2	25,0	0,002505	2,654
Maximální objemová hmotnost $[\text{Mg/m}^3]$:							2,651

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 26 - *Temperování pyknometru ve vodní lázni*

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Maximální objemová hmotnost byla stanovena pro základní skelet všech zkušebních směsí, tedy R-materiál se šterkodrtí smíšených ve vzájemném hmotnostním poměru 1:1. Výsledek této zkoušky má informativní charakter pro celkový pohled na zkoušky prováděných v praxi při návrhu stmelových či nestmelových směsí pro opravy pozemních komunikací technologií recyklací za studena.

4.5 Mezerovitost

Tabulka 34 - *Výsledky zkoušky mezerovitosti*

Název zkoušky:		Mezerovitost zkušebních těles	
Identifikace zkušebního vzorku:		Všechny vyrobené směsi	
Použitá zkušební metoda:		matematická	
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové	
Datum provedení:		3. 5. 2019	
Vypracoval:		Bc. Martin Živný	
Směs	ρ_m [Mg/m ³]	ρ [Mg/m ³]	V_m [%]
REF	2,650863	2,287422	13,71
A	2,650863	2,297265	13,34
B	2,650863	2,298837	13,28
C	2,650863	2,297504	13,33
D	2,650863	2,290778	13,58
E	2,650863	2,287517	13,71
F	2,650863	2,291574	13,55

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Pro potřeby výpočtu mezerovitosti byly použity průměrné hodnoty objemových hmotností (OH zkušebních těles; max. OH). Z dosažených výsledků zkoušky mezerovitosti lze vyzdvihnout, že vliv druhu použitých pojiv (cement, strusky) na mezerovitost je minimální. Důvodem je neměnné složení plniva (ŠD, R-materiál) bez ohledu na to, o jakou zkušební směs se jedná a totožný postup výroby zkušebních těles. Průměrná (použit průměr aritmetický) hodnota mezerovitosti ze všech dosažených výsledků je 13,50 %.

4.6 Skutečná vlhkost směsí

Tabulka 35 - Výsledky zkoušky stanovení skutečné vlhkosti směsí

Název zkoušky:		Skutečná vlhkost směsí		
Identifikace zkušební vzorku:		50 % ŠD _A 0/32 + 50 % R-materiál 0/11		
Použitá zkušební metoda:		Sušení v sušárně		
Směrodatná odchylka:		-		
Místo provedení:		Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové		
Datum:	4. 5. - 28. 6. 2019	Vypracoval:	Bc. Martin Živný	
Směs	M ₁ [g]	M ₂ [g]	M ₃ [g]	w [%]
REF	2 773,0	1 016,0	2 665,0	3,9
A	3 291,6	980,0	3 160,3	4,0
B	3 300,0	1 018,0	3 175,0	3,8
C	2 936,0	1 016,0	2 811,0	4,3
D	3 481,0	1 017,0	3 305,0	5,1
E	4 878,0	1 059,0	4 667,0	4,3
F	4 633,0	1 093,0	4 391,5	5,2

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 27 - Sušení vyrobené stmelené směsí v laboratorní sušárně

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Zjištěné skutečné vlhkosti vyrobených směsí se blížily vlhkosti optimální, která byla stanovena Proctorovou modifikovanou zkouškou. Hodnoty reálných vlhkostí u směsí REF, A, B, C a E se pohybovaly kolem 4,0 %, tedy kolem hodnoty optima. Vyšší vlhkost byla stanovena u stmelěných směsí typu D a F, tedy u receptur, které obsahovaly pojivovou bázi

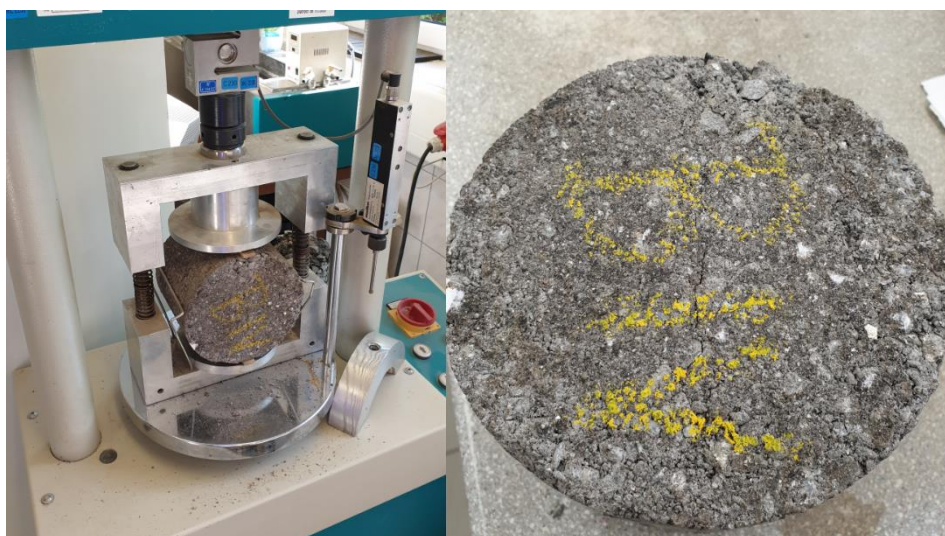
DASTIT® v navrhovaném množství 4,0 %. Přítomnost této popílkové pojivové báze ve stmelených směsích zapříčiní nutné zvýšení dávkovaného množství vody při výrobě směsí oproti směsím, které DASTIT® neobsahují.

4.7 Pevnost v příčném tahu a odolnosti proti vodě

Tabulka 36 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs REF

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						REF (3,0 % AE, 3,0 % CEM)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						11. 5. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						18. 5. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
I	120,75	120,25	121,25	120,50	120,69	150,25	13,50	0,474	-	-
II	120,25	123,00	122,50	121,75	121,88	150,00	14,60	0,508	-	-
III	121,75	122,75	123,00	124,00	122,88	150,75	13,20	0,454	-	-
IV	121,50	121,50	121,75	122,25	121,75	150,50	13,40	0,466	-	-
V	122,25	122,75	122,50	121,75	122,31	150,25	12,00	-	0,416	87,71
VI	121,75	120,75	123,00	124,50	122,50	151,00	12,00	-	0,413	81,23
VII	122,00	121,75	122,00	121,50	121,81	150,50	12,20	-	0,424	93,39
VIII	121,75	122,00	122,25	122,00	122,00	150,75	11,80	-	0,408	87,73
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs REF:								0,475	0,415	87,51

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 28 - Přístroj pro stanovení pevnosti v příčném tahu (vlevo); Porušené těleso po zkoušce v příčném tahu vyrobeného ze směsi B (vpravo)

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 37 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs A

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs A (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-PT)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						16. 5. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						23. 5. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
A I	121,00	120,75	121,00	120,75	120,88	151,00	9,90	0,3453	-	-
A II	120,50	120,75	120,75	120,50	120,63	151,25	9,70	0,3385	-	-
A III	121,00	121,50	121,75	122,75	121,75	151,50	9,50	0,3279	-	-
A IV	122,00	121,50	121,25	121,00	121,44	150,75	9,30	0,3234	-	-
A V	122,50	122,50	122,50	122,25	122,44	150,25	7,70	-	0,266	77,17
A VI	121,25	120,25	120,75	121,25	120,88	151,00	7,90	-	0,276	81,41
A VII	120,00	120,25	121,25	120,75	120,56	151,00	8,00	-	0,280	85,32
A VIII	121,25	121,25	121,00	121,00	121,13	151,00	7,80	-	0,271	83,95
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs A:								0,334	0,273	81,96

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 38 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs B

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs B (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-KVP)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						17. 5. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						24. 5. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
B I	121,75	122,25	122,50	122,00	122,13	150,75	8,30	0,2870	-	-
B II	121,25	121,75	122,25	122,00	121,81	150,25	8,30	0,2887	-	-
B III	121,25	121,25	121,75	122,00	121,56	150,00	9,40	0,3282	-	-
B IV	121,50	121,25	122,00	122,00	121,69	150,50	8,20	0,2850	-	-
B V	120,75	122,00	120,00	120,50	120,81	150,00	8,30	-	0,292	101,59
B VI	122,00	122,00	122,00	122,25	122,06	150,25	8,80	-	0,305	105,81
B VII	121,50	120,75	120,75	120,75	120,94	150,25	9,00	-	0,315	96,08
B VIII	121,50	122,00	0,33	122,25	121,88	150,75	8,40	-	0,291	102,11
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs B:								0,297	0,301	101,40

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 39 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs C

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs C (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						24. 5. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						31. 5. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
C I	120,25	120,00	120,00	120,25	120,13	150,75	10,10	0,3551	-	-
C II	120,25	120,75	121,00	120,75	120,69	151,25	9,60	0,3348	-	-
C III	121,75	123,50	123,50	122,50	122,81	151,00	10,60	0,3639	-	-
C IV	123,25	122,50	122,00	122,50	122,56	149,75	10,40	0,3607	-	-
C V	122,25	120,00	120,50	121,50	121,06	150,00	9,40	-	0,330	92,81
C VI	122,50	123,00	122,50	123,00	122,75	150,75	7,80	-	0,268	80,15
C VII	119,50	120,00	119,50	120,50	119,88	150,75	10,60	-	0,373	102,62
C VIII	121,75	121,50	121,50	121,25	121,50	150,00	9,10	-	0,318	88,12
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs C:								0,354	0,322	90,92

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 40 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs D

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs D (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						25. 5. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						1. 6. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
D I	120,50	120,50	120,00	120,00	120,25	150,25	12,90	0,4545	-	-
D II	120,00	120,50	121,00	121,00	120,63	151,00	11,60	0,4054	-	-
D III	121,50	120,50	121,25	120,75	121,00	150,00	13,00	0,4560	-	-
D IV	122,00	121,50	120,00	120,00	120,88	150,75	11,90	0,4158	-	-
D V	120,00	121,50	121,00	121,00	120,88	151,50	12,70	-	0,442	97,13
D VI	119,50	120,50	120,50	120,00	120,13	151,25	13,40	-	0,470	115,81
D VII	121,50	121,25	121,75	120,75	121,31	150,50	11,40	-	0,398	87,18
D VIII	121,00	120,75	121,25	121,50	121,13	151,00	11,60	-	0,404	97,12
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs D:								0,433	0,428	99,31

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 41 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs E

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs E (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 3,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						4. 7. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						11. 7. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
E I	121,25	122,50	121,50	122,75	122,00	151,50	10,00	0,3444	-	-
E II	124,00	123,50	123,00	123,00	123,38	150,75	9,00	0,3081	-	-
E III	121,75	120,75	120,00	120,25	120,69	150,75	11,70	0,4094	-	-
E IV	120,25	120,00	119,75	120,25	120,06	151,00	9,80	0,3441	-	-
E V	121,50	120,00	120,50	121,50	120,88	150,75	11,00	-	0,384	111,58
E VI	120,50	120,75	121,75	122,00	121,25	151,50	10,40	-	0,360	117,00
E VII	121,50	121,25	121,50	122,00	121,56	150,50	9,90	-	0,344	84,15
E VIII	121,00	121,50	121,25	121,25	121,38	150,25	11,50	-	0,401	116,66
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs E:								0,352	0,373	107,34

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 42 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs F

Název zkoušky:						Pevnost v příčném tahu				
Identifikace receptury:						Směs F (3,0 % AE; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT)				
Metoda zhuťování:						Ruční lis				
Místo provedení:						Laboratoř VIALAB CZ s.r.o., Hradec Králové				
Datum provedení (7 dní vzduch):						5. 7. 2019				
Datum provedení (7 dní vzduch + 7 dní voda):						12. 7. 2019				
Vypracoval:						Bc. Martin Živný				
Těleso	Výška [mm]					d [mm]	F [kN]	R _{it}	R _{it}	R [%]
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	Ø h			7 dní vzduch	7 dní vzduch + 7 dní voda	
F I	120,25	120,25	119,75	119,00	119,81	151,00	10,20	0,3589	-	-
F II	119,75	120,25	119,75	119,25	119,75	150,50	9,30	0,3285	-	-
F III	120,00	120,00	120,25	120,50	120,19	150,50	9,10	0,3203	-	-
F IV	120,00	120,25	119,75	119,50	119,88	150,50	9,70	0,3423	-	-
F V	120,50	121,25	120,50	120,25	120,63	150,50	10,30	-	0,361	100,63
F VI	121,00	121,25	120,25	120,50	120,75	151,00	10,90	-	0,381	115,85
F VII	122,25	122,25	121,75	121,75	122,00	150,25	9,30	-	0,323	100,85
F VIII	121,75	122,00	122,00	122,00	121,94	150,75	10,00	-	0,346	101,18
Průměrné hodnoty příčného tahu, odolnosti proti vodě a poklesu pevnosti - směs F:								0,337	0,353	104,63

