



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

POKROČILÝ MATERIÁL PRO ZŘÍZENÍ VRSTVY ZEMNÍHO TĚLESA NA BÁZI DRUHOTNÝCH SUROVIN

ADVANCED MATERIAL BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS FOR CONSTRUCTION
OF SUBGRADE LAYER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Jakub Hrubý

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jakub Hrubý
Název	Pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin
Vedoucí práce	Ing. Vít Černý, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- KUDRNA, J. Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2006.
- KRENÍKOVÁ V. Odpady a druhotné suroviny II. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2014.
- NEJEZCHLEB, M. Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku modernizovaných tratí.
- ŽDÁRA, Z. Recykláty do podkladních vrstev vozovek. Brno, 2019
- BELL, F. G. Ground engineer's reference book. Boston: Butterworths, 1987.
- SŽDC S4 – Železniční spodek. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2008.
- TP170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR. 2004.
- ČSN 73 6133 Návrh a provádění pozemního tělesa pozemních komunikací, 2010.
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Při návrhu a provádění konstrukce železničního spodku jsou v současnosti využívány téměř výhradně primární suroviny ve formě zemin, štěrkodrtí a štěrku. Využití druhotných surovin a odpadů je velmi omezené. Současné trendy však směřují k maximálnímu zefektivnění využívání druhotných surovin a k potlačení jejich skládkování. Optimální variantou je pak vytvoření nového materiálu čistě na bázi druhotných surovin. Cílem práce je vyvinout nový pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin.

1. Z dostupných informačních zdrojů zpracujte rešerši poznatků, týkajících se problematiky konstrukčních vrstev a zemního tělesa železničního spodku.
 2. Na základě studia odborné literatury se zaměřte na možnosti vytvoření podkladních vrstev dopravních staveb z druhotných surovin.
 3. Sestavte široký soubor druhotných surovin na bázi odpadů, recyklátů a vedlejších produktů, potenciálně vhodných pro podkladní vrstvy železničního spodku.
 4. Sestavte metodiku vývoje pokročilého materiálu na bázi stmelovaných směsí, výhradně z druhotných surovin a vhodných pojiv.
 5. Vyberte a charakterizujte suroviny, vhodné pro experimentální ověření v podkladních vrstvách železničního spodku.
 6. Sestavte a experimentálně ověřte receptury pro materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa. Vyberte užší soubor surovinových variant pro následující fázi testování.
 7. Proveďte pokročilé testování vybraných surovinových variant. Zhodnoťte dosažené výsledky a vyberte optimální variantu.
- Předpokládaný rozsah diplomové práce minimálně 60-80 stran včetně tabulkové a grafické přílohy.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Vít Černý, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou vývoje nového materiálu pro zřízení vrstvy zemního tělesa železničního spodku čistě na bázi druhotných surovin. V teoretické části je uvedena charakteristika konstrukčních vrstev, používané materiály pro stmelené podkladní vrstvy včetně jejich požadavků. Dále jsou uvedeny obecné podmínky pro vytvoření podkladních vrstev z čistě druhotných surovin a dosavadní zkušenosti s danou problematikou. V úvodu experimentální části diplomové práce jsou stanoveny základní parametry druhotných surovin (stavební recykláty, odpad z čištění kolejového lože, odprašky z cementárny) a vedlejších energetických produktu (popílky, uhelná škvára a škvára ze spalovny komunálního odpadu), které společně tvoří surovinovou bázi. Na surovinách se stanovila zrnitost, nasákavost, vlhkost, sypné hmotnosti, chemický rozbor a obsah škodlivin. U stmelěných směsí byly stanoveny objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku. Optimální vlhkost všech směsí byla stanovena zkouškou Proctor standard. Experimentální ověřování se věnovalo testování stmelěných směsí s cílem ověření vlivu dávky cementu, kdy byla původní dávka z 8 % v rámci optimalizace u stavebních recyklátů a škváry ze spalovny komunálního odpadu snížena na 4 %, kvůli dosažení vysokých pevností pohybujících se v rozmezí 4,5 až 6,0 MPa. Další optimalizace rovněž zahrnovala i přidavek vedlejšího energetického produktu v podílu 10% příměsí z hmotnosti druhotné suroviny. V závěru experimentální části byly vybrány dvě optimální receptury (betonový recyklát s 4 % cementu a 10% příměsí fluidního popílku; škvára ze spalovny komunálního odpadu s 3 % cementu a 10% příměsí fluidního popílku), které se podrobily pokročilému testování formě mrazuvzdornosti a odolnosti proti vodě a byl proveden návrh funkčního vzorku. Finálním funkčním vzorkem je betonový recyklát s cementem a 10% přídavkem fluidního popílku, který je vhodný pro vrstvy aktivní zóny bez zatížení mrazem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Železniční těleso, cement, druhotná surovina, stavební recyklát, vedlejší energetický produkt, surovina, stmelená směs, primární ověřování, optimalizace, pokročilé testování

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the development of a new material for the establishment of a layer of the ground body of a railway undercarriage purely on the basis of secondary raw materials. The theoretical part presents the characteristics of structural layers, materials used for bonded substrates, including their requirements. The following are the general conditions for the creation of base layers from purely secondary raw materials and previous experience with the issue. The introduction of the experimental part of the thesis sets out the basic parameters of secondary raw materials (construction recycles, waste from railway bed cleaning, dust from cement plant) and energy by-products (fly ash, coal slag and municipal waste incinerator), which together form the raw material base. Grain size, absorbency, moisture, bulk density, chemical analysis and pollutant content were determined on the raw materials. Bulk densities and compressive strengths of the bonded mixtures were determined. The optimum humidity of all mixtures was determined by the Proctor standard test. Experimental verification was performed on testing of bonded mixtures in order to verify the effect of cement dose, when the original dose of 8% was optimized for construction recycled and slag from municipal waste incinerator to 4%, due to high strengths ranging from 4.5 to 6.0 MPa. Further optimization also included the addition of an energy by-product in a proportion of 10% of the weight of the secondary raw material. At the end of the experimental part, two optimal recipes were selected (recycled concrete with 4% cement and 10% fluid fly ash; slag from a municipal waste incinerator with 3% cement and 10% fluid fly ash), which underwent advanced testing in the form of frost resistance and resistance to water and a functional sample was designed. The final functional sample is recycled concrete with cement and 10% addition of fluid fly ash, which is suitable for core layers without frost loading.

KEYWORDS

Railway body, cement, secondary raw material, recycled building material, energy by-product, raw material, cemented mixture, primary verification, optimization, advanced testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jakub Hrubý *Pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin*. Brno, 2022. 92 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Vít Černý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14.01.2022

Bc. Jakub Hrubý

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.01.2022

Bc. Jakub Hrubý

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Vítu Černému Ph. D. za čas a odborné vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA za cenné rady a čas, který mi věnoval v průběhu vypracování diplomové práce.

Poděkování také patří Centru AdMaS za možnost využití zázemí a přístrojového vybavení při řešení projektu FV40081 „Pokročilé technologie zřízení a obnovy konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku s efektivním využitím materiálů z druhotných surovin“, podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině za podporu v průběhu studia a při zpracování této práce.

OBSAH

ÚVOD	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1. Charakteristika konstrukčních vrstev	12
1.1. Železniční těleso.....	12
1.2. Stmelené podkladní vrstvy	12
1.3. Nestmelené podkladní vrstvy	15
2. Materiály pro stmelené podkladní vrstvy	20
2.1. Pojiva.....	20
2.1.1. Cement	20
2.1.2. Hydraulické vápno	22
2.1.3. Popílek	22
2.1.4. Vysokopecní struska	22
2.1.5. Odprašky z cementárny	22
2.2. Kamenivo	23
2.2.1. Přírodní kamenivo.....	23
2.2.2. Recyklované kamenivo	24
2.2.3. Stavební recykláty.....	25
2.2.4. Odpad z čistění kolejového lože (ŽZO).....	26
2.2.5. Odpad z autodomíchávače	26
2.3. Vedlejší energetické produkty.....	26
2.3.1. Popeloviny ze spalování uhlí	26
2.3.2. Škvára ze spalovny komunálních odpadů.....	28
3. Požadavky na směsi stmelené cementem	28
3.1. Požadavky na pojivo	28
3.2. Požadavky na kamenivo.....	29
3.3. Požadavky na vodu	29
3.4. Požadavky na směs	29
3.4.1. Systém I	29
3.4.2. Systém II.....	29
4. Podmínky pro vytvoření podkladních vrstev čistě z druhotných surovin	30
4.1. SŽDC: Obecné technické podmínky č.j. 25 640/06.....	30
4.2. Potřebné parametry pro jejich zapojení.....	31