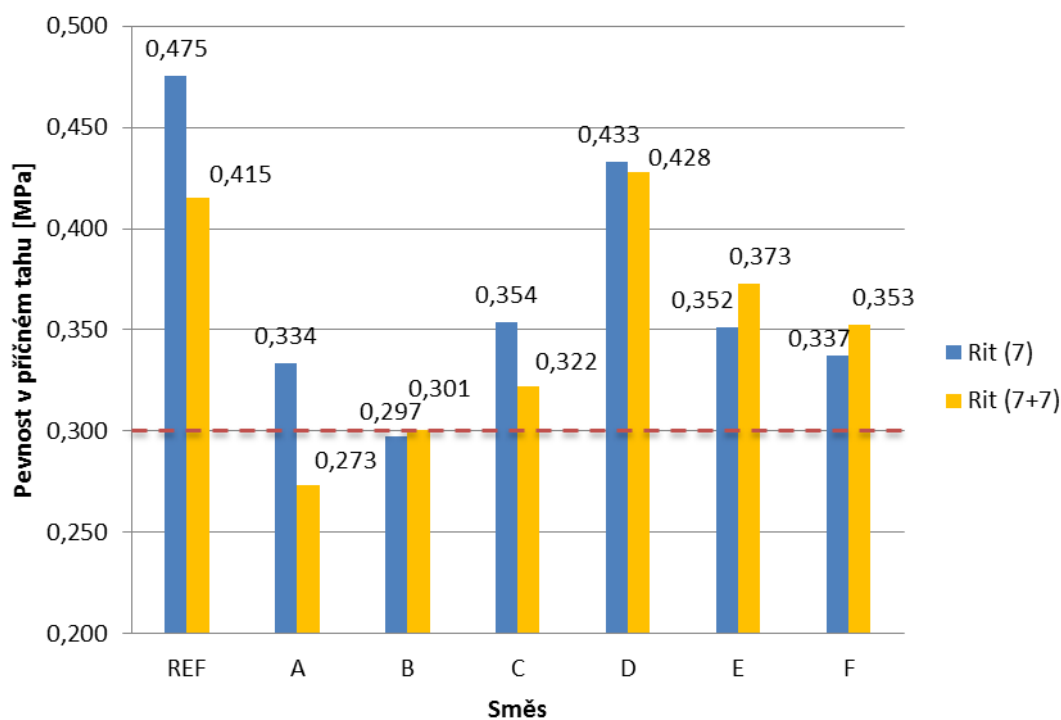
Zdroj: [vlastní]

Tabulka 43 - Výsledné pevnosti v příčném tahu (28; 56 dní) - všechny směsi

Název zkoušky:		Pevnost v příčném tahu					
Identifikace receptury:		Všechny vyrobené směsi					
Metoda zhutňování:		Ruční lis					
Místo provedení:		Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební					
Datum provedení:		1. 6. - 26. 7. 2019					
Vypracoval:		Bc. Martin Živný					
Směs	Těleso	Výška h [mm]	Průměr Ø [mm]	F [kN]	Stáří vzorku [dny]	R _{it} [MPa]	R _{it; průměr} [MPa]
REF	IX	60,80	151,00	16,90	28 dní	1,17	1,10
	X'	61,50	151,00	15,38		1,05	
	XI	61,90	151,00	15,62		1,06	
	XII	61,10	151,00	15,87		1,10	
	XIII	62,00	151,00	16,64	56 dní	1,13	1,15
	XIV'	61,60	151,00	17,06		1,17	
A	A-IX	61,80	151,00	9,08	28 dní	0,62	0,71
	A-X	62,30	151,00	10,82		0,73	
	A-XII	62,10	151,00	11,45		0,78	
	A-XII'	56,10	151,00	9,48		0,71	
	A-XIII	62,40	151,00	11,71	56 dní	0,79	0,86
	A-XIV'	60,50	151,00	13,19		0,92	
B	B-IX'	61,80	151,00	7,83	28 dní	0,53	0,62
	B-X	61,00	151,00	8,66		0,60	
	B-XI	62,30	151,00	10,35		0,70	
	B-XII'	60,40	151,00	9,05		0,63	
	B-XIII'	62,30	151,00	12,33	56 dní	0,83	0,81
	B-XIV'	61,00	151,00	11,40		0,79	
C	C-IX'	58,40	151,00	11,83	28 dní	0,85	0,80
	C-X	59,10	151,00	11,10		0,79	
	C-XI	60,60	151,00	12,08		0,84	
	C-XII'	61,90	151,00	10,43		0,71	
	C-XIII'	61,80	151,00	12,15	56 dní	0,83	0,81
	C-XIV'	62,00	151,00	11,55		0,79	
D	D-IX'	61,70	151,00	12,80	28 dní	0,87	0,91
	D-X	59,70	151,00	13,69		0,97	
	D-XI	61,70	151,00	11,92		0,81	
	D-XII'	59,80	151,00	13,88		0,98	
	D-XIII'	62,10	151,00	15,40	56 dní	1,05	1,05
	D-XIV'	62,20	151,00	15,64		1,06	
E	E-IX'	60,70	151,00	10,41	28 dní	0,72	0,83
	E-X'	61,40	151,00	12,95		0,89	
	E-XI'	59,30	151,00	13,07		0,93	
	E-XII	59,30	151,00	10,96		0,78	
F	F-IX'	60,90	151,00	12,39	28 dní	0,86	0,77
	F-X'	60,30	151,00	11,27		0,79	
	F-XI'	62,20	151,00	10,87		0,74	
	F-XII	60,50	151,00	10,22		0,71	

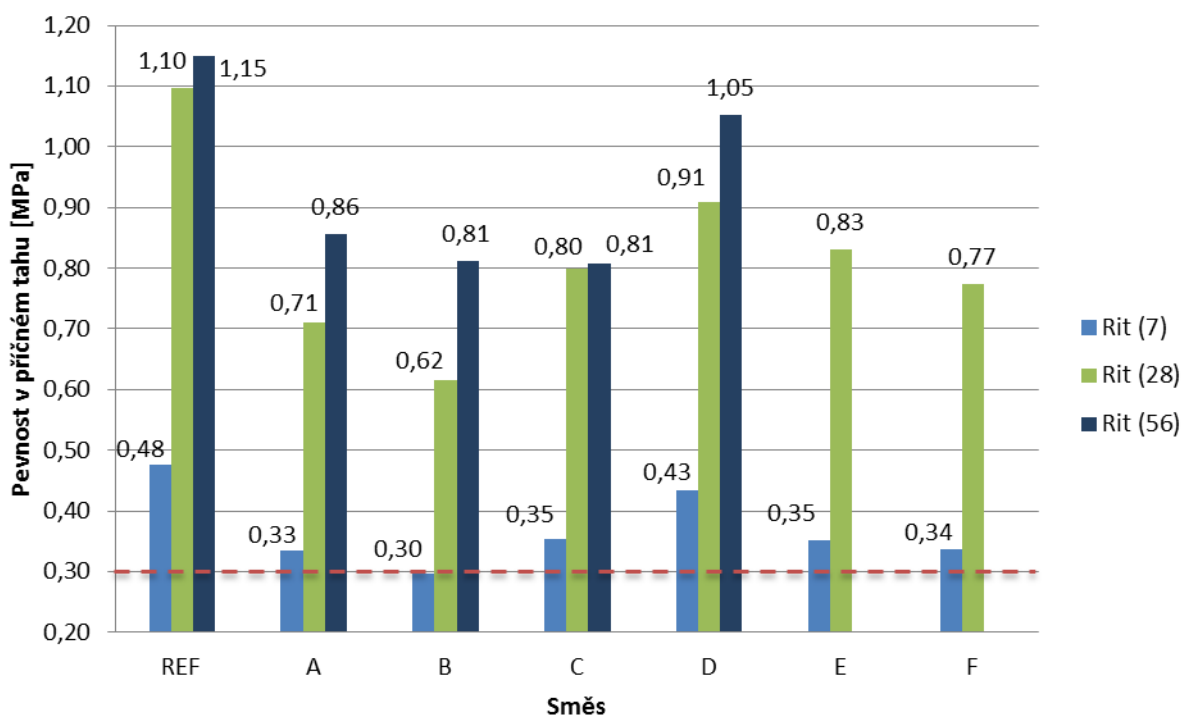
Zdroj: [vlastní]

Graf 2 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dni)



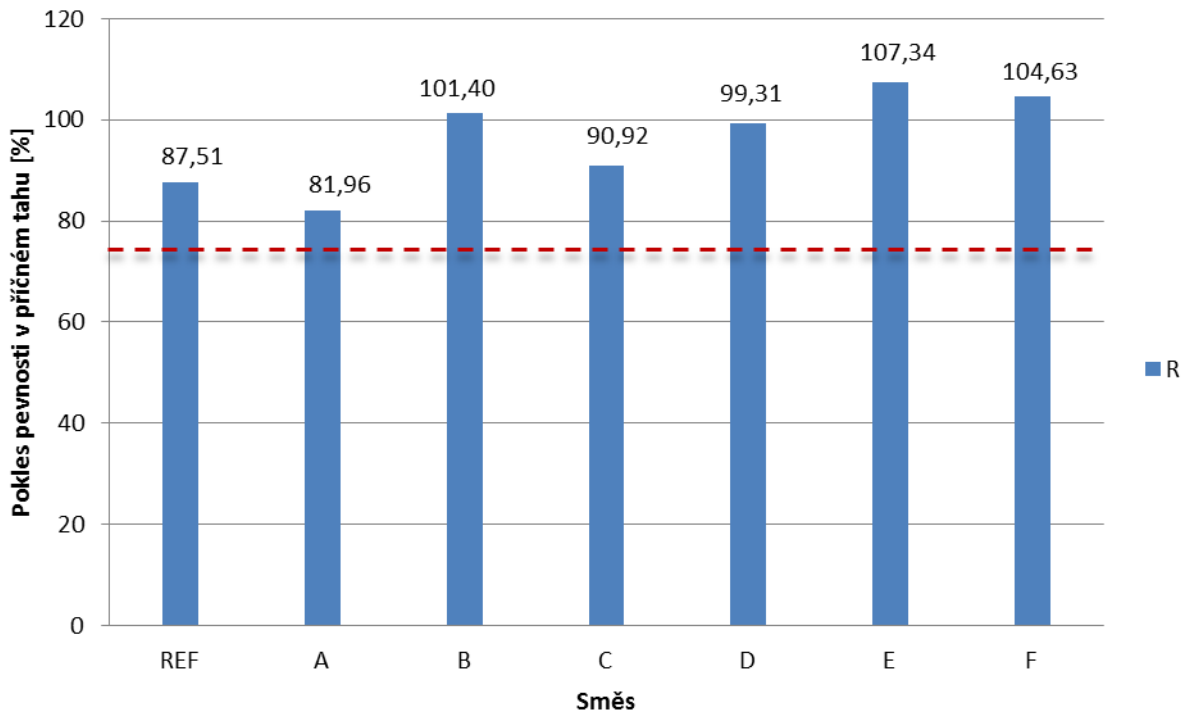
Zdroj: [vlastní]

Graf 3 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 28 a 56 dni)



Zdroj: [vlastní]

Graf 4 – Výsledky zkoušky odolnosti proti vodě (7 + 7 dní)



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Pevnosti v příčném tahu (7 dní na vzduchu) a odolnosti proti vodě (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě) se zjišťovaly na válcových tělesech o rozměrech, které definují technické podmínky TP 208 (průměr válce 150 mm, výška 120 mm). Dále se stanovily pevnosti v příčném tahu na tělesech starých 28, respektive 56 dní od jejich vyhotovení. Tato tělesa byla po celou dobu uchovávána na vzduchu ve stinné místnosti o teplotě cca 20 °C. Výška těchto těles skladovaných po delší dobu byla upravena, rozřízla se v polovině jejich výšky. Dále je třeba uvést, že v této práci nejsou uvedeny výsledky zkoušek pevnosti v příčném tahu, které byly stanoveny na tělesech starých 56 dní, a to u směsí E a F. Výsledky těchto pevností se stanovily bohužel až po odevzdání této diplomové práce.

Zkoušky v příčném tahu byly vyhodnocovány nejprve pro prvních pět zkušebních variant smíšených směsí (REF, A, B, C, D). Minimální hodnoty pevnosti v příčném tahu R_{it} definované technickými podmínkami TP 208 nebyly splněny u 2 zkušebních směsí, konkrétně u směsí A (0,273 MPa) a B (0,297 MPa). Zbylé dvě varianty (C, D) tento minimální požadavek bez problémů splnily. Ve vzájemném porovnání výsledků směsí REF a C nebyly ovšem získané výsledky u směsí C tak kvalitní a v požadované výši, co by stálo za zmínku. Daleko lépe obstála ve vzájemné konfrontaci s referencí směs D, kde pevnost v příčném tahu byla sice o něco málo nižší než u směsí referenční (0,475 vs. 0,433) MPa, ovšem následně

zjištěná pevnost odolnosti proti vodě u této směsi již překonala hodnotu pevnosti odolnosti u směsi referenční (0,428 vs. 0,415) MPa. Výsledky jsou lépe interpretovány v podobě *Graf 2 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní)*.

V prvním zkušebním kole tedy nejlépe dopadla v porovnání s referenční směsí směs D, která byla stmelena 1,0 % cementu a 4,0 % směsného pojiva složeného z vysokopecní granulované strusky MS-GT, jež byla smíšena s pojivovou bází DASTIT® ve vzájemném poměru 50:50. Z tohoto důvodu byly posléze na základě receptury D vyrobeny ještě dvě další varianty stmelěných směsí (E, F), které obsahovaly stejnou strusku smíchanou společně s DASTIT®em, jen se variovalo dávkované množství pojiva. Tyto dvě poslední stmelěné směsi sice splnily požadavky na minimální hodnoty pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě definované v technických podmínkách pro recyklace za studena, nicméně ve srovnání se směsí referenční zůstaly zjištěné výsledné hodnoty trochu za očekáváním.

Pokud se nyní zaměříme na odolnost těles proti vodě stanovené pomocí zkoušky v příčném tahu, tak minimální hodnoty definované v technických podmínkách TP 208 byly u všech stmelěných směsí splněny, a to s dosti velkou rezervou. Nejlépe ze všech receptur dopadla směs E (1,0 % cementu + 3,0 % strusky MS-GT + DASTIT®), kde hodnota odolnosti proti vodě přesáhla hranici 107 %, tedy účinkem vody směs dále nabývala na pevnosti.

4.8 Modul tuhosti

Tabulka 44 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs REF

Název zkoušky:		Modul tuhosti						
Identifikace receptury:		REF (3,0 % AE, 3,0 % CEM)						
Stáří těles:		28 dní						
Místo provedení:		Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební						
Datum provedení:		1. 6. 2019						
Vypracoval:		Bc. Martin Živný						
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	IX	151	60,8	3,0	4,1	12 515	12 258	100%
	IX'	151	55,7			11 542		
	X	151	57,7			12 374		
	X'	151	61,5			12 600		
15	IX	151	60,8	5,0	4,1	8 516	8 056	66%
	IX'	151	55,7			8 411		
	X	151	57,7			7 042		
	X'	151	61,5			8 784		
	XI	151	61,9			8 186		
	XI'	151	58,2			7 475		
	XII	151	61,1			8 863		
	XII'	151	57,3			7 173		
27	IX	151	60,8	5,0	3,0	7 088	6 707	55%
	IX'	151	55,7			6 266		
	X	151	57,7			6 183		
	X'	151	61,5			7 232		
	XI	151	61,9			7 493		
	XI'	151	58,2			6 027		
	XII	151	61,1			7 244		
	XII'	151	57,3			6 120		

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 29 - Zkouška modulu tuhosti v NATu

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 45 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs A

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs A (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-PT)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				6. 6. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace [micron]	Svislá síla [kN]	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [MPa]	Tuhost [MPa]	Relativní hodnota
0	IX	151	61,8	5,1	3,8	7 734	7 765	100%
	IX'	151	56,0			8 210		
	X	151	62,3			7 763		
	X'	151	55,5			7 351		
15	IX	151	61,8	5,0	2,3	4 150	4 449	57%
	IX'	151	56,0			4 699		
	X	151	62,3			4 542		
	X'	151	55,5			4 078		
	XI	151	56,4			4 560		
	XI'	151	61,8			4 378		
	XII	151	62,1			4 720		
	XII'	151	56,1			4 467		
27	IX	151	61,8	5,0	1,5	3 258	3 331	43%
	IX'	151	56,0			3 643		
	X	151	62,3			3 545		
	X'	151	55,5			3 009		
	XI	151	56,4			3 459		
	XI'	151	61,8			3 079		
	XII	151	62,1			3 456		
	XII'	151	56,1			3 199		

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 30 - Výpočetní technika pro stanovení modulu tuhosti v NATu

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 46 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs B

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs B (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-KVP)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				7. 6. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]	Tuhost [MPa]	Relativní hodnota
0	IX	151	55,9	5,1	3,8	7 205	6 794	100%
	IX'	151	61,8			7 279		
	X	151	61,0			6 293		
	X'	151	56,5			6 400		
15	IX	151	55,9	5,0	2,5	5 265	4 874	72%
	IX'	151	61,8			4 882		
	X	151	61,0			4 752		
	X'	151	56,5			4 704		
	XI	151	62,3			5 157		
	XI'	151	56,5			4 832		
	XII	151	56,3			4 648		
	XII'	151	60,4			4 752		
27	IX	151	55,9	5,0	1,6	3 645	3 441	51%
	IX'	151	61,8			3 309		
	X	151	61,0			3 173		
	X'	151	56,5			3 256		
	XI	151	62,3			3 563		
	XI'	151	56,5			3 673		
	XII	151	56,3			3 316		
	XII'	151	60,4			3 593		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 47 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs C

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs C (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				14. 6. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]	Tuhost [MPa]	Relativní hodnota
0	IX'	151	57,8	5,0	5,1	8 888	9 196	100%
	X	151	58,4			8 984		
	X'	151	56,9			9 464		
	XII'	151	59,1			9 449		
15	IX	151	56,0	5,0	3,4	7 177	6 834	74%
	IX'	151	57,8			6 846		
	X	151	58,4			6 597		
	X'	151	56,9			7 327		
	XI	151	59,1			6 654		
	XI'	151	56,0			6 112		
	XII	151	60,6			6 552		
	XII'	151	55,3			7 406		
27	IX	151	61,9	5,0	2,1	4 979	4 664	51%
	IX'	151	57,8			4 365		
	X	151	58,4			4 906		
	X'	151	56,9			5 109		
	XI	151	59,1			4 935		
	XI'	151	60,6			4 377		
	XII	151	55,3			4 357		
	XII'	151	61,9			4 280		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 48 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs D

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs D (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT®)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				15. 6. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	X	151	57,8	5,0	6,6	12 394	11 658	100%
	X'	151	61,7			11 885		
	XI'	151	58,1			11 068		
	XII'	151	59,7			11 286		
15	IX	151	56,8	5,0	4,3	8 100	8 447	72%
	IX'	151	61,7			8 279		
	X	151	57,8			8 738		
	X'	151	61,7			8 592		
	XI	151	58,1			8 464		
	XI'	151	59,7			8 722		
	XII	151	58,0			8 166		
	XII'	151	59,8			8 515		
27	IX	151	56,8	5,0	2,8	6 282	6 270	54%
	IX'	151	61,7			5 964		
	X	151	57,8			6 596		
	X'	151	61,7			6 360		
	XI	151	58,1			6 596		
	XI'	151	59,7			5 889		
	XII	151	58,0			6 391		
	XII'	151	59,8			6 079		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 49 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs E

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs E(3,0 % AE; 1,0 % CEM; 3,0 % STR MS-GT + DASTIT®)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				25. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]	Tuhost [MPa]	Relativní hodnota
0	IX	151	57,9	4,0	5,3	12 421	12 240	100%
	X'	151	60,7			11 680		
	XI	151	56,5			12 627		
	XII	151	61,4			12 230		
15	IX	151	57,9	5,0	4,0	7 465	7 850	64%
	IX'	151	60,7			7 079		
	X	151	56,5			8 146		
	X'	151	61,4			7 910		
	XI	151	57,6			8 007		
	XI'	151	59,3			8 350		
	XII	151	59,3			7 606		
	XII'	151	57,7			8 235		
27	IX	151	57,9	5,0	3,2	6 784	7 364	60%
	IX'	151	60,7			7 057		
	X	151	56,5			7 004		
	X'	151	61,4			7 220		
	XI	151	57,6			7 866		
	XI'	151	59,3			8 015		
	XII	151	59,3			6 948		
	XII'	151	57,7			8 014		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 50 - Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs F

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs F (3,0 % AE; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT®)				
Stáří těles:				28 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				26. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]	Tuhost [MPa]	Relativní hodnota
0	X	151	56,7	4,0	4,4	11 409	10 501	100%
	X'	151	60,9			10 222		
	XI'	151	60,3			10 089		
	XII'	151	57,2			10 282		
15	IX	151	54,9	5,0	3,2	6 402	6 326	60%
	IX'	151	62,2			6 405		
	X	151	57,5			5 768		
	X'	151	60,5			5 985		
	XI	151	56,7			6 478		
	XI'	151	60,9			6 497		
	XII	151	60,3			6 882		
	XII'	151	57,2			6 192		
27	IX	151	54,9	5,0	2,3	5 170	4 997	48%
	IX'	151	56,7			5 379		
	X	151	60,9			4 815		
	X'	151	60,3			4 866		
	XI	151	57,2			5 204		
	XI'	151	62,2			5 019		
	XII	151	57,5			4 699		
	XII'	151	60,5			4 824		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 51 - Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs REF

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				REF (3,0 % AE, 3,0 % CEM)				
Stáří těles:				56 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				29. 6. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	XIII	151	62,0	3,0	4,5	13 462	13 194	100%
	XIII'	151	55,7			13 536		
	XIV	151	57,5			11 757		
	XIV'	151	61,6			14 021		
15	XIII	151	62,0	5,0	4,9	10 012	9 818	74%
	XIII'	151	55,7			10 136		
	XIV	151	57,5			8 861		
	XIV'	151	61,6			10 263		
27	XIII	151	62,0	5,0	3,6	8 198	7 855	80%
	XIII'	151	55,7			7 554		
	XIV	151	57,5			7 587		
	XIV'	151	61,6			8 082		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 52 - Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs A

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs A (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-PT)				
Stáří těles:				56 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				4. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	XIII	151	62,4	5,0	5,4	9 481	9 577	100%
	XIII'	151	54,7			9 337		
	XIV	151	57,0			9 296		
	XIV'	151	60,5			10 192		
15	XIII	151	62,4	5,0	3,1	6 112	6 178	65%
	XIII'	151	54,7			6 281		
	XIV	151	57,0			6 414		
	XIV'	151	60,5			5 904		
27	XIII	151	62,4	5,1	2,0	4 449	4 446	46%
	XIII'	151	54,7			4 342		
	XIV	151	57,0			4 356		
	XIV'	151	60,5			4 635		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 53 - Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs B

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs B (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-KVP)				
Stáří těles:				56 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				5. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	XIII	151	55,1	5,1	5,2	9 292	9 233	100%
	XIII'	151	62,3			9 511		
	XIV	151	55,4			9 635		
	XIV'	151	61,0			8 494		
15	XIII	151	55,1	5,0	3,2	6 691	6 294	68%
	XIII'	151	62,3			5 764		
	XIV	151	55,4			6 054		
	XIV'	151	61,0			6 668		
27	XIII	151	55,1	5,0	2,0	4 422	4 430	48%
	XIII'	151	62,3			4 580		
	XIV	151	55,4			4 563		
	XIV'	151	61,0			4 155		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 54 - Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs C