4.3.	Problematické vlastnosti	34
4.4.	Výhody.....	35
5.	Ekonomické hledisko	35
6.	Rešerše dosavadního výzkumu.....	36
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST		37
1.	Cíl práce.....	37
2.	Metodika diplomové práce	38
3.	Metodika zkoušení.....	42
3.1.	Zkoušení surovin.....	42
3.1.1.	Sypná hmotnost setřeseného kameniva	42
3.1.2.	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	42
3.1.3.	Stanovení vlhkosti.....	42
3.1.4.	Zkouška zrnitosti – Sítový rozbor.....	43
3.1.5.	Stanovení nasákavosti.....	43
3.1.6.	Chemický rozbor.....	44
3.2.	Metodika zkoušení stmelovaných směsí	44
3.2.1.	Zkouška Proctor standard	44
3.2.2.	Stanovení objemové hmotnosti.....	46
3.2.3.	Stanovení pevnosti v prostém tlaku	46
3.2.4.	Stanovení odolnosti proti mrazu a vodě	47
4.	Etapa 1 – Výběr surovinové báze – druhotné suroviny	48
4.1.	Výběr vhodných druhotných surovin.....	48
4.2.	Analýza vstupních surovin.....	48
4.2.1.	Stavební recykláty.....	49
4.2.2.	Vedlejší energetické produkty	50
4.2.3.	Pojivo – Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.....	51
4.3.	Vstupní parametry druhotných surovin.....	51
4.4.	Dílčí zhodnocení etapy 1	54
4.5.	Obsah škodlivin a chemický rozbor surovin.....	55
4.6.	Zhodnocení etapy 1	58
5.	Etapa 2 – Pilotní ověřování surovinových směsí	59
5.1.	Základní testování	59
5.1.1.	Zhodnocení základního testování	63

5.2.	Optimalizace dávky pojiva.....	64
5.3.	Zhodnocení etapy 2	67
6.	Etapa 3 – Optimalizace surovinových směsí.....	68
6.1.	Zhodnocení etapy 3	72
7.	Etapa 4 – Pokročilé testování směsí.....	74
7.1.	Odolnost proti mrazu a vodě na vybraných recepturách.....	74
7.2.	Zhodnocení etapy 4	77
7.3.	Návrh funkčního vzorku	78
8.	Závěr.....	79
	Použitá literatura a zdroje	81
	Seznam zkratk a symbolů.....	87
	Seznam tabulek	90
	Seznam grafů.....	91
	Seznam obrázků.....	92

ÚVOD

S rostoucím důrazem na ekologii, zvyšující se na ohleduplnost k životnímu prostředí a udržitelnost je zapotřebí recyklovat původní materiály nebo vytvářet úplně nové tak, aby nedošlo v průběhu několika desítek let k vyčerpání neobnovitelných zdrojů. Pokročilé technologie při zřízení a obnovy konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku s efektivním využitím materiálů z druhotných surovin je poměrně nová oblast výzkumu, která dává prostor vyhovět požadavkům dnešní doby. Jedná se o unikátní technologii, která je založena na zcela nových materiálech pro konstrukční vrstvy železničního spodku s důrazem na vysoký podíl druhotných surovin především na bázi odpadu a vedlejších energetických surovin.

Hlavním předmětem diplomové práce je snaha vytvořit a ověřit funkční pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin. Proto je nutné aktivně se zabývat touto problematikou tak, aby v budoucnu nedošlo k úplnému vyčerpání přírodních zdrojů. Tuto myšlenku má podpořit účelné využití co nejvíce lokálních zdrojů při současné minimalizaci zátěže životního prostředí v rámci dopravy. Velkou roli hraje možnost a způsob recyklace samotného stavebního odpadu včetně jeho opětovného použití.

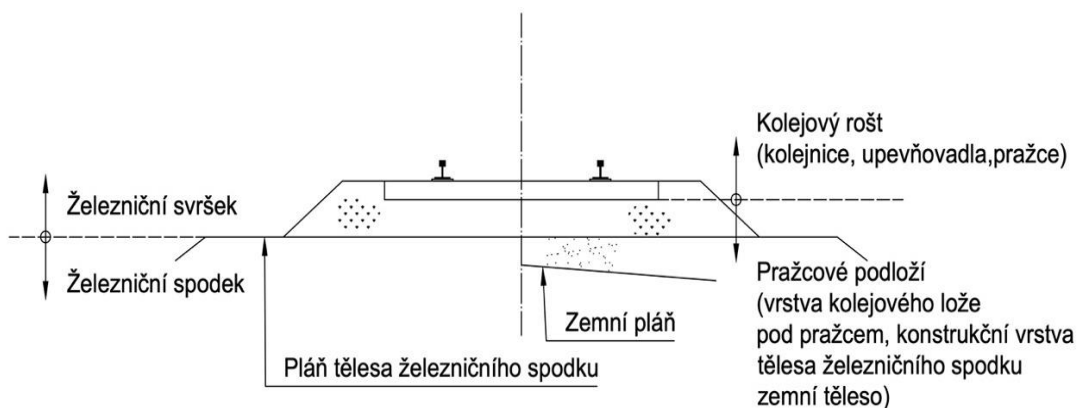
Vzhledem ke skutečnostem bude v rámci diplomové práce proveden výzkum se zaměřením na vytvoření nového materiálu vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin. Jelikož se jedná o docela neprobádanou oblast materiálů, dává tato problematika diplomové práci vhodný prostor pro jejich samotný výzkum.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Charakteristika konstrukčních vrstev

1.1. Železniční těleso

Železniční těleso se skládá ze dvou částí. Horní vrstvy označované jako železniční svršek a spodní vrstvy označované jako železniční spodek. Železniční spodek je tvořen z více částí, které dohromady tvoří jednu ze základních částí trati. Složení železničního spodku je možné vidět na obrázek 1. Samotný železniční spodek je tvořen zemním tělesem, konstrukčními vrstvami železničního spodku a odvodňovacím zařízením. Při jeho návrhu a realizaci je nutné, aby výsledný železniční spodek vyhovoval ustanovením z předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek. Těleso železničního spodku je zapotřebí konstruovat tak, aby zabezpečovalo geometrické parametry kolejiště a rovněž zajistilo přenášení zatížení od železničních vozidel bez deformace. Kolejové lože je složeno z několika dílčích vrstev. Jedná se zejména o nestmelené, nestmelené vrstvy a konstrukční prvky. [1]



Obrázek 1: Řez technickými vrstvami kolejiště [2]

1.2. Stmelené podkladní vrstvy

Vrstvy stmelené hydraulickým pojivem využívají cement či jinou hydraulickou maltovinu zajišťující smykovou pevnost směsi. Jako kostra materiálu se často používá přírodní či recyklované kamenivo a vedlejší produkty. Výhodou je uplatnění druhotných

surovin, nižší tloušťka konstrukce vozovky, nevýhodou je však větší technologická náročnost výroby. [3]

Charakteristika jednotlivých směsí je na základě pevnosti v tlaku (tabulka 1) nebo podle druhu použitého hydraulického pojiva. [4]

Tabulka 1: Pevnostní třídy stmelných vrstev [5]

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

a) Pokud je štíhlostní poměr válcových zkušebních těles v rozmezí 0,8 až 1,21, postupuje se stejně jako při štíhlostním poměru 1.