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs C (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT)				
Stáří těles:				56 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				12. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	XIII	151	55,0	5,0	4,2	7 275	7 511	100%
	XIII'	151	61,8			7 721		
	XIV	151	55,7			7 686		
	XIV'	151	62,0			7 363		
15	XIII	151	55,0	5,0	3,0	5 697	5 910	79%
	XIII'	151	61,8			6 079		
	XIV	151	55,7			6 101		
	XIV'	151	62,0			5 764		
27	XIII	151	55,0	5,1	1,9	4 201	4 286	57%
	XIII'	151	61,8			4 586		
	XIV	151	55,7			4 367		
	XIV'	151	62,0			3 991		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 55 - Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs D

Název zkoušky:				Modul tuhosti				
Identifikace receptury:				Směs D (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT®)				
Stáří těles:				56 dní				
Místo provedení:				Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební				
Datum provedení:				13. 7. 2019				
Vypracoval:				Bc. Martin Živný				
Teplota [°C]	Těleso	Rozměry tělesa		Deformace	Svislá síla	Modul tuhosti		
		Průměr [mm]	Tloušťka [mm]			Průměr [micron]	Průměr [kN]	Průměr [MPa]
0	XIII	151	55,3	5,0	6,7	12 480	12 265	100%
	XIII'	151	62,1			11 646		
	XIV	151	55,9			12 205		
	XIV'	151	62,2			12 728		
15	XIII	151	55,3	5,0	4,9	10 283	9 748	79%
	XIII'	151	62,1			9 088		
	XIV	151	55,9			9 768		
	XIV'	151	62,2			9 854		
27	XIII	151	55,3	5,0	3,7	8 712	8 167	67%
	XIII'	151	62,1			7 531		
	XIV	151	55,9			8 479		
	XIV'	151	62,2			7 947		

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 56 - Výsledné hodnoty modulů tuhosti - 28 dní

Směs	Modul tuhosti [MPa]; 28 dní			Teplotní citlivost S_0/S_{27}
	0 °C	15 °C	27 °C	
REF	12 258	8 056	6 707	1,83
A	7 765	4 449	3 331	2,33
B	6 794	4 874	3 441	1,97
C	9 196	6 834	4 664	1,97
D	11 658	8 447	6 270	1,86
E	12 240	7 850	7 364	1,66
F	10 501	6 326	4 997	2,10

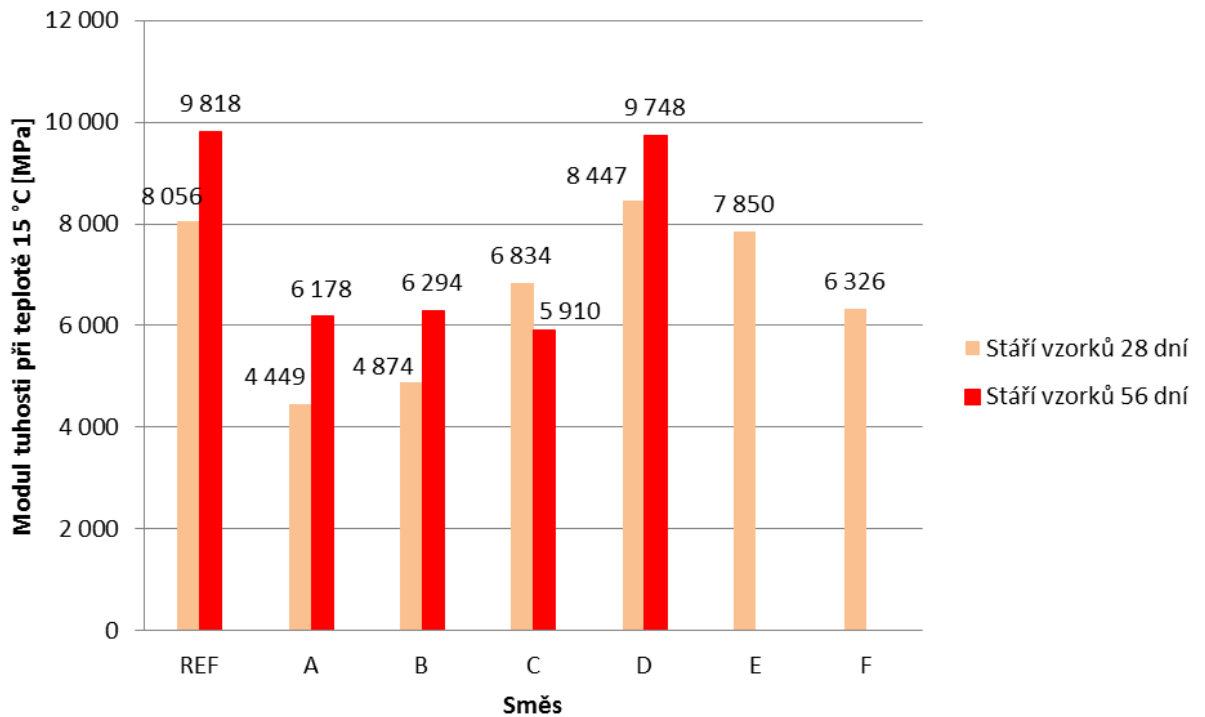
Zdroj: [vlastní]

Tabulka 57 - Výsledné hodnoty modulů tuhosti - 56 dní

Směs	Modul tuhosti [MPa]; 56 dní			Teplotní citlivost S_0/S_{27}
	0 °C	15 °C	27 °C	
REF	13 194	9 818	7 855	1,68
A	9 577	6 178	4 446	2,15
B	9 233	6 294	4 430	2,08
C	7 511	5 910	4 286	1,75
D	12 265	9 748	8 167	1,50

Zdroj: [vlastní]

Graf 5 - Naměřené moduly tuhosti při teplotě 15 °C



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Moduly tuhosti byly měřeny ve třech teplotních úrovních, konkrétně při 0 °C, 15 °C a 27 °C a ve dvou časových intervalech, 28 a 56 dní od výroby zkušebních těles. Moduly tuhosti na vzorcích starých 56 dní nebyly stanoveny z časových důvodů (zkušební měření probíhala až po termínu odevzdání této diplomové práce) u směsí E a F. Zjištěné hodnoty modulů tuhostí u všech směsí recyklace za studena mají podobný průběh, jako výsledné hodnoty u zkoušek v příčném tahu. Pokud se zaměříme pouze na strusky (bez příměsi DASTIT®u), tak dopadla nejlépe struska s označením MS-GT, což je vysokopecní granulovaná struska.

4.9 Šíření trhliny

Tabulka 58 - Výsledky zkoušky šíření trhliny ohybem - směsi REF, A, B, C

Název zkoušky:					Šíření trhliny zkouškou ohybem					
Identifikace receptury:					REF, A, B, C					
Stáří těles:					30 - 40 dní					
Místo provedení:					Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební					
Datum provedení:					11. 6. - 20. 6. 2019					
Vypracoval:					Bc. Martin Živný					
Těleso	Ploušťka t [mm]	Průměr D [mm]	Výška W [mm]	Hloubka drážky a [mm]	Deformace [mm]	Síla F_{max} [kN]	Napětí σ_{max} [MPa]	Faktor f [-]	Odolnost vůči lomu K_{Ic} [N/mm ^{3/2}]	
Směs REF (3,0 % AE; 4,0 % CEM)										
IX'1	56,17	149,21	72,00	10	1,77	3,20	1,63	5,984	9,7	8,6
IX'2	55,91	150,17	75,27	10	1,55	2,45	1,24	5,790	7,2	
X1	57,64	149,69	74,64	10	0,87	2,95	1,46	5,827	8,5	
X2	57,58	149,28	72,55	10	-	-	-	-	-	
XI'1	57,28	149,31	75,32	10	0,83	3,02	1,51	5,788	8,7	
XI'2	57,28	149,29	72,20	10	-	-	-	-	-	
XII'1	57,41	150,06	74,79	10	1,18	3,01	1,49	5,819	8,7	
XII'2	57,35	149,93	72,41	10	0,53	3,05	1,51	5,960	9,0	
Směs A (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-PT)										
A1	55,37	150,05	71,68	10	0,55	3,06	1,57	6,003	9,4	8,6
A1'	55,42	150,67	75,13	10	0,69	2,78	1,42	5,799	8,2	
A2	56,07	150,29	75,23	10	1,03	2,75	1,39	5,793	8,1	
A2'	56,38	149,13	71,91	10	-	-	-	-	-	
A3	56,10	150,49	75,64	10	-	-	-	-	-	
A3'	56,04	150,29	72,33	10	0,56	2,98	1,51	5,964	9,0	
A4	62,00	149,96	75,30	10	0,82	3,04	1,39	5,789	8,1	
A4'	61,88	149,65	72,18	10	-	-	-	-	-	
Směs B (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-KVP)										
B1	56,18	150,40	74,64	10	-	-	-	-	-	5,6
B1'	56,39	150,20	72,64	10	0,72	2,11	1,06	5,946	6,3	
B2	57,21	150,62	76,18	10	0,65	1,98	0,98	5,737	5,6	
B2'	57,49	148,88	70,99	10	1,17	2,14	1,07	6,044	6,4	
B3	56,39	149,92	73,43	10	0,37	1,44	0,73	5,899	4,3	
B3'	56,30	149,10	73,38	10	0,61	2,15	1,09	5,902	6,4	
B4	56,79	149,48	74,38	10	0,48	1,44	0,72	5,843	4,2	
B4'	56,91	149,49	73,17	10	0,92	2,04	1,02	5,914	6,0	
Směs C (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT)										
C1	57,72	150,32	73,30	10	0,44	3,51	1,72	5,906	10,2	8,9
C1'	57,74	150,35	73,69	10	-	-	-	-	-	
C2	57,23	149,85	70,97	10	0,50	2,78	1,38	6,045	8,4	
C2'	57,05	150,09	75,44	10	0,82	2,51	1,25	5,781	7,2	
C3	56,19	150,23	72,89	10	0,82	2,91	1,47	5,931	8,7	
C3'	56,23	150,42	74,05	10	0,89	3,54	1,78	5,862	10,5	
C4	55,99	149,78	73,68	10	-	-	-	-	-	
C4'	55,53	149,56	73,23	10	1,50	2,71	1,39	5,911	8,2	

Zdroj: [vlastní]

Tabulka 59 - Výsledky zkoušky šíření trhliny ohybem - směsi D, E, F

Název zkoušky:					Šíření trhliny zkouškou ohybem					
Identifikace receptury:					D, E, F					
Stáří těles:					30 - 40 dní					
Místo provedení:					Silniční laboratoř, ČVUT Fakulta stavební					
Datum provedení:					20. 6. - 15. 8. 2019					
Vypracoval:					Bc. Martin Živný					
Těleso	Tloušťka t [mm]	Průměr D [mm]	Výška W [mm]	Hloubka drážky a	Deformace [mm]	Síla F_{max} [kN]	Napětí σ_{max}	Faktor f [-]	Odolnost vůči lomu K_{Ic} [N/mm ^{3/2}]	
Směs D (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT®)										
D1	57,56	150,90	73,48	10	-	-	-	-	-	11,2
D1'	57,13	150,51	72,98	10	1,07	3,26	1,62	5,926	9,6	
D2	58,38	150,55	73,71	10	0,43	3,64	1,77	5,882	10,4	
D2'	58,05	150,69	73,27	10	0,54	4,47	2,18	5,908	12,9	
D3	56,11	150,56	72,56	10	0,56	4,23	2,13	5,950	12,7	
D3'	56,51	150,91	74,61	10	0,51	4,06	2,03	5,829	11,8	
D4	58,22	150,20	74,38	10	0,56	3,67	1,79	5,843	10,5	
D4'	57,90	149,88	72,64	10	0,64	3,48	1,71	5,946	10,2	
Směs E (3,0 % AE; 1,0 % CEM; 3,0 % STR MS-GT + DASTIT®)										
E1	58,89	149,78	72,58	10	-	-	-	-	-	11,7
E1'	58,83	150,17	75,33	10	0,63	4,33	2,09	5,787	12,1	
E2	56,74	149,77	71,35	10	0,50	3,64	1,83	6,022	11,0	
E2'	56,03	150,36	75,62	10	0,85	4,41	2,23	5,770	12,9	
E3	58,22	148,78	70,95	10	0,50	3,70	1,82	6,047	11,0	
E3'	58,11	149,92	75,48	10	1,91	3,94	1,93	5,778	11,1	
E4	57,76	150,63	76,03	10	0,60	4,22	2,07	5,746	11,9	
E4'	57,62	149,73	70,77	10	1,08	4,02	1,99	6,057	12,0	
Směs F (3,0 % AE; 4,0 % STR MS-GT + DASTIT®)										
F1	55,81	150,36	77,13	10	0,93	3,93	2,00	5,682	11,3	10,0
F1'	56,50	149,55	71,62	10	0,70	2,67	1,35	6,006	8,1	
F2	57,26	150,15	74,68	10	0,82	3,03	1,50	5,825	8,8	
F2'	56,99	150,40	71,96	10	1,15	4,01	1,99	5,986	11,9	
F3	57,55	148,24	71,81	10	-	-	-	-	-	
F3'	56,87	149,39	75,68	10	0,97	3,66	1,84	5,767	10,6	
F4	56,73	149,72	72,97	10	0,52	3,38	1,70	5,926	10,1	
F4'	57,14	150,31	75,08	10	0,88	3,12	1,55	5,802	9,0	

Zdroj: [vlastní]



Obrázek 31 – Detail porušení zkušebního půlválcového tělesa ohybem - směs F

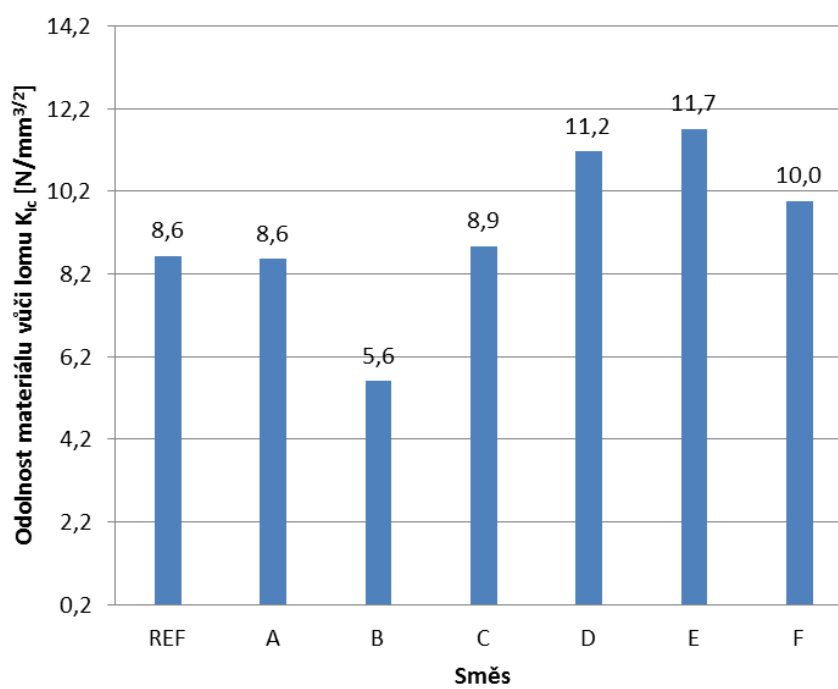
Zdroj: [vlastní]



Obrázek 32 – Detail provedení zkoušky šíření trhliny ohybem

Zdroj: [vlastní]

Graf 6 - Výsledky odolnosti materiálu vůči lomu



Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Zkouška odolnosti proti šíření trhliny trojbodovým ohybem na půlválcových zkušebních tělesech byla u všech směsí prováděna za neměnné teploty 0 °C. Tento typ zkoušky se v obvyklých situacích při návrhu stmelené směsi pro opravy konstrukčních vrstev technologií recyklace za studena neprovádí. U šíření trhliny platí, že čím je lomová houževnatost K_{Ic} vyšší, tím lze u zkoušeného materiálu předpokládat lepší odolnost proti vzniku trhlin. Výsledky laboratorních zkoušek dopadly nejméně příznivě pro směs B (vzduchem chlazená vysokopecní struska), kde vyšla lomová houževnatost téměř o 50 % méně (5,6 N/mm^{3/2}), než v porovnání s nejlepšími výsledky směsi E (11,7 N/mm^{3/2}). Zajímavé je ovšem zmínit porovnání výsledků referenční směsi proti výsledkům receptury D. Směs D (vysokopecní granulovaná + DASTIT®) totiž vykazala lepší odolnost proti šíření trhliny, a to až o 30 %, než směs referenční.

4.10 Stručná finanční analýza

Cena za metr čtverečný opravy konstrukčních vrstev netuhých vozovek technologií recyklace za studena je závislá na mnoha vstupních faktorech. Cena je odvozena například podle toho, kde se inkriminovaný opravovaný úsek pozemní komunikace nachází, zda v extravilánu nebo intravilánu (denní výkon se v těchto případech může i významněji vzájemně lišit), lokalita opravovaného úseku z hlediska umístění v rámci ČR (doprava materiálu, nájezdy techniky) apod. Zásadní vliv na cenu má ovšem druh a dávkování použitých pojiv ve stmelené směsi, s tím samozřejmě úzce souvisí i tloušťka recyklované vrstvy. V tuto dobu vychází nejméně ekonomicky výhodné (z pohledu investora) použití pojiv v kombinaci cementu s asfaltovou emulzí, následuje cement se zpěněným asfaltem, a jako nejlevnější vychází varianta s cementem samotným.

Co se jednotlivých cen materiálů v současné době týká, tak tuna cementu se prodává zhruba za 1 900 až 2 000 Kč bez DPH (záleží na kvalitativní a pevnostní třídě), asfaltová emulze cca za 11 000 Kč bez DPH, silniční asfalt 70/100 za 9 000 Kč bez DPH. Cena za tunu popílkové báze DASTIT® je kolem 1 000 Kč bez DPH a v neposlední řadě vysokopecní granulovaná struska stojí kolem 1 100 Kč/tunu bez DPH. Veškeré ceny jsou pouze přibližné a bez započítané dopravy materiálu na stavbu. U dopravy potom je třeba brát v potaz i objemovou hmotnost jednotlivých zrnitých pojiv, jelikož objemově tuna popílkového pojiva bude vyžadovat jiný prostor než tuna cementu.

Tabulka 60 - Finanční porovnání zvolených receptur

Objemová hmotnost RS směsi [kg/m ³]	2150	Finanční porovnání zvolených receptur					
		REC z praxe			REC D		
Výměra předpokládané recyklace za studena [m ²]	15 000	3,0 % AE + 4,0 % CEM			3,0 % AE + 1,0 % CEM + 4,0 % (STR + DASTIT®)		
Tloušťka RS [cm]	25	Dávkování pojiva [kg/m ²]	Množství materiálu celkem [t]	Cena za materiál celkem [Kč bez DPH]	Dávkování pojiva [kg/m ²]	Množství materiálu celkem [t]	Cena za materiál celkem [Kč bez DPH]
Cement 32,5R [Kč/t]	1 900	21,50	322,50	612 750,00	5,38	80,63	153 187,50
Asfaltová emulze [Kč/t]	11 000	16,13	241,88	2 660 625,00	16,13	241,88	2 660 625,00
Struska + DASTIT® (1:1) [Kč/t]	1 050	-	-	-	21,50	322,50	338 625,00
Materiálové náklady celkem [Kč bez DPH]				3 273 375,00			3 152 437,50
Objemová hmotnost RS směsi [kg/m ³]	2150	Finanční porovnání zvolených receptur					
		REC z praxe			Upravená REC D		
Výměra předpokládané recyklace za studena [m ²]	15 000	4,0 % CEM			1,0 % CEM + 4,0 % (STR + DASTIT®)		
Tloušťka RS [cm]	25	Dávkování pojiva [kg/m ²]	Množství materiálu celkem [t]	Cena za materiál celkem [Kč bez DPH]	Dávkování pojiva [kg/m ²]	Množství materiálu celkem [t]	Cena za materiál celkem [Kč bez DPH]
Cement 32,5R [Kč/t]	1 900	21,50	322,50	612 750,00	5,38	80,63	153 187,50
Asfaltová emulze [Kč/t]	11 000	-	-	-	-	-	-
Struska + DASTIT® (1:1) [Kč/t]	1 050	-	-	-	21,50	322,50	338 625,00
Materiálové náklady celkem [Kč bez DPH]				612 750,00			491 812,50

Zdroj: [vlastní]

Závěr:

Pokud se rozhodneme využít odpadních materiálů v podobě upravených vysokopecních strusek pro opravy konstrukčních vrstev vozovek pozemních komunikací technologií recyklace za studena, je samozřejmě důležité zvážit finanční porovnání těchto materiálů v porovnání s materiály, které se používají u recyklací za studena standardním způsobem. V současné době je cena cementu ve srovnání se struskami přibližně jednou tak vysoká. Výše uvedený modelový příklad prokázal finanční výhodnost zvolených variant s částečnou substitucí cementu granulovanou vysokopecní struskou smíchanou s pojivovou popílkovou bází DASTIT®.

5 DISKUZE A DOPORUČENÍ

Pokud se nyní poohlédneme zpět na získané výsledné hodnoty jednotlivých laboratorních zkoušek v rámci provedeného experimentu této diplomové práce, můžeme vypožorovat několik zajímavých informací a faktů.

Experimentální část této diplomové práce byla v zásadě rozdělena na dvě části. V té první se experiment zabýval stanovením základních geometrických a fyzikálních vlastností použitých materiálů, které tvořily základní nosný skelet pro budoucí použité zkušební kompozitní směsi recyklace za studena, tedy šterkodrti a asfaltového R-materiálu. Základní skelet stmelených směsí byl tedy vyroben ze smísení šterkodrti o frakci 0/32 s asfaltovým R-materiálem frakce 0/11 ve vzájemném poměru 1:1. Pokud se podíváme blíže na charakteristiky týkající se zrnitosti této směsi, tak v zásadě se jedná o kombinaci použitých materiálů, kde křivka zrnitosti je středně zrněná, má plynulý průběh křivosti a navíc splňuje meze zrnitosti, které jsou předepsány v technických podmínkách TP 208. Optimální vlhkost nosného skeletu (smíseného bez pojiv) byla následně stanovena pomocí Proctorovy modifikované zkoušky, jejíž dosažený výsledek posloužil k lepšímu stanovení množství dávkované vody při výrobě stmelených kompozitních směsí. Optimální vlhkost skeletu se pohybovala kolem 4,0 %. Dalším typem provedené zkušební metody bylo stanovení maximální objemové hmotnosti skeletu a je nutno podotknout, že tato zkouška byla provedena pouze z důvodu celistvého a komplexního pohledu na vlastnosti použitých materiálů. Maximální objemová hmotnost vyšla v tomto případě $2\,650\text{ kg/m}^3$, což je o cca 300 kg/m^3 vyšší údaj, než bylo zjištěno u objemové hmotnosti zkušebních vyžralých válcových těles.

Druhá, podstatnější část experimentu této diplomové práce, se zabývala možnou substitucí hydraulických pojiv v podobě portlandského směsného cementu ve stmelených směsích alternativními pojivy, jako jsou upravené vysokopecní strusky. Celkem bylo vyhotoveno sedm (7) různých variant stmelených směsí, základní referenční směs recyklace za studena byla stmelená 3,0 % asfaltové emulze a 3,0 % směsného cementu II/B-S 32,5 R. Zbylých šest (6) směsí obsahovalo různé druhy (4) vysokopecních upravených strusek. Jednalo se o vysokopecní strusku stabilizovanou vzduchem MS-PT (směs A), strusku s vysokým podílem oxidu vápenatého MS-KVP (směs B), vysokopecní granulovanou strusku mletou v desintegrátoru MS-GT (směs C) a v posledním případě se o směs strusky MS-GT s popílkovou pojivovou bází DASTIT® (směs D). Receptury směsí E a F byly určeny

na základě výsledků laboratorních zkoušek provedených na předchozích variantách stmelených směsí. Materiálové složení spolu s procentním zastoupením jednotlivých složek stmelených směsí je naznačeno v *Tabulka 14 - Zastoupení jednotlivých komponent v navržených zkušebních směsích*. Při výrobě čerstvých stmelených směsí bylo nutné při jejich mísení hlídat optimální vlhkost, kde byla použita pro tyto účely metoda koule, a také dobu zpracovatelnosti, která nepřesáhla v tomto případě 90 minut. Exaktní vyjádření výsledků vlhkosti jednotlivých stmelených směsí bylo provedeno za pomoci laboratorní sušárny, kde byly vzorky vysoušeny. Je nutno poznamenat, že zjištěné výsledky vlhkosti vyrobených směsí se blížily vlhkosti optimální s tím, že u receptur obsahující popílkovou pojivovou bázi DASTIT®, byly vlhkosti variantních směsí o 2 % nad optimem. Ověřila se tak skutečnost, že popílková pojiva potřebují k lepší hydrataci vyšší množství vody, než pojiva obsahující popílek v daleko menším zastoupení.