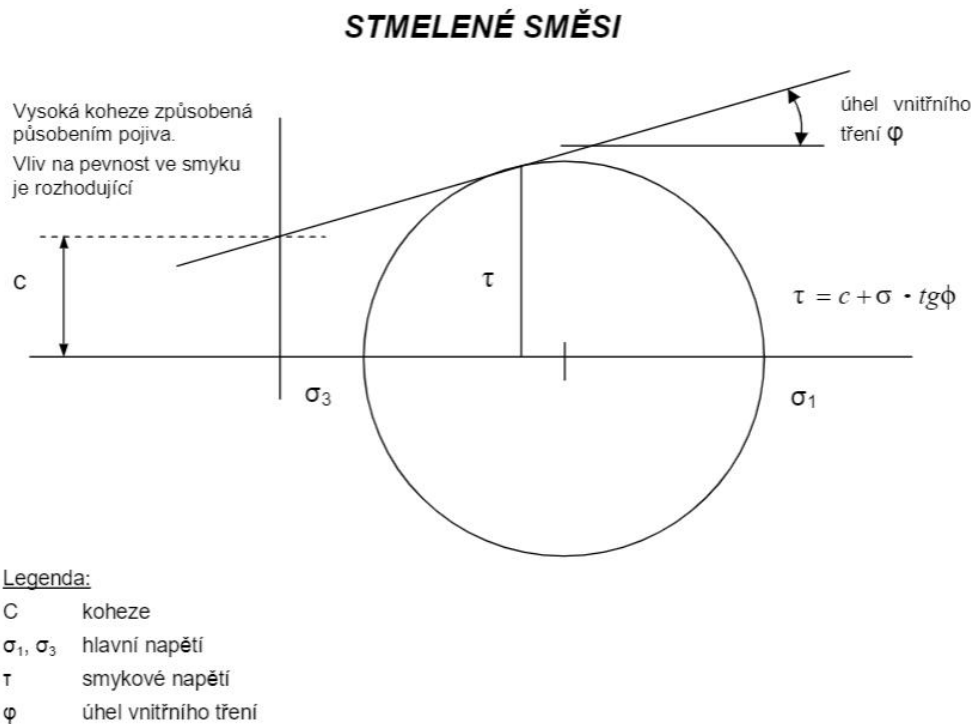
b) Bude-li požadováno, je možné použít i mezilehlé hodnoty například podle ČSN EN 14227-1.

Označení podle druhu použitého hydraulického pojiva:

- SC --- směs stmelená cementem
- SS --- směs stmelená struskou
- SP --- směs stmelená popílkem
- SH --- směs stmelená hydraulickým silničními pojivy [4]

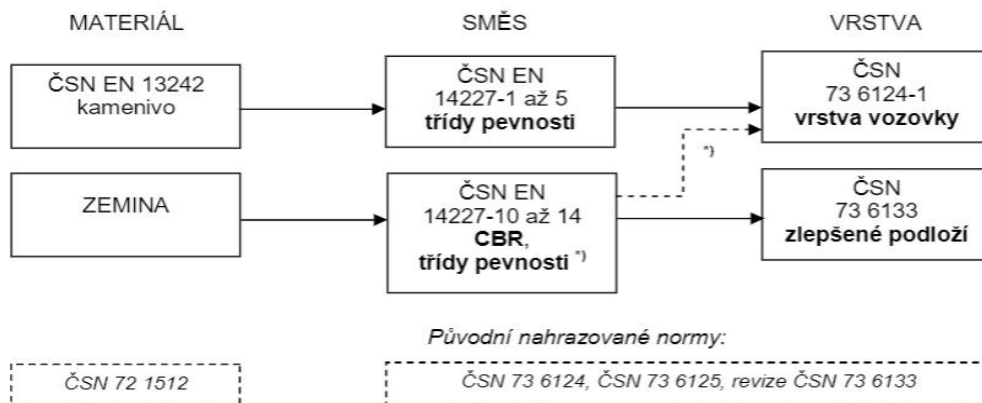
Stmelené podkladní vrstvy využívají vysoké koheze pro zajištění soudržnosti ve smyku – viz. obrázek 2. Použití hydraulického pojiva má za následek vysoký modul pružnosti při relativně nízké pevnosti. To znamená, že i malá deformace má za následek velké napětí, které způsobuje vznik mikrotrhlin. Ty významně snižují pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, naopak na smykovou pevnost nemají žádný vliv, neboť působí v jiném směru než smykové síly. S rostoucím množstvím mikrotrhlin se snižuje účinek koheze a

vrstva se tak částečně přibližuje chováním vrstvě nestmelené. V případě směsi s vysokou pevností hrozí vznik reflexních trhlin, které mohou následně porušovat svrchní vrstvu vozovky. [6]



Obrázek 2: Moohrova kružnice – stmelené směsi [6]

Evropské normy, zabývající se požadavky pro stmelené podkladní vrstvy pozemních komunikací, zobrazuje obrázek 3:



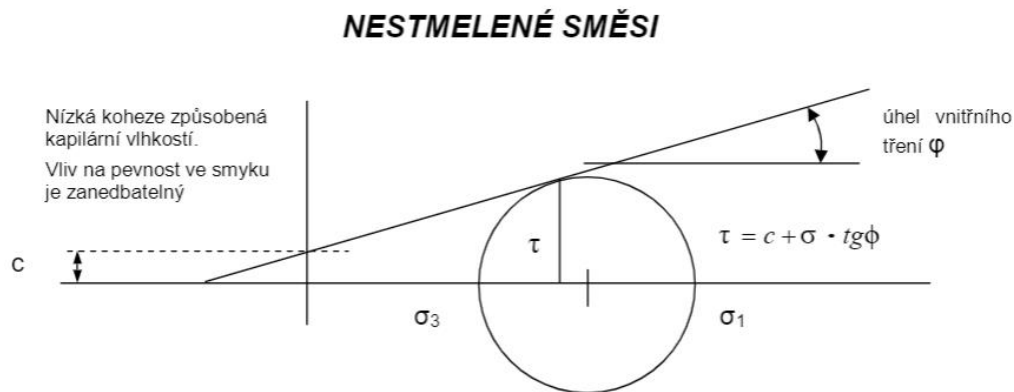
Obrázek 3: Schematické znázornění norem pro stmelené směsi [6]

Stmelené podkladní vrstvy pro vrstvy tělesa železničního spodku se provádí podle ustanovení předpisu ČS S4 a ČSN 73 6225. [7]

1.3. Nestmelené podkladní vrstvy

Směsi bez jakéhokoliv pojiva označujeme jako nestmelené podkladní vrstvy.

Pevnost ve smyku je způsobena vnitřním třením mezi zrny kameniva či zeminy. Koheze je v tomto případě zanedbatelná – viz. obrázek 4. [6]



Obrázek 4: Moohrova kružnice – nestmelené směsi [6]

Označení nestmelených podkladních vrstev podle druhu materiálu:

- MZK mechanicky zpevněné kamenivo
- MZKO mechanicky zpevněné kamenivo otevřené
- VŠ vibrovaný štěrk
- ŠDA, ŠDB štěrkodeř
- ŠPA, ŠPB štěrkopísek
- MZ mechanicky zpevněná zemina [4]

Vlastnosti podloží jsou návrhem a provedením zemního tělesa a podloží (aktivní zóny) ovlivnitelné. Vodnost zemin pro použití v zemním tělese a podloží vozovky nám stanovuje ČSN 72 1002 a ČSN 73 6133. [8]

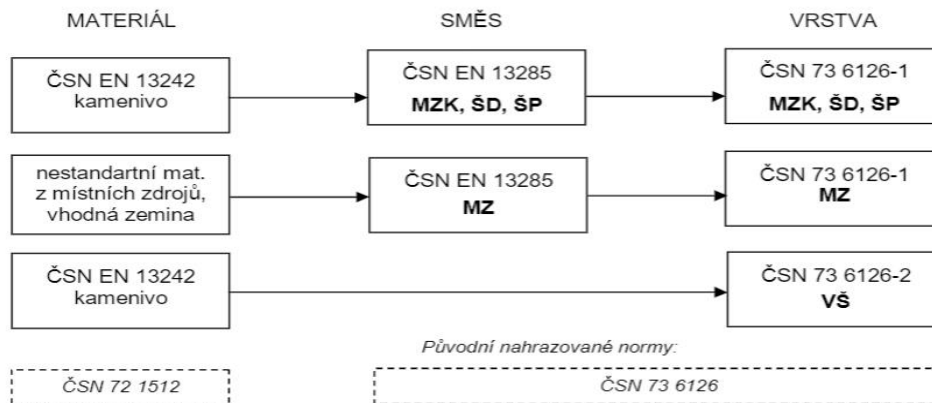
Materiály používané pro nestmelené konstrukční vrstvy železničních tratí jsou zejména štěrkodeř a recyklát získaný z kolejového lože. Drcené kamenivo přispívá vyšším modulem přetvárnosti k vyšší únosnosti vrstvy, a to díky ostrohrannosti a tvaru zrn. Mezi požadavky na materiál patří zrnitost, odolnost proti mrazu, propustnost a nestejnorodost, která spolu s vlhkostí ovlivňuje požadovanou míru zhutnění. [7]

Orientační hodnoty modulu přetvárnosti E udává tabulka 2:

Tabulka 2: Orientační hodnoty modulu přetvárnosti materiálů používaných v nestmelených konstrukčních vrstvách [7]

Materiál	Modul přetvárnosti E [MPa]
Štěrkopísek	40 - 60
Štěrkodrt'	60 - 80
Výzisk z kolejového lože	60 - 80
Upravený recyklát (minerální směs)	90 - 95

Evropské normy, zabývající se požadavky pro nestmelené podkladní vrstvy pozemních komunikací, zobrazuje obrázek 5:



Obrázek 5: Schematické znázornění norem pro nestmelené směsi [6]

Nestmelené podkladní vrstvy pro vrstvy tělesa železničního spodku se provádí podle ustanovení předpisu ČS S4 a OTP ČD. [7]

Prolévané podkladní vrstvy se řídí normou ČSN 73 6127, podle ní vrstvy dělíme do čtyř kategorií:

- ŠCM štěrk částečně vyplněný cementovou maltou
- PM penetrační makadam
- ACB asfaltocementový beton
- KAPS kamenivo zpevněné popílkovou suspenzí [9]

ŠCM tvoří kamenivo frakce 32/63 spolu s cementem třídy 32,5 N, který uzavírá povrch. Množství cementové malty klesá s hloubkou. Doporučený poměr cement: kamenivo je 1:5 až 1:8. Požadavky na kamenivo udává tabulka 3. [9]

Tabulka 3: Požadavky na kamenivo pro ŠCM dle ČSN EN 13242 [9]

Vlastnost		Požadavek, kategorie podle ČSN EN 13242	
		Kamenná kostra	Kamenivo pro cementovou maltu
Zrnitost (frakce)		32/63	0/4
Všeobecné požadavky na zrnitost	hrubé	$G_{C85/15}$	–
	drobné	–	G_{F80}
Propad středním sítím	hrubé	$G_{TC25/15}$ nebo $G_{TC20/15}$	–
Tvarový index		SI_{40}	–
Procentní podíl ostrohranných a obých zrn v hrubém kamenivu		$C_{90/3}$	–
Obsah jemných částic	hrubé	f_4	–
	drobné	–	f_{10}
Kvalita jemných částic ¹⁾		–	$I_P \leq 4$
Odolnost proti drcení Los Angeles		LA_{40}	–
Celkový obsah síry		S_{NR}	S_1
Obsah humusovitých částic ²⁾		–	světlejší než etalon
Nasákavost vodou		WA_{24NR}	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ³⁾		F_4	–
Trvanlivost síranem hořečnatým		MS_{18}	–
Trvanlivost síranem sodným ⁴⁾		≤ 12	–

Penetrační makadam je vrstva složená z asfaltového pojiva, kterým může být asfalt silniční ropný 100/150, 70/100 nebo emulze asfaltová kationaktivní. Požadavky na kamenivo udává tabulka 4: [9]

Tabulka 4: Požadavky na kamenivo pro PM dle ČSN EN 13242 [9]

Vlastnost	Požadavek, kategorie podle ČSN EN 13242			
	Kamenná kostra		Výplňové kamenivo	
	pro PMJ	pro PMH	pro PMJ	pro PMH
Zrnitost (frakce)	16/32	32/63 22/63	8/11 8/16 11/16	11/16 11/22 16/22
Všeobecné požadavky na zrnitost	$G_C85/15$		$G_C80/20$	
Propad středním sítím	$G_{TC}25/15$ nebo $G_{TC}20/15$		$G_{TC}NR$	
Tvarový index	S_{I40}		$S_{I}NR$	
Podíl ostrohranných a obých zrn v hrubém kamenivu v %	$C_{90/3}$		C_{NR}	
Obsah jemných částic	f_4			
Odolnost proti drcení Los Angeles	LA_{40}		LA_{50}	
Obsah humusovitých částic ¹⁾	světlejší než etalon			
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ²⁾	F_4			
Trvanlivost síranem hořečnatým	MS_{18}			
Trvanlivost síranem sodným ³⁾	≤ 12			

Asfaltocementový beton se používá jako obrusná i ložní vrstva. Kostra s 17–32% mezerovitostí je tvořena kamenivem s obaleným asfaltem po prolití nebo zavibrování cementové malty. Pro správnou funkci je podstatný únosný povrch. Jako asfaltové pojivo se používá třída 50/70 nebo 70/100. Pro maltu bývá využíván cement, minerální plnidla (popílek, odprašky, filery), voda a pigmenty. Výplňová směs musí splňovat min. pevnost v tahu za ohybu 4 MPa a odolnost proti CHRL. ACB musí splňovat pevnost v tlaku po 28 dnech min. 3,5 MPa a odolnost proti CHRL. [9]

Kamenivo prolévané popílkovou suspenzí je směs tvořená kostrou kameniva frakce 32/63 po prolití a zavibrování suspenze tvořené popílkem, cementem a vodou. Konzistence suspenze musí být taková, aby zvládla prolití celé tloušťky vrstvy. Pevnostní třída je $C_{5/8}$. Požadavky na kamenivo udává tabulka 5: [9]

Tabulka 5: Požadavky na kamenivo pro KAPS dle ČSN EN 13242 [9]

Vlastnost	Požadavek, kategorie podle ČSN EN 13242
	Kamenná kostra
Zrnitost (frakce)	32/63
Všeobecné požadavky na zrnitost	$G_{C85/15}$
Propad středním sítím	$G_{TC25/15}$ nebo $G_{TC20/15}$
Typická zrnitost	–
Tvarový index	SI_{40}
Procentní podíl ostrohranných a obých zrn v hrubém kamenivu	$C_{90/3}$
Obsah jemných částic	f_4
Odolnost proti drcení Los Angeles	LA_{40}
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ¹⁾	F_4
Trvanlivost síranem hořečnatým	MS_{18}
Trvanlivost síranem sodným ²⁾	≤ 12

2. Materiály pro stmelené podkladní vrstvy

2.1. Pojiva

Hydraulické pojiva používané pro výrobu stmelených podkladních vrstev jsou charakterizované jako maltoviny, které po smíchání s vodou vytváří plastickou směs. Tuhnou a tvrdnou nejen na vzduchu, ale i pod vodou. V těchto prostředích si látka zachovává svou objemovou stálost a pevnost. Mezi hydraulická pojiva řadíme cement, hydraulické vápno, popílek, vysokopeční strusku a hydraulická silniční pojiva. Nej kvalitnějším a nejvíce využívaným pojivem je v dnešní době cement, jehož cena je však vyšší a jeho výrobu doprovází značná produkce CO₂. Snaha o snížení energetické náročnosti vede k využití druhotných surovin, které mají specifické vlastnosti a výhodou může být také jejich nižší cena. [10]

Při návrhu směsi a volbě množství pojiva se vychází z normy ČSN EN 14227-1 v závislosti na maximálním zrnu kameniva, viz. tabulka 6. Definované množství je nutné brát pouze jako doporučení a konečná dávka se určuje experimentálně dle laboratorních výsledků pro individuální směsi. Cílem je použití co nejnižší dávky pojiva při optimální pevnosti. [11]

Tabulka 6: Norma ČSN EN 14227-1: minimální obsah pojiva [11]

Maximální jmenovitá velikost zrna kameniva [mm]	Minimální obsah pojiva [% hmotnosti]
> 8,0 až 31,5	3
2,0 až 8,0	4
< 2,0	5

2.1.1. Cement

Cement je dle normy ČSN EN 197-1 [12] jemně mletá anorganická látka, která s vodou vytváří plastickou kaši, jejichž tuhnutí a tvrdnutí je způsobeno důsledkem hydratačních procesů. Zatvrdnutím zachovává svůj tvar, objemovou stálost a pevnost na vzduchu i pod vodou. Dle chemismu rozlišujeme cement silikátový, cement hlinitanový a speciální cementy. [12]

Vstupními surovinami jsou vápenec a jíla. Jejich výpalem na mez slinutí (1450 °C) vzniká tzv. slínek, který se následně chladí a rozemílá s 5% přídavkem sádrovce, který slouží jako regulátor tuhnutí. Při použití příměsí, kterými může být mletý vápenec, popílek či struska, získáváme směsný cement. V opačném případě se jedná o cement jednosložkový. [10],[12]

Norma ČSN EN 197-1 dělí cement dle několika hledisek:

Podle složení:

- CEM I --- portlandský cement
- CEM II --- portlandský směsný cement
- CEM III --- vysokopecní cement
- CEM IV --- pucolánový cement
- CEM V --- směsný cement [13]

Podle množství příměsí:

- A --- 6 až 20 %
- B --- 21 až 55 % [13]

Podle pevnosti (MPa):

- 32,5
- 42,5
- 52,5 [13]

Podle konkrétních druhů příměsí:

- K --- slínek
- S --- vysokopecní struska
- D --- křemičitý úlet
- P --- přírodní pucolány
- V --- křemičité popílký
- W --- vápenaté popílký
- T --- kalcinovaná břidlice
- LL. L --- vápenec [13]

Podle rychlosti vývoje počátečních pevností:

- N --- normální
- R --- rychlý
- L --- pomalý [13]

Z hlediska ekologie, zejména co se týče emisí CO₂, je přijatelnější cement směsný, u kterého dochází k částečnému nahrazení slínku doplňkovými surovinami, jako je mletý vápenec, popílek, vysokopecní struska, vápenný hydrát či jiné pucolány. Směsný cement je velmi vhodný pro užití do podkladních vrstev, neboť se vyznačuje nízkým hydratačním teplem, objemovou stálostí a dobrou pevností. Výhodou je také nižší cena. [10]

Cement se v běžné praxi využívá po již dlouhou dobu k úpravě zemin, především k jejich stabilizaci. Je vhodný spíše pro úpravu písků či písčitých zemin, a tak jej bude výhodné použít i při úpravě našich druhotných surovin, kde budou fungovat jako stabilizátor, tak i jako pojivová složka. Cement reaguje s vodou a křemičitými složkami

obsaženými v dané surovině za vzniku hydratačních produktů. Výsledná pevnost namíchané směsi je také ovlivněna použitým cementem. Důležité je také konstatovat, že většina cementů obsahuje malé množství volného vápna, které je schopno chemicky reagovat s jílovými částicemi obsaženými v připravované směsi. Následkem této reakce dochází k dalšímu celkovému zpevnění za pomoci cementu. [14]

2.1.2. Hydraulické vápno

Hydraulické vápno se vyrábí výpalem vápenců a slínovců na teplotu cca 1250 °C (pod mezi slnutí). Minimální obsah hydraulických oxidů (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3) je 10 %. Dle toho dělíme vápna na silně hydraulická a slabě hydraulická. V silničním stavitelství se příliš nepoužívají, ani se v současné době v České republice nevyrábí. [12]

2.1.3. Popílek

Popílek je vedlejší energetický produkt, který se získává mechanickým nebo elektrostatickým odlučováním prachových částic ze spalin při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Díky svým pucolánovým vlastnostem může být využit jednak jako pojivo, nebo jako příměs. Bližší popis a rozdělení popílků jsou proto uvedeny v kapitole 2.3 - Vedlejší energetické produkty.

2.1.4. Vysokopecní struska

Struska je nekovový doprovodný produkt hutní výroby, vznikající tavením hlušiny rudy s přidávkou struskotvorných látek a minerálních podílů pevných paliv. Uplatnění nachází zejména strusky vysokopecní, které vznikají jako druhotná suroviny při výrobě železa ve vysokých pecích. Jako latentně hydraulická příměs se používá pro výrobu cementů a dalších směsných maltovin. [15]

2.1.5. Odprašky z cementárny

Odprašky z cementárny vznikají jako druhotný produkt při výrobě cementu. Vznikají odtahem části pecních plynů z přechodové části rotační pece přes systém několika výměníků (By-pass systém), kde dochází k rychlému ochlazení plynů a kondenzaci alkálií na prachové částice. By-pass je zapojován do pecního systému za účelem snížení

škodlivin ve výsledném produktu. Odprašky tvoří 5 až 20 % z hmotnosti vyrobeného slínku. Odprašky mohou být rozděleny na dvě frakce hrubé a jemné. Hrubá se vyznačuje nízkým obsahem alkálií, síranů a chloridů. Kdežto jemná frakce se naopak vyznačuje vyšším podílem těchto látek a je nevhodná pro navrácení zpět do surovinové směsi. Jemné odprašky se používají především jako přísada do cementu. Dále mohou nahradit cement nebo vápenec při stabilizaci půdy, které se využívá při stavbě silnic. [16]

2.2. Kamenivo

Základním vstupním materiálem pro všechny výše zmíněné typy podkladních vrstev je kamenivo. Kamenivo může být přírodní, umělé a recyklované. Dle vzniku ho rozdělujeme na drcené, těžené a těžené předdrcené. Dle objemové hmotnosti na pórovité ($OH < 2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), hutné ($OH = 2000 - 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a těžké kamenivo ($OH > 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Pro návrh podkladní vrstvy vozovky je hlavním kritériem zrnitost kameniva. Velikost zrn může být následující: [9]

- Jemné částice velikost zrn $< 0,063 \text{ mm}$
- Drobné kamenivo zrna velikosti $0,063 - 2 \text{ mm}$
- Hrubé kamenivo zrna velikosti $2 - 45 \text{ mm}$
- Směs kameniva směs hrubého a drobného kameniva
- Filer kamenivo s velkým obsahem (min. 70 %) jemných částic $< 0,063 \text{ mm}$
- Přídavný filer filer minerálního původu vyrobený samostatně
- Štěrkopísek směs těženého přírodního kameniva hrubého a drobného, omezená horním sítem
- Štěrkodrt' směs drceného přírodního kameniva hrubého a drobného, omezená horním sítem [9]

2.2.1. Přírodní kamenivo

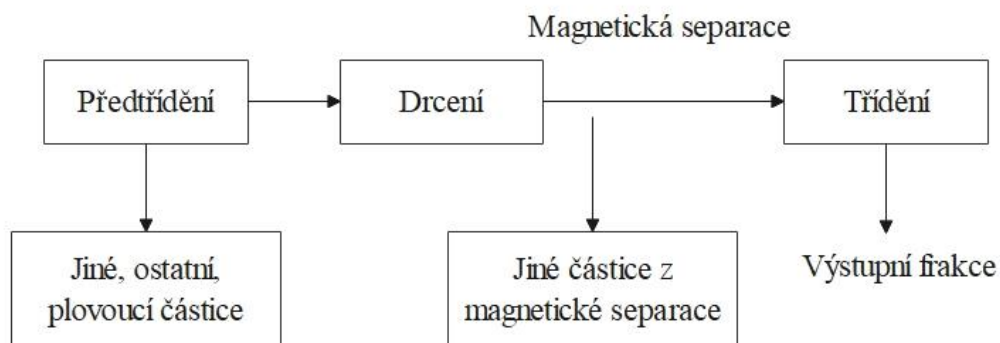
Výroba těženého kameniva může probíhat buď za sucha, pokud se ložisko štěrkopísku nachází na povrchu, nebo z vody. Suchá těžba probíhá pomocí bagru a nakladače, pro těžbu z vody se využívají drapákové, korečkové nebo sací bagry. Vytěžené kamenivo se následně pomocí pásového dopravníku nebo lodě dopraví na břeh, kde pokračuje jeho třídění. Drcené kamenivo se vyrábí z kusového kameniva, nacházející

se v lomech. V současné době je nejvíce využíváno clonových odstřelů. Takto získaný materiál je dále přepraven na drcení, které může být jedno nebo vícestupňové. Primárním drtičem je čelistový drtič, pro sekundární drcení se používá odrazový nebo kuželový drtič. Po drcení často nastává praní kameniva, které zbavuje kamenivo hlíny a jílovitých částic. [9]

2.2.2. Recyklované kamenivo

Recyklované kamenivo je tvořeno demoličním a stavebním odpadem, které po úpravě – drcení a recyklaci, může být označován jako nový stavební materiál – recyklát. Využití recyklátů snižuje množství odpadu a příznivě ovlivňuje životní prostředí. Recyklované kamenivo, pokud má odpovídající kvalitu, může být použito do konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Využíváno je zejména betonového odpadu, cihelného odpadu, asfaltového odpadu, recyklátu z vozovek a směsného recyklátu. [17]

Základní schéma recyklačního procesu je zobrazeno níže:



Obrázek 6: Recyklační proces [17]

Zejména třídění je důležitou částí celého procesu, neboť cizorodé částice v recyklátu významně snižují jeho kvalitu. Recykláty se posuzují podle vlastností jako je odolnost proti drcení, odolnost proti mrazu a vodě a obsah škodlivých látek. [17]

V rámci České republiky lze získání výsledného kvalitního recyklátu rozdělit do následujících bodů:

- Vstupní kontrola stavebního a demoličního odpadu (SDO)
- Separace hrubých nečistot
- Následné přetřídění za cílem odstranění jemných nečistot před drcením
- Zdrobňování přetříděné sutě
- Odstranění feromagnetických komponent za pomoci elektromagnetů
- Třídění na jednotlivé frakce ve vibračním třídíči
- Převoz do skladovacích boxů
- Pravidelné zjišťování škodlivin
- Certifikace hotového výrobku [18]

2.2.3. Stavební recykláty

Betonový recyklát má poměrně široké využití ve stavebnictví. Podrcený a vytříděný betonový recyklát je v první řadě vhodný jako kamenivo pro stavební účely. Může být využit jako náhrada za kamenivo železničních svršků nebo jako náhrada štěrkopísku v obsypech inženýrských sítí. V současné době se jedná díky moderním demoličním a drcíci technologiím o nejžádanější recyklát získaný ze SDO.