Pokud se nyní podíváme na to, jaké výsledky byly naměřeny na zkušebních válcových tělesech vyhotovených ze zkušebních stmelených směsí při realizaci zkoušek v příčném tahu a odolnosti proti vodě, můžeme vyzorovat následující zajímavé poznatky. Obecně, zkouška pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě zaujímá při návrhu stmelených směsí pro opravy konstrukčních a podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací pomocí technologie recyklace za studena významnou a důležitou roli. Tento druh zkoušky se vyskytuje v každé průkazní zkoušce a na jejím základě se později z dosažených výsledků stanovuje definitivní dávkování a druh použitých pojiv do stmelených směsí. Zkoušky v příčném tahu se prováděly ve třech časových posloupnostech, po 7 dnech, po 28 dnech a po 56 dnech, tělesa byla po celou dobu uložena na vzduchu na stinném místě. Sedmidenní pevnosti dopadly nejlépe pro tělesa vyhotovená ze směsí referenční (0,48 MPa) a ze směsí D (0,43 MPa; struska MS-GT + DASTIT®). Na ostatních směsích byly naměřeny hodnoty podstatně nižší. Pevnosti po 28 dnech dopadly lépe pro směs referenční (1,10 MPa) v porovnání se směsí D (0,91 MPa), ovšem po odzkoušení zkušebních těles po 56 dnech, se situace výrazně změnila, a to tak, že pevnosti v příčném tahu u směsí REF a D jsou totožné. Směs D tedy po 56 dnech dosáhla stejné pevnosti, jako směs REF. Převedeme-li tento fakt do časové osy, tak při použití zmíněné substituce cementu za pojiva, která jsou ve směsí D (vysokopecní granulovaná struska MS-GT + DASTIT®), dosáhne tato kombinace pojiv rovnocenného výsledku, jen s pozdějším časovým odstupem.

Dále byla provedena zkouška odolnosti proti šíření trhliny za ohybu. Zkušební teploty byla 0 °C. Výsledky laboratorních zkoušek jsou nejhorší u směsí B (vzduchem chlazená

vysokopecní struska), kde lomová houževnatost je poloviční oproti nejlepšímu výsledku, který je určen u směsi E. Vzájemné porovnání výsledků referenční směsi proti výsledkům receptury D opět přineslo uspokojivý výsledek ve prospěch směsi D (vysokopecní granulovaná + DASTIT®), která má lomovou houževnatost o 30 % vyšší, než směs referenční.

Mezi poslední zkoušky, které byly provedeny v rámci experimentu této diplomové práce, se řadí zkouška stanovení modulu tuhosti. Ty byly měřeny ve třech teplotních úrovních, konkrétně při 0 °C, 15 °C a 27 °C a ve dvou časových intervalech, 28 a 56 dní od výroby zkušebních těles. Dle TP 170 je klíčový modul tuhosti při 15 °C (používá se při výpočtu vozovky dle návrhové metody). Moduly při 0 °C a při 27 °C měříme z tradice. Teplota 0 °C odpovídá přibližně zimnímu období a 27 °C pak v průměru letnímu období, které se někdy doplňuje o teploty 40 °C.

Moduly tuhostí na vzorcích starých 56 dní nebyly stanoveny z časových důvodů (zkušební měření probíhala až po termínu odevzdání této diplomové práce) u směsí E a F. Je zajímavé, že u směsi B se tuhost s plynoucím časem postupně snižovala. U všech ostatních směsí tomu bylo naopak, tuhost s přibývajícím časem rostla. Pokud se zaměříme pouze na strusky (bez příměsi DASTIT®), tak dopadla nejlépe struska s označením MS-GT, což je vysokopecní granulovaná mletá, ve které lze určitě najít skrytý potenciál k dalšímu laboratornímu zkoumání. Pokud se navíc tato struska v určitém vhodném poměru smíchá s popílkovou bází DASTIT®, dostaneme směs pojiva, jejíž získané výsledky jsou srovnatelné se základní referenční směsí, a v mnohých případech dokonce i lepší. To dokazuje i na závěr provedená jednoduchá finanční analýza. V současné době je cena cementu ve srovnání se struskami přibližně jednou tak vysoká. Modelový příklad prokázal finanční výhodnost zvolených variant s částečnou substitucí cementu granulovanou vysokopecní struskou smíchanou s pojivovou popílkovou bází DASTIT®.

V tento okamžik, na základě získaných výsledků, lze konstatovat, že substituce hydraulických pojiv (cementu) ve stmelných směsích, a v tomto případě pro dané experimentální porovnání je jedno, zda se bude jednat o substituci celkovou, či částečnou, je možná, jak dokázal výše popsáný experiment v rámci této diplomové práce. Pojivo složené z vysokopecní granulované strusky a popílkové báze DASTIT® v sobě ukrývá široké spektrum možností, jak z hlediska charakteristických vlastností, tak po stránce finanční, které mohou v budoucnosti přispět k častějšímu použití upravených vysokopecních strusek

k opravám podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací technologiemi recyklace za studena.

Tabulka 61 - Celkové výsledky experimentu

Stmelená směs pro recyklaci za studena	Jednotky	REF	A	B	C	D	E	F
Objemová hmotnost vlhká	[kg/m ³]	2,285	2,294	2,301	2,305	2,281	2,284	2,281
Objemová hmotnost suchá	[kg/m ³]	2,287	2,297	2,299	2,298	2,291	2,288	2,292
Mezerovitost	[%]	13,71	13,34	13,28	13,33	13,58	13,71	13,55
Vlhkost vyrobené směsi	[%]	3,89	3,99	3,79	4,26	5,06	4,33	5,21
Pevnost v příčném tahu (7 dní vzduch)	[MPa]	0,48	0,33	0,30	0,35	0,43	0,35	0,34
Pevnost v příčném tahu (7 dní vzduch + 7 dní voda)	[MPa]	0,42	0,27	0,30	0,32	0,43	0,37	0,35
Odolnost proti vodě	[%]	87,5	82	101,4	90,9	99,3	107,3	104,6
Pevnost v příčném tahu (28 dní vzduch)	[MPa]	1,10	0,71	0,62	0,80	0,91	0,83	0,77
Relativní poměr nárůstu pevnosti v tahu (ITS ₂₈ /ITS ₇)	[-]	2,32	2,13	2,09	2,26	2,10	2,36	2,26
Pevnost v příčném tahu (56 dní vzduch)	[MPa]	1,15	0,86	0,81	0,81	1,15	-	-
Relativní poměr nárůstu pevnosti v tahu (ITS ₅₆ /ITS ₇)	[-]	2,42	2,57	2,73	2,29	2,66	-	-
Modul tuhosti (15 °C)	[MPa]	8 056	4 449	4 874	6 834	8 447	7 850	6 326
Lomová houževnatost	[N/mm ^{3/2}]	8,6	8,6	5,6	8,9	11,2	11,7	10,0

Zdroj: [vlastní]

Výsledky získané výše uvedeným experimentem mohou sloužit jako slušný zdroj informací, který může být dalšími experimenty upřesňován a obohacován. Bylo by třeba zajímavé změnit poměr mísení pojiv mezi vysokopecní granulovanou struskou MS-GT a pojivovou popílkovou bází DASTIT® (pro experiment této diplomové práce byl mísicí poměr 1:1) a zjistit vliv poměru mísení na materiálové a fyzikální vlastnosti stmelených směsí pro recyklace za studena. Nebo například pokusit se určit maximální možnou potencionální hranici, kdy pojivová báze DASTIT® výrazně napomáhá zlepšit výsledné vlastnosti kompozitních směsí, a naopak, kdy tato popílková báze může zapříčinit nežádoucí mechanicko-fyzikální chování zkušebních směsí a vrstev z nich vyhotovených (tvorba reflexních trhlin). Variant může být skutečně mnoho, např. záměna vstupních materiálů za materiály zcela odlišné, popř. změna vzájemného poměru mísení jednotlivých složek plniva (80 % štěrkodrt' + 20 % R-materiál), nebo proměnné dávkování a použití různých druhů pojiv (např. bez asfaltové emulze; 4,0 % cementu versus struska MS-GT+DASTIT®), apod.

6 ZÁVĚR

V této diplomové práci byly představeny jednotlivé druhy technologií využívaných při opravách konstrukčních vrstev pozemních komunikací, podrobně byla popsána technologie recyklace za studena včetně základního popisu vstupních materiálů, které se při této technologii obvykle používají. V rámci technologie studené recyklace byly poté ověřovány možnosti uplatnitelnosti metalurgického odpadu, konkrétně upravených vysokopecních strusek, které byly použity ve stmelných směsích vyrobených pro potřeby experimentu této diplomové práce. Vyhodnocené a následně i prezentované výsledky experimentu poukazují na možnost uplatnění těchto materiálů ve stmelných směsích recyklace za studena jak z hlediska mechanické odolnosti, tak z hlediska finančního a environmentálního.

Z mechanického hlediska vysokopecní upravené strusky vykazují určitý potenciál substituovat tradiční hydraulická pojiva, otázka zní, zda plnohodnotně, či jen v uvozovkách řečeno, částečně. V jakém rozsahu, to lze na základě malého množství provedených laboratorních zkoušek a jejich následných výsledků velice těžko kvantifikovat. Zda jsou simulované laboratorní závěry reálné a zda odpovídají skutečným podmínkám chování ve vozovce, je velice složité tvrdit, v ideálním případě by bylo nejlepší ověřit laboratorní výsledky s výslednými hodnotami zkoušek provedených in-situ.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SRB JAN, RŮŽIČKOVÁ ZDENKA. *Nové postupy využití druhotných surovin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [2] VLČEK JOZEF, FIEDOR JIŘÍ. *Průmyslové odpady: strusky z výroby železa a oceli*. ECOFER s.r.o. 2015. ISBN 978-80-260-7775-6.
- [3] ZAJÍČEK, Jan, ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE VÝSTAVBĚ a SDRUŽENÍ PRO VÝSTAVBU SILNIC PRAHA. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [4] DOC. ING. MIROSLAV ŘEZÁČ, PH.D. Přednáška - Dopravní a liniové stavby č. 5 - Konstrukce vozovky. In: [online]. Ostrava. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3159339/>
- [5] ING. JAN ZAJÍČEK, APT SERVIS. *TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena* [online]. B.m.: Ministerstvo dopravy. červenec 2009. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_208.pdf
- [6] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací - Kapitola 1: Všeobecně* [online]. B.m.: Odbor pozemních komunikací, Ministerstvo dopravy. leden 2017. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_1_2017.pdf
- [7] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací - Kapitola 5: Podkladní vrstvy* [online]. B.m.: Odbor pozemních komunikací, Ministerstvo dopravy. březen 2008. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_5.pdf
- [8] *ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody* [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2019. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/736121-csn-73-6121_4_16393.html
- [9] *ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem* [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. prosinec 2013. Dostupné z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/80694-nahrady-736156-csn-en-14227-1.html>
- [10] *Recyklace vozovek, Silniční stavby 2* [online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2842790-Recyklace-vozovek-silnicni-stavby-2.html>
- [11] DOC. DR. ING. MICHAL VARAUS. *Recyklace asfaltových směsí na obalovně* [online]. 15. květen 2013. Dostupné z: <http://www.konference-projektovani.cz/rocnik-2013/prezentace/data/19-varaus.pdf>
- [12] MARTIN ŘEHULKA. *Recyklace netuhých vozovek za studena* [online]. B.m., 2018. Bakalářská práce. b.n. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/114336?zp_id=114336
- [13] *Obnova a zesílení krytů vozovek recyklací na místě za horka* [online]. B.m.: Frekomos. Dostupné z: http://www.frekomos.cz/media/files/horka_recyklace_frekomos_web.pdf

- [14] ING. FRANTIŠEK HABURAJ, PHD. Přednáška č.4 - Rekonstrukce asfaltových vozovek. In: . Pardubice. 2013.
- [15] BC. LUBOŠ URBANEC. *Problematika zvyšování podílu R-materiálu v asfaltových směsích* [online]. B.m., 2013. Diplomová práce. b.n. Dostupné z: <https://docplayer.cz/40290891-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-brno-university-of-technology.html>
- [16] VUT BRNO, ČVUT PRAHA, APT SERVIS, EUROVIA CS, A.S. *TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací* [online]. B.m.: Ministerstvo dopravy. září 2010. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_170_Dodatek_1.pdf
- [17] DR. ING. MICHAL VARAUS. Pozemní komunikace II - Asfaltová pojiva. In: [online]. Brno. 2005. 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%20%20text%20-%20Asfaltov%C3%A1%20pojiva.pdf>
- [18] CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU. *TP 92 Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem* [online]. B.m.: Ministerstvo dopravy. prosinec 2010. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_92.pdf
- [19] LUKÁŠ SKÝVA. *Recyklace za studena na místě*. Pardubice, 2017. Bakalářská práce. Pardubice.
- [20] MARTIN ŽIVNÝ. *Mrazuvzdornost vozovkových betonů dle stupně provzdušnění*. Pardubice, 2015. Bakalářská práce. Pardubice.
- [21] ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. duben 2012. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/722101-csn-en-197-1_4_61819.html
- [22] <http://www.ebeton.cz/>. EBETON [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz>
- [23] ING. JAKUB ŠEDINA. *Alternativní druhy pojiv ve stmelěných směsích*. Praha, 2019. Disertační práce. ČVUT Praha, Fakulta stavební.
- [24] ČSN EN 13808 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace kationaktivních asfaltových emulzí [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. jen 2013. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [25] *Wikipedia: Asfalt* [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Asfalt>
- [26] GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; HOLZER, L.; FIGI, R.; WINNEFELD, F. *Hydration of alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement. Advances in Cement Research*. 2016
- [27] PACHECO-TORGAL FERNANDO, CASTRO-GOMES JOAO, JALALI SAID. *Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders*. 2007

- [28] PROŠEK. *Sborník konference Recycling 2018*. 2018
- [29] Vysoká pec. *Technický týdeník* [online]. 2018. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/vysoka-pec-c-3-v-arcelormittal-ostrava-ma-digitalni-dvojce_44056.html
- [30] HLAVINKOVÁ EVA. *Potencionální náhrada vysokopecní strusky ve směsných portlandských cementech* [online]. B.m., 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53980
- [31] MYSLIVEC THEODOR. *Fyzikálně chemické základy ocelářství*. SNTL. 1965.
- [32] ING. JAN VALENTIN, PH.D., MGR. MILOŠ FALTUS, PH.D., ING. MAREK MALOHLAVA. *Inovativní technologie využití anorganických průmyslových odpadů nebo vedlejších produktů*. 10. duben 2018
- [33] ING. TOMÁŠ VAČEK. *Testování možností využívání druhotných surovin jako náhrady přírodních kameniv* [online]. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=76376
- [34] ČSN EN 1008 *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2003
- [35] REGOURD, M. *Slags and slag cements. Cement replacement materials*. University of Sheffield: University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, 1986.
- [36] ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review*. B.m.: Construction and Building Materials, 2016.
- [37] ING. ONDŘEJ ZOBAL, PH.D. *Pilotní ověření vybraných vlastností 3 typů strusek*. B.m.: Katedra mechaniky, Fakulta stavební ČVUT v Praze Thákurova 7, 166 29 Praha 6. 03 2019
- [38] DESTRO; POSKYTNUTO SKRZE FAKULTU STAVEBNÍ ČVUT V PRAZE. *Granulometrie - mletá struska, Kladno* [online]. B.m.: DESTRO. Dostupné z: <http://destro.cz/>
- [39] ING. ZDENĚK PROŠEK a ING. JAN TREJBAL. *Conslag (TJ01000435) – Příloha č. 3 - Optimalizace vysokorychlostního mletí a aktivace strusek z hlediska vlastností výsledného pojiva na bázi strusky*. 2019.
- [40] *Granulometrie - mletá struska, Třinecké železářny*. B.m.: Poskytnuto skrze Fakultu stavební ČVUT v Praze
- [41] IMG. JANA MIČICOVÁ. *Protokol zkušební laboratoře o kontrolní zkoušce vysokopecní granulované strusky dle TDP - 377/17. 070–054258*. 2018.
- [42] MILOŠ FALTUS, MGR. *Nové typy hydraulických pojiv na bázi odpadních materiálů*. B.m.: Dastit management, spol. s r.o.

- [43] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2012. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [44] Zrnitost zemin. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zrnitost_zemin
- [45] 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 [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2014. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [46] ČSN EN 1097-5 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. jen 2008. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [47] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení maximální objemové hmotnosti zkušebního tělesa [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2012. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [48] ČSN EN 12697-29 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2003. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [49] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2010. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [50] ČSN EN 13286-42 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsi stmelených hydraulickými pojivy [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. leden 2004. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [51] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2019. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [52] ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese [online]. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2011. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/unmz>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Požadavky na recyklované nestmelené směsi	- 13 -
Tabulka 2 - Požadavky na recyklované stmelené směsi	- 14 -
Tabulka 3 - Kontrolní zkoušky nestmelených recyklovaných směsí	- 25 -
Tabulka 4 - Kontrolní zkoušky nestmelených recyklovaných vrstev	- 26 -
Tabulka 5 - Kontrolní zkoušky stmelených recyklovaných směsí	- 26 -
Tabulka 6 - Kontrolní zkoušky stmelených recyklovaných vrstev (geometrické char.)	- 27 -
Tabulka 7 - Kontrolní zkoušky stmelených recyklovaných vrstev (mechanické vlastnosti)	- 27 -
Tabulka 8 - Požadavky na recyklované kamenivo pro nestmelené směsi	- 29 -
Tabulka 9 - Požadavky na recyklované kamenivo pro stmelené vrstvy	- 29 -
Tabulka 10 - Poměry jednotlivých složek cementu v procentech.....	- 32 -
Tabulka 11 - Symboly a jejich význam při značení asfaltových emulzí.....	- 35 -
Tabulka 12 - Orientační hodnoty chemického složení metalurgických strusek [%].....	- 41 -
Tabulka 13 - Materiálové složení referenční směsi	- 52 -
Tabulka 14 - Zastoupení jednotlivých komponent v navržených zkušebních směsích [%] ..	- 53 -
Tabulka 15 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-PT, stanovené XRF analýzou.....	- 54 -
Tabulka 16 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-KVP, stanovené XRF analýzou..	- 55 -
Tabulka 17 - Chemické složení vysokopecní strusky MS-GT, stanovené XRD analýzou....	- 56 -
Tabulka 18 - Chemické složení pojivové báze DASTIT®, stanovené CRF analýzou	- 56 -
Tabulka 19 - Doporučené požadavky na zrnitost směsí při použití hydraulických pojiv....	- 61 -
Tabulka 20 - Doporučené požadavky na zrnitost směsí při použití asfaltových pojiv	- 61 -
Tabulka 21 - Rozměry Proctorových moždířů	- 62 -
Tabulka 22 - Požadované rozměry zkušebních těles pro stanovení modulu tuhosti	- 70 -
Tabulka 23 - Výsledky zkoušky síťového rozboru.....	- 74 -
Tabulka 24 - Proctorova zkouška plniva ($\check{S}D_A + R$ -materiál)	- 76 -
Tabulka 25 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs REF.....	- 78 -
Tabulka 26 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs A	- 79 -
Tabulka 27 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs B	- 80 -
Tabulka 28 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs C	- 81 -
Tabulka 29 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs D.....	- 82 -
Tabulka 30 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs E	- 83 -
Tabulka 31 - Objemová hmotnost zkušebních těles - směs F	- 84 -
Tabulka 32 - Objemové hmotnosti zkušebních těles - Celkový přehled výsledků	- 84 -

Tabulka 33 - <i>Výsledky zkoušky stanovení maximální objemové hmotnosti směsi</i>	- 85 -
Tabulka 34 - <i>Výsledky zkoušky mezerovitosti</i>	- 86 -
Tabulka 35 - <i>Výsledky zkoušky stanovení skutečné vlhkosti směsí</i>	- 87 -
Tabulka 36 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs REF</i>	- 88 -
Tabulka 37 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs A</i>	- 89 -
Tabulka 38 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs B</i>	- 89 -
Tabulka 39 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs C</i>	- 90 -
Tabulka 40 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs D</i>	- 90 -
Tabulka 41 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs E</i>	- 91 -
Tabulka 42 - <i>Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní) - směs F</i>	- 91 -
Tabulka 43 - <i>Výsledné pevnosti v příčném tahu (28; 56 dní) - všechny směsi</i>	- 92 -
Tabulka 44 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs REF</i>	- 96 -
Tabulka 45 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs A</i>	- 97 -
Tabulka 46 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs B</i>	- 98 -
Tabulka 47 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs C</i>	- 99 -
Tabulka 48 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs D</i>	- 100 -
Tabulka 49 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs E</i>	- 101 -
Tabulka 50 - <i>Výsledky modulu tuhosti (28 dní) - směs F</i>	- 102 -
Tabulka 51 - <i>Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs REF</i>	- 103 -
Tabulka 52 - <i>Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs A</i>	- 103 -
Tabulka 53 - <i>Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs B</i>	- 104 -
Tabulka 54 - <i>Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs C</i>	- 104 -
Tabulka 55 - <i>Výsledky modulu tuhosti (56 dní) - směs D</i>	- 105 -
Tabulka 56 - <i>Výsledné hodnoty modulů tuhosti - 28 dní</i>	- 105 -
Tabulka 57 - <i>Výsledné hodnoty modulů tuhosti - 56 dní</i>	- 105 -
Tabulka 58 - <i>Výsledky zkoušky šíření trhliny ohybem - směsi REF, A, B, C</i>	- 107 -
Tabulka 59 - <i>Výsledky zkoušky šíření trhliny ohybem - směsi D, E, F</i>	- 108 -
Tabulka 60 - <i>Finanční porovnání zvolených receptur</i>	- 111 -
Tabulka 61 - <i>Celkové výsledky experimentu</i>	- 115 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma konstrukce vozovky	- 12 -
Obrázek 2 - Životní cyklus materiálů	- 15 -
Obrázek 3 - Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu.....	- 18 -
Obrázek 4 - Metoda Drum-mix, přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu	- 18 -
Obrázek 5 - Princip technologie Repave	- 20 -
Obrázek 6 - Pracovní postup při Remixu	- 20 -
Obrázek 7 - Pracovní postup Remix plus	- 21 -
Obrázek 8 - Recyklační kolona (zemní fréza/recyklér, zásobní vozidlo na asfaltové pojivo, kropicí vůz)	- 24 -
Obrázek 9 - Princip recyklace netuhých vozovek za studena	- 24 -
Obrázek 10 - Schéma výroby zpěněného asfaltu.....	- 33 -
Obrázek 11 - Zařízení pro výrobu asfaltové emulze v laboratoři.....	- 36 -
Obrázek 12 - Struktura asfaltové emulze pod mikroskopem	- 36 -
Obrázek 13 - Schéma procesu výroby železa a oceli	- 37 -
Obrázek 14 - Vysoká tavící pec.....	- 40 -
Obrázek 15 - Vysokopeční struska chlazená vzduchem (vlevo) a granulovaná vysokopeční struska (vpravo).....	- 43 -
Obrázek 16 – Použité materiály: R-materiál 0/11 (vlevo); ŠD _A 0/32 (vpravo).....	- 51 -
Obrázek 17 - Mísení směsi v laboratorní míchačce (vlevo); Ověření optimální vlhkosti metodou koule (vpravo).....	- 52 -
Obrázek 18 - Granulometrie strusky MS-KVP	- 54 -
Obrázek 19 - Granulometrie strusky MS-GT.....	- 55 -
Obrázek 20 - Použité vysokopeční strusky.....	- 56 -
Obrázek 21 - Ruční hydraulický lis (vlevo); Vyhotovené zkušební válcové těleso pro zkoušku pevnosti v příčném tahu (vpravo)	- 58 -
Obrázek 23 - Zatěžovací schéma zkoušky modulu tuhosti.....	- 70 -
Obrázek 24 – Výsledná křivka zrnitosti	- 75 -
Obrázek 26 - Proctorova zkouška	- 77 -
Obrázek 27 - Stanovení rozměrů zkušebních těles posuvným měřítkem	- 78 -
Obrázek 28 - Temperování pyknometru ve vodní lázni	- 85 -
Obrázek 29 - Sušení vyrobené stmelené směsi v laboratorní sušárně	- 87 -