Cihelný recyklát je dalším významným zástupcem. Vzniká demolicí a následnou recyklací materiálu objektů z cihelného zdiva. Je tvořen cihelnými, keramickými zbytky a zbytky omítek či malt. Kvalitní cihelný recyklát lze použít jako vstupní materiál do různých konstrukcí a prefabrikátů. Cihelný recyklát může být využíván i jako zásypový materiál.

Asfaltový recyklát najde uplatnění zejména při výstavbě dopravních komunikací nebo při zakládání staveb. Vhodný pro přípravu asfaltových směsí jak za tepla, tak i za studena. Získává se recyklací původních asfaltových směsí.

Směsný recyklát nemá přesně definované složení, a tak je těžké jej zařadit do jedné z kategorií. Rozděluje ho dle parametrů jako je zrnitost, obsah prachových částic a další do několika kategorií dle vhodnosti pro další využití. Je to vhodný materiál pro zásypy a násypová tělesa. Lze použít i jako náhrada zemin. [19][20][21]

2.2.4. Odpad z čištění kolejového lože (ŽZO)

ŽZO je odpad z čištění kolejového lože. V rámci rekonstrukcí železničních tratí vznikla nová ekonomicky a ekologicky využitelná surovina z recyklace stavebního a demoličního odpadu. Jedná se v podstatě o štěrk z kolejového lože, na kterém je uložen kolejový rošt. Odpad z čištění kolejového lože je tvořen nežádoucími frakcemi kameniva, které by bránily správné funkci kolejového lože zejména zajištění odtoku vody z kolejí. Dnešní požadavky na kamenivo pro kolejové lože jsou vysoké. Jelikož se jedná o neobnovitelný zdroj je snaha se zabírat problematikou, jak tuto surovinu recyklovat. Je nutné splnit požadavky na fyzikální vlastnosti a tvar zrn, proto princip recyklace spočívá v doplnění chybějících frakcí za pomoci dílčího předrcení, které zajistí obnovení ostrohranosti zrn. [18][22]

2.2.5. Odpad z autodomíchávače

Odpad z autodomíchávače je tvořen zbytky betonu, které byly za pomoci recyklačního zařízení rozplaveny, vyprány roztrženy na kalovou vodu a samotné kamenivo. Jedná se o ekologický i ekonomický přínos z hlediska úspory kameniva a vody. Získané kamenivo a voda se da znovu využít při výrobě betonu nebo i na jiné účely. [23]

2.3. Vedlejší energetické produkty

2.3.1. Popeloviny ze spalování uhlí

Ložový popel z fluidního spalování je zrnitý porézní materiál vzniklý v kotli při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Vzniká spalováním mletého paliva společně s drceným vápencem ve fluidním loži při teplotách kolem 850 °C. Produktem spalování je směs popela, nezreagovaného odsiřovacího činidla, produktů reakce popelovin s vápnem, síranu vápenatého a nespáleného paliva. Díky nižší teplotě výpalu je v ložovém popelu přítomen nezreagovaný CaO ve formě tzv. měkce páleného vápna, které je vysoce reaktivní. Nižší teplota spalování má také za následek menší natavení částic popílku, tudíž výstupní zrna vykazují vyšší měrný povrch a pórovitost. Ložový popel rovněž vykazuje vyšší obsah reaktivního vápna a oxidu sírového. Oproti úletovému popílku vykazuje ložový popel vyšší nasákavost způsobenou svojí pórovitostí.

Úletový popel z fluidního spalování se od klasického vysokoteplotního popílku liší zejména chemickým a mineralogickým složením. Fluidní popel obsahuje anhydrit, který vzniká především reakcí uhlí a vápence ve fluidním kotli. Ložový popel a úletový popílek z fluidního spalování se od sebe liší granulometrií a pórovitostí.

Uhelná škvára je tvořena zbytky po spalování uhlí nebo koksu. Ve stavebnictví je využívána k výrobě škvárobetonu, tvárnic a stavebních dílců. Uplatnění najde i silničním stavitelství. Podmínkou pro její použitelnost je šestiměsíční odležení. Škvára patří v posledních letech mezi žádané druhotné suroviny.

Vysokoteplotní popílek je narozdíl od ložového popela vzniká při spalování mletého paliva při teplotách 1400 °C až 1600 °C bez přidání vápence. Výsledný produkt je tvořen jemnozrnným prachem složeným z částic kulovitého tvaru s hladkým povrchem. Vyznačuje se hlavně vysokým obsahem křemene. Zrna úletového popílku se zachycují v odlučovačích a k odsíření dochází vápennou vypírkou. Díky své pucolánové aktivitě se používá jako náhrada pojiva do cementem spojovaných stavebních materiálů. [24][25][26][27]

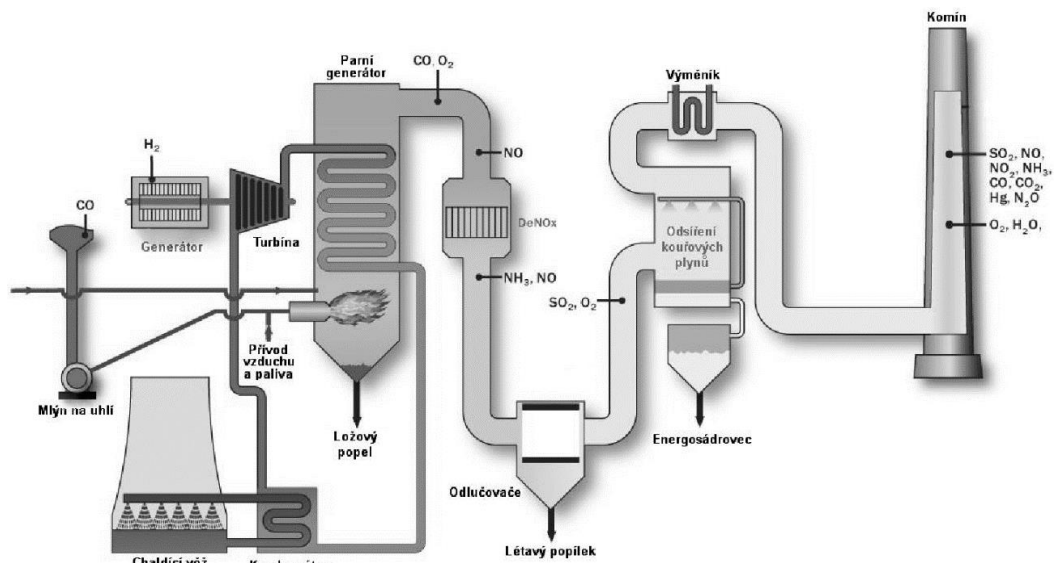
Tabulka 7: Vliv oxidu na vlastnosti popílku [28]

Oxid	Vliv oxidu na vlastnosti popílku
SiO ₂	dodává pucolánové vlastnosti
Al ₂ O ₃	vzbuzuje hydrauličnost
Fe ₂ O ₃	způsobuje nízkou slínavost a snadné spékání popílků
CaO	vzbuzuje hydrauličnost, ve formě vápna je však nežádoucí
Na ₂ O, K ₂ O	nejsou žádoucí, mohou zapříčiňovat objemovou nestálost
SO ₃	kontrolovaný parametr, nemá být vyšší než 3 hm. %

Základní dělení popílků dle normových předpisů do několika skupin:

- Popílek jako aktivní složka maltovin ČSN 72 2072-1
- Popílek jako příměs při výrobě malt ČSN 72 2072-2
- Popílek pro výrobu popílkových směsí ČSN 72 2072-3
- Popílek pro výrobu cihlářských pálených výrobků ČSN 72 2072-4
- Popílek pro výrobu pórobetonu ČSN 72 2072-5
- Popílek pro výrobu umělého kameniva spékáním ČSN 72 2072-6
- Popílek pro výrobu um. kam. za studena a rychlého vytvrzování ČSN 72 2072-8
- Popílek pro výrobu minerálních vláken ČSN 72 2072-9
- Popílek pro asfaltové výrobky ČSN 72 2072-10

- Popílek pro ostatní využití ČSN 72 2072-11
- Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení pro fluidní popel ČSN 72 2080 [29]



Obrázek 7: Schématické znázornění získávání popílku [30]

2.3.2. Škvára ze spalovny komunálních odpadů

Škvára ze spalovny komunálních odpadů je vedlejší energetický produkt vzniklý činností spalování odpadů. Použití strusky ze spalovny ve stavebnictví konkrétně při výstavbě je však poměrně složité riskantní. V popelu a strusce ze spalovny odpadů se kumuluje celá řada toxických látek jsou například chloridy, fluoridy, sírany nebo některé těžké kovy, které se mohou při styku s vodou začít uvolňovat do podloží. Složení strusky se může měnit dle podle charakteru spalovaného materiálu. V rámci České republiky se ročně ze spaloven vyprodukuje zhruba 230 tisíc tun popela a strusky. [31][32]

3. Požadavky na směsi stmelené cementem

3.1. Požadavky na pojivo

Cement musí splňovat požadavky EN 197-1. Hydraulické silniční pojivo používané pro směsi stmelené cementem musí splňovat požadavky ENV 13282, pro třídy pevnosti HRB 22,5 E nebo HRB 32,5 E. Předpokládá použití cementu splňujícího požadavky EN 197-1 CEM 1, cement třídy 32,5N, 42,5N, nebo 52,5N. [9]

3.2. Požadavky na kamenivo

Kamenivo podle EN 13242 drcené nebo těžené, popř. kombinace přírodní, umělé nebo recyklované kamenivo příp. kombinace. Zvolené možnosti musí být stanoveny ve smlouvě a tolerance musí být v intervalu $\pm 5\%$ od hmotnosti vztažené k deklarovanému poměru. [9]

3.3. Požadavky na vodu

Záměsová voda musí splňovat požadavky ČSN EN 1008. [33]

3.4. Požadavky na směs

Pevnost a modul pružnosti se zkouší na krychelných nebo válcových zkušebních tělesech připravených v souladu s EN 13286-50 až -53 a zkoušených podle ČSN EN 13286-40 a 43. [9]

Směsi stmelené cementem se klasifikují dle charakteristické pevnosti v tlaku R_{ck} (Systém I) nebo dle charakteristické pevnosti v prostém tahu R_{tk} nebo pevností v příčném tahu R_{itk} a modulem pružnosti E (Systém II). [9]

3.4.1. Systém I

Směsi se zkouší na pevnost v tlaku podle EN 13286-41 po 28 dnech zrání zkušebního vzorku. V případě požadavku na pevnost v tlaku po 7 dnech zrání se použije výpočet podle hodnot z tabulky za použití laboratorních 7denních a 28denních výsledků zkoušek. Pevnost v tlaku R_{cs} pro danou recepturu musí být stejná nebo vyšší než pevnost v tlaku požadovaná pro danou třídu. [9]

3.4.2. Systém II

Receptury se klasifikují pomocí kombinace pevnosti v tahu R_t a modulu pružnosti E po 28 dnech zrání vzorku. Hodnoty R_t a E musí být stanoveny při prostém tahu nebo příčném tahu a převedením výsledků na ekvivalentní hodnoty prostého tahu pomocí vzorce: $R_t = 0,8 R_{it}$. R_t se stanovuje podle EN 13286-40. E se stanovuje při prostém tahu podle EN 13286-43. Pro obě zkoušky se zkušební vzorky zhotovují podle vibrokomprese podle EN 13286-52. [9]

4. Podmínky pro vytvoření podkladních vrstev čistě z druhotných surovin

4.1. SŽDC: Obecné technické podmínky č.j. 25 640/06

Správa železniční dopravní cesty, státní organizace vydala obecné technické podmínky pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku tvořené ze štěrkopísku, štěrkodrti a recyklované štěrkodrti. Tyto podmínky nám stanovují požadavky na technické a ekologické vlastnosti. Štěrkopísek a štěrkodrt' používané do konstrukčních vrstev nesmí obsahovat škodlivé látky v koncentracích poškozujících zdraví a ohrožující životní prostředí. Může se používat jen takové kamenivo, které nebude uvolňovat škodlivé látky. Technické podmínky také dávají předlohu, podle jakých norem se mají zjišťovat jednotlivé technické parametry. Diplomová práce se především zabývá otázkou využití recyklovaných materiálů, u kterých je stěžejní zejména obsah škodlivin. Nejvyšší přípustné koncentrace škodlivin recyklované štěrkodrti pro zřízení konstrukční vrstvy jsou uvedeny v následující tabulce 8. Pokud je obsah škodlivin překračuje limitní hodnoty, nelze tento materiál použít a je nutno s ním nakládat podle ustanovení zákona o odpadech č. 541/2020 Sb. Limitní hodnoty pro recyklované štěrkodrtě můžeme tedy analogicky aplikovat i naše vybrané druhotné suroviny. [34][35]

Tabulka 8: Limitní hodnoty škodlivin recyklované šterkodrtě pro konstrukční vrstvy

[35]

Parametr	Limitní hodnota
Ve vodném výluhu	
pH	5,5 až 11
Vodivost v $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$	200
Fenolový index v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	0,1
Zápach	po chemických nebo ropných látkách
CHSK-Cr v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	40
Nepolární extrahovatelné látky (NEL) v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	0,2
Cu v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ⁷⁾	1,0
Zn v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ⁷⁾	3,0
V pevné hmotě	
Nepolární extrahovatelné látky (NEL) v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ⁸⁾	500
EOX (Cl) v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8
PAU v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ⁹⁾	40
Cu v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ⁷⁾	190
Zn v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ⁷⁾	720

⁷⁾ Platí jen v případě elektrifikovaných tratí.

⁸⁾ U vzorků bez zápachu po ropných látkách a s příměsí uhlénoho prachu nebo rostlinných zbytků (humusu) se doporučuje chromatograficky stanovit podíl nepolárních extrahovatelných látek (NEL) ropného a přírodního původu.

⁹⁾ Platí jen v případě kolejí s dřevěnými pražci.

4.2. Potřebné parametry pro jejich zapojení

Zapojení recyklátů do podkladních vrstev železničního tělesa může vycházet dle požadavků normy ČSN 73 6133 pro podkladní vrstvy vozovky. Předpokladem pro jejich zapojení je nezávadnost pro životní prostředí a stálost co se týče změny tvaru, objemu a pevnosti vlivem klimatických změn. U stavebních odpadů je dále nutné brát v potaz dopady jako je rozdílná granulometrie, případné znečištění a druhotná různorodost, které mají negativní vliv na kvalitu recyklátu. [36]

Při použití recyklované šterkodrtě do konstrukčních vrstev je vhodná frakce 0/32 mm. Vrstva musí být propustná, nenamrzavá a musí vyhovět filtračnímu kritériu vůči zemině zemní pláň a kamenivu kolejového lože. Výsledný materiál podkladních vrstev železničního spodku musí vyhovovat předepsaným hodnotám pevnosti a odolnosti stabilizace proti účinkům mrazu a vody. Pevnostní požadavky jsou také rozdílné pro

vrstvy aktivní zóny, tak i pro vrstvy podloží a zemního tělesa. Hodnoty jednotlivých pevností jsou uvedeny v tabulce č.9: [1]

Tabulka 9: Pevnosti a odolnosti proti mrazu a vodě dle SŽDC S4 [1]

Vrstva	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Odolnost proti mrazu a vodě [MPa]
Aktivní zóna	min. 2,5	min. 3,5
Podloží a zemní těleso	min. 1,0	min. 1,2

Pro zabránění znehodnocení materiálu jako je smíchání či znečištění je nutné recykláty skladovat odděleně podle druhu a jakosti. Přitom se sleduje jejich homogenita a stejnorodost z hlediska kvality. [17]