Obrázek 30 - <i>Přístroj pro stanovení pevnosti v příčném tahu (vlevo); Porušené těleso po zkoušce v příčném tahu vyrobeného ze směsi B (vpravo)</i>	- 88 -
Obrázek 31 - <i>Zkouška modulu tuhosti v NATu</i>	- 96 -
Obrázek 32 - <i>Výpočetní technika pro stanovení modulu tuhosti v NATu.....</i>	- 97 -
Obrázek 33 – <i>Detail porušení zkušebního půlválcového tělesa ohybem - směs F.....</i>	- 108 -
Obrázek 34 – <i>Detail provedení zkoušky šíření trhliny ohybem</i>	- 109 -

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Proctorův graf ($\check{S}D_A + R$ -materiál).....	- 76 -
Graf 2 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 7+7 dní)	- 93 -
Graf 3 - Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu (7; 28 a 56 dní)	- 93 -
Graf 4 – Výsledky zkoušky odolnosti proti vodě (7 + 7 dní).....	- 94 -
Graf 5 - Naměřené moduly tuhosti při teplotě 15 °C	- 106 -
Graf 6 - Výsledky odolnosti materiálu vůči lomu.....	- 109 -

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AE – Asfaltová kationaktivní emulze

CEM – Cement

ČR – Česká republika

ČSN – Česká státní norma

ČVUT – České vysoké učení technické v Praze

EN – Evropská norma

KZP – Kontrolní a zkušební plán

OH – Objemová hmotnost

PC – Osobní počítač

PD – Projektová dokumentace

PHM – Pohonné hmoty

PK – Pozemní komunikace

RS – Recyklace za studena

ŠD – Štěrkodrt'

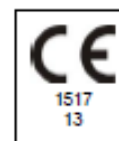
TP – Technické podmínky

TKP – Technické kvalitativní podmínky

8 DOKLADOVÁ ČÁST

Prohlášení o vlastnostech přírodního drceného kameniva frakce 0/32 (ŠDa)

Prohlášení o vlastnostech č. 191A/9
podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: 121A2000004 PLAŇANY
- Typové označení výrobku: Přírodní drcené kamenivo – frakce 0/32 (ŠDa)
- Zamýšlená použití stavebního výrobku:
Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivky pro inženýrské stavby a pozemní komunikace
- Výrobce: EUROVIA Kamenolomy, a.s., Londýnská ul. 63779a, 460 01 Liberec XI – Růžodol I, IČ: 27 09 66 70
- Zplnomocněný zástupce: -
- Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebního výrobku: 2+
- Oznámený subjekt: Stavcert, s. r. o., U Výstaviště 3, 170 00 Praha 7, oznámený subjekt č. 1517
provedl počáteční inspekci ve výrobním závodě a systému řízení výroby, provádí průběžný dozor, posuzování a hodnocení systému řízení výroby, a vydal Osvědčení o shodě řízení výroby (Certifikát SRV) č.: 1517-CPR- 010082.
- Evropské technické posouzení: nebylo vydáno
- Vlastnosti uvedené v prohlášení: viz tabulka

Základní charakteristiky	Vlastnost	Harmonizovaná technická specifikace
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost		EN 12424:2002+A1:2007
- Zrnitost	G _{0,65}	
- Tolerance pro zrnitost HK s D/d ≈ 2	NPD	
- Tolerance pro typickou zrnitost DK a směsi	G _{T,10}	
- Tvar zrn hrubého kameniva – Index plochosti	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – tvarový index	S ₁₀	
- Procentní podíl drcených a lámavých zrn v HK	C ₁₀₀	
- Objemová hmotnost	2,756 Mg/m ³	
Cistota		
- Obsah jemných částic	f ₀	
- Kvalita jemných částic	SE ₁₅	
Odolnost proti drcení		
- Součinitel Los Angeles	LA ₁₀	
- Hodnota držitelnosti v rázu	NPD	
Objemová stálost		
- Rozpad křemíčitánu vápenatého ve VCHVS	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	
- Objemová stálost kameniva z ocelářské strusky	NPD	
Nasákavost		
- Nasákavost	WA ₂₄ 2	
Složky		
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	NPD	
- Obsah vodou rozpustných síranů	SS _{0,2}	
- Síran rozpustné v kyselině	AS _{0,2}	
- Celková síra	S ₁	
- Potenciální přítomnost humusu	NPD	
Odolnost proti otěru		
- Odolnost proti otěru	NPD	
Nebezpečné látky		
- Obsah přírodních radionuklidů	Ra 226 ≤ 100 Bq/kg / Index ≤ 1,0	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	
Odolnost vůči povětrnosti		
- Ztráta hmotnosti po vaření	NPD	
- Zvýšení součinitele LA po vaření	NPD	
Trvanlivost vůči zmrazování a rozmrazování		
- Nasákavost do ustálené hmotnosti	NPD	
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	F ₂	
- Zkouška síranem hořečnatým	MS ₁₀	
Petrografický druh kameniva	rula	

10. Vlastnosti výrobku jsou ve shodě s vlastnostmi uvedenými v bodě 9.

Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4. Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

V Liberci, 1. 1. 2016	Jméno a funkce	Ing. Zuzana Sazimová, vedoucí technolog	Podpis	
-----------------------	----------------	---	--------	--

Označení výrobku a prohlášení o shodě kameniva

Identifikační kód výrobku: 121A2000004 PLAŇANY

OZNAČENÍ VÝROBKU A PROHLÁŠENÍ O SHODĚ

Výrobce:

EUROVIA Kamenolomy, a.s.
Londýnská 637/79a, 460 01 Liberec XI – Růžodol I.
IČ: 270 96 670

Provozovna: **PLAŇANY**

Prohlašuje, že dodaný výrobek - nestmelená směs, je ve shodě s

ČSN EN 13285* - Nestmelené směsi - Specifikace

a národní přílohou NA k této normě, která obsahuje doplňující ustanovení a rozsah hodnot nebo mezních hodnot vlastností používaných v ČR.

Označení směsi:

1. Název výrobku:	Štěrkodrt' - ŠD _A
2. Frakce kameniva d/D:	0/32
3. Použité kamenivo:	Výrobek je směsí drobného a hrubého drceného kameniva podle ČSN EN 13242+A1
4. Použití výrobku:	Nestmelená směs ŠD je zrnitý materiál s kontrolovanou zrnitostí od dolního síta $d = 0$, který se obvykle používá v podkladních nebo ochranných vrstvách vozovky.
Provozovna	PLAŇANY

Rozsah a mezní hodnoty vlastností:

Článek	Vlastnost	Deklarace/Kategorie
NA. 3	Typ směsi	Ostatní směs, všeobecný interval zrnitosti
4.3.2, tabulka 2	Maximální obsah jemných částic	UF ₉
4.3.2, tabulka 3	Minimální obsah jemných částic	LF ₂
4.3.3, tabulka 4	Nadsítně	OC ₂₅
4.4.1, tabulka 6	Požadavky na zrnitost	G ₂
4.4.2, tabulka 7 a 8	Zrnitost jednotlivých dávek	NPD
4.5	Ostatní požadavky	NPD
	Otlukovost - LA	LA ₄₀
	Mrazuvzdornost (deklarovaná hodnota)	0,8
NA. 4.5	CBR po sycení ve vodě po dobu 96 hodin	NPD
5.3	Laboratorní srovnávací objemová hmotnost, stanovená dle ČSN EN 13288-2	2180 kg/m ³
5.3	Optimální vlhkost	3,5 %
ČSN 73 6126-1	Vlhkost	NPD
5.4	Obsah vodou rozpustných síranů	NPD

V Liberci, 1. 1. 2015	Jméno a funkce	Ing. Zuzana Sazimová, vedoucí technolog	Podpis	
-----------------------	----------------	---	--------	--

*Vždy v aktuálním platném znění


Ing. Zuzana Sazimová

Prohlášení o vlastnostech cementu CEM II/B-S 32,5 R

Prohlášení o vlastnostech

č. 1020-CPR-040 018263

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:
Portlandský struskový cement EN 197-1 – CEM II/B-S 32,5 R
2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití:
Příprava betonu, malty, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a pro výrobu stavebních výrobků
3. Výrobce:
**Českomoravský cement, a.s., Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov, Česká republika,
Závod Radotín**
4. Systém POSV:
1+
5. Harmonizovaná norma:
EN 197-1:2011
Oznámený subjekt:
Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, NB 1020
6. Deklarované vlastnosti

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Cement pro obecné použití - složení	CEM II/B-S	EN 197-1:2011
Pevnost v tlaku (počáteční a normalizovaná pevnost)	32,5 R	
Počátek tuhnutí	splněno	
Objemová stálost	splněno	
Obsah síranů	splněno	
Obsah chloridů	splněno	

Toto prohlášení o vlastnostech je zpřístupněno na internetové stránce výrobce: [www.cmcem.cz]

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

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Ing. Petr Schořik



V Mokrém dne 4.12.2017

Tímto se ruší vydání prohlášení o vlastnostech ze dne 01.07.2013

Osvědření o stálosti vlastností cementu CEM II/B-S 32,5 R



TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.
Technical and Test Institute for Construction Prague, SOE

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznamovaný subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán • Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body • Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

Oznamovaný subjekt 1020

OSVĚDČENÍ O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ

certificate of constancy of performance

č. 1020 – CPR – 040 018263

V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích nebo CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:

Portlandský struskový cement EN 197-1 – CEM II / B-S 32,5 R

Výrobek je určen pro přípravu betonu, malt, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a výrobu stavebních výrobků.

uvedený na trh pod jménem nebo firmou nebo ochrannou známkou výrobce:

Českomoravský cement, a. s.

Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov

IČO: 26 20 95 78

a vyrobený ve výrobním závodě:

závod Radotín

K cementárně 1261/25, 153 02 Praha 5 - Radotín

Toto osvědčení prokazuje, že všechna ustanovení týkající se posuzování a ověřování stálosti vlastností popsaná v příloze ZA normy

EN 197-1:2011

podle systému 1+ pro vlastnosti uvedené v tomto osvědčení byla uplatněna a že řízení výroby u výrobce zajišťuje

stálost vlastností stavebního výrobku

Toto osvědčení bylo poprvé vydáno **1. dubna 2004** jako certifikát podle CPD a zůstává v platnosti, dokud se harmonizovaná norma, stavební výrobek, postupy posuzování a ověřování stálosti vlastností ani výrobní podmínky v místě výroby výrazně nezmění nebo pokud oznamovaný subjekt pro osvědčení výrobku nepozastaví nebo nezruší platnost tohoto osvědčení.

Teplice, 4. prosince 2017



Ing. Pavel Rubáš, Ph.D.
zástupce vedoucího oznamovaného subjektu

Asfaltová kationaktivní emulze EMULTECH P

SPECIÁLNÍ MÍSITELNÁ S CEMENTEM

EMULTECH®P (C60B7 dle ČSN EN 13808)

Kationaktivní emulze se silničním asfaltem 70/100 ČSN EN 12591 bez fluxantu.

POUŽITÍ

Pro technologii recyklace za studena s emulzí a cementem.

Výborná mísitelnost s cementem umožňuje i použití v míšícím centru s dopravou směsi na staveniště do cca 1 hodiny po vyrobení.

CHARAKTERISTIKY

Vlastnost		Hodnota	Zkouška dle
Obsah pojiva	%	58 - 62	ČSN EN 1428
Mísitelnost s cementem	g	≤ 2	ČSN EN 12848
Doba výtoku 2 mm při 40°C	s	15 - 45	ČSN EN 12846
Zbytek na sítu 0,5 mm	%	≤ 0,05	ČSN EN 1429
Zbytek na sítu 0,5 mm po 7 dnech skladování	%	≤ 0,01	ČSN EN 1429
Bod měknutí z pětně získaného pojiva	°C	≥ 43	ČSN EN 13074 ČSN EN 1427
Přilnavost ponořením do vody metoda kamenivem	%	≥ 75 *)	ČSN EN 13614

*) V souladu s ČSN EN jde o hodnotu na referenčním kamenivu. Pro konkrétní druh kameniva je hodnotu přilnavosti nutno ověřit.

EMULTECH®P je registrovaná obchodní značka.

VÝROBCE

EUROVIA CS, a. s., závod Emulze Kolín podle receptury EUROVIA Services, s. r. o.

Na společné cestě