Vzhledem k návrhu nové pokročilé technologie, lze vycházet pouze ze zahraničních zkušeností, případně z návrhu směsí pro podloží vozovky, kde se již druhotné suroviny používají ve větší míře. Požadavky na recyklované stavební materiály (RSM) uvádí tabulka 10. Jedná se pouze o doporučené hodnoty, jejichž dodržení však vede k optimálnímu návrhu a splnění závazných požadavků pro výsledné recyklované směsi. Požadavky pro směsi s použitím RSM vychází z TP 208. Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena a ČSN EN 14227 – 1, 2, 3 a 5. [17]

Tabulka 10: Doporučené požadavky na RSM pro stmelené směsi a prolévané vrstvy [17]

Vlastnost	Požadavky na RSM pro směsi z míchacího centra s použitím pojiva	
	cement nebo jiné hydraulické pojivo	prolévané vrstvy asfaltem, asfaltovou emulzí nebo cementovou suspenzí
Označení směsi	0/16; 0/22; 0/32; 0/45	16/32; 32/63
Max. obsah jemných částic	f_{15}	f_{15}
Kvalita jemných částic	$l_p \leq 17$	$l_p \leq 17$
Nadsítné	15 %	15 %
Požadavky na zrnitost směsi ¹⁾	Příloha A, tab. A.1	Příloha A, tab. A.2
¹⁾ Platí pro směs recyklátu (RSM) bez přidaného pojiva		

Tabulka 11: Požadavky pro směsi s použitím RSM [17]

Vlastnost	Požadavky pro směsi s použitím pojiva	
	cement nebo jiné hydraulické pojivo	
	ČSN EN 14227-1, 2, 3 a 5	
Optimální frakce směsi	0/22; 0/32; 0/45	
Požadavky na zrnitost směsi ¹⁾	Příloha A, těchto TP	
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost	Deklarovaná hodnota	
Vlhkost ¹⁾	-3 % až +2 % w_{opt}	
Min. pevnost v tlaku R_c po 28 dnech ²⁾	$C_{3/4}$ ³⁾	
Min. odolnost proti mrazu a vodě	85 % hodnoty pevnosti v tlaku	
Min. pevnost v příčném tahu R_{ft} ²⁾	po 7 dnech	0,3 MPa
Odolnost proti mrazu a vodě (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě)	po 14 dnech	70% R_{ft}
¹⁾ Doporučené požadavky pro směs z RSM před přidáním pojiva. ²⁾ Zkouší se směs stmelena cementem podle ČSN EN 14227-1 včetně možnosti provedení stanovení pevnosti v příčném tahu. Pokud je výsledná pevnost v tlaku navržené směsi větší než 6 MPa, nemusí se provádět zkoušení odolnosti proti mrazu a vodě podle ČSN EN 14227-1 NA. ³⁾ Třídy pevnosti podle ČSN EN 14227-1, ČSN EN 14227-2, ČSN EN 14227-3 a ČSN EN 14227-5.		

Použití recyklátů do konstrukčních vrstev vozovky vychází podle TP 210 podle procentuálního zastoupení hlavní složky. [17]

Tabulka 12: Doporučené užití dle zastoupené hlavního materiálu [17]

Typ RSM	Konstrukční vrstvy pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso ³⁾
	A B	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		Kostrá ¹⁾	Výplň ²⁾	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+0	+	0/-	+0	+
Recyklát směsný	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+0	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát asfaltový	+	-	+0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

- + doporučuje se používat
- nedoporučuje se používat
- 0 podmíněčně použitelný
- AB asfaltové vrstvy vozovek
- CB cementobetonové kryty vozovek [17]

Zkoušení recyklátů je obdobné jako u přírodních materiálů. Mezi základní zkoušky patří zrnitost (sítový rozbor), odolnost proti drcení, Proctorova zkouška pro stanovení zhutnitelnosti zeminy, stanovení vlhkosti a nasákavosti a Kalifornský poměr únosnosti CBR. Bližší popis zkoušek se nachází v praktické části této diplomové práce.

Mimo recykláty se nabízí možnost využití vedlejších produktů výroby kameniva s převládajícím podílem drobné frakce, které nejsou vhodné pro použití do nestmelených vrstev. Materiály s označením jako kamenitá sypanina, šterkovitá sypanina apod. téměř vždy splní požadované parametry pro podloží vozovky: [37]

- $w_L \leq 50 \%$ mez tekutosti
- $LS \leq 3 \%$ objemové změny
- $c_U > 4$ číslo nestejnozrnnosti
- $CBR_{sat} > 15\%$ poměr únosnosti

4.3. Problematické vlastnosti

Největším problémem využití recyklátů do podkladních vrstev je splnění výše zmíněných kritérií pro jejich zapojení. Jedná se zejména o nasákavost po 24 hodinách, která se v případě přírodního kameniva pohybuje okolo 2 %. Nasákavost betonových recyklátů bývá v rozmezí 5–10 %, u směsných a cihelných recyklátů je tato hodnota zpravidla vyšší než 10 %. Fyzikálně mechanické vlastnosti, které bývají oproti přírodnímu kamenivu horší, jsou odolnost proti drcení a otěru, a odolnost proti mrazu, a to především u hrubé frakce. Problematické mohou být i některé geometrické vlastnosti, jako je tvar zrn, zrnitost a obsah jemných částic. Z chemického hlediska je nutné regulovat obsah chloridů a síranů, které se objevují zvláště u recyklátu ze zdiva. U směsného recyklátu je dále nutné počítat s jistou nehomogenitou materiálů, která ovlivňuje výsledné vlastnosti recyklátu v závislosti na jeho původu. [38]

4.4. Výhody

Jedna z největších výhod použití recyklátu je určitě cena, která je oproti přírodnímu kamenivu 2 až 4x nižší (viz kapitola 5. Ekonomické hledisko). Dále mají recykláty velmi příznivý dopad na životní prostředí. Zejména se tak šetří přírodní neobnovitelné zdroje, snižují množství odpadu a předchází se znečišťování. Eliminací činností, které spotřebovávají energii, se také šetří velké množství energie. Kvalita recyklátu může být srovnatelná s přírodním kamenivem, pokud budou dodržovány normy a parametry pro jejich zapojení. [39][40]

5. Ekonomické hledisko

Z ekonomického hlediska je výpočet výsledné ceny materiálu oproti běžnému kamenivu složitější. Rozhodujícím faktorem je samozřejmě množství materiálu, pokud se však jedná o drobný návoz do 1 t, je nutné počítat s přírůžkou (600 Kč/návoz). Další přírůžka je v případě kusovitosti větší než 500 mm (600–800 Kč/t). Posledním aspektem je čistota recyklátu, příplatek se počítá dle procentuálního zastoupení příměsi (400–600 Kč/t). Orientační ceny recyklátů uvádí tabulka 13. [40]

Tabulka 13: Ceny výrobce recyklátů DUFONEV R.C. z roku 2021 [40]

Materiál	Frakce [mm]	Cena [Kč/t] bez DPH
Asfaltový recyklát	0/22	40
	> 22	30
Betonový recyklát	0/16	150
	0/32	130
	0/63	150
	32/63	160
Směsný recyklát	0/16	45
	0/32	35
	0/63	35
	32/63	35
Cihelný recyklát	0/16	55
	0/32	45
	0/63	45
Přírodní kamenivo těžené	0/4	180
Přírodní kamenivo drcené	0/4	170
	8/16	325
	0/32	240
	0/63	255
	32/63	280

6. Rešerše dosavadního výzkumu

Cementem stmelené podkladní vrstvy s recyklovanými agregáty jsou omezeny na hrubou frakci s rozsahem velikosti 0–40 mm. Zahraniční výzkumy ukazují, že při použití této frakce recyklovaného kameniva dochází ke vzniku trhlin v podkladní vrstvě. U směsí s vyšší obsahem cihelného recyklátu byly pozorovány spíše drobné trhliny. První studie zabývající se použitím drobné frakce 0–8 mm recyklovaného agregátu do podkladních vrstev byla publikovaná v roce 2015. Porovnávány byly objemové stálosti a mechanické vlastnosti jako je modul pružnosti a pevnost v tlaku u směsí s kamenivem frakce 0/8 a 0/40. Využito bylo směsného a betonového recyklátu, jako pojivo byl využit cement směsný v dávce 3 %. Výsledky ukázaly srovnatelné velikosti pevnosti v tlaku (3 – 4,5 MPa) u obou směsí. K větším objemovým změnám docházelo u směsi s kamenivem frakce 0/40, vyšší modul pružnosti byl naměřen u směsi s drobným kamenivem (6100–6500 MPa). [41]

Druhá studie z italské univerzity v Boloni se rámci v rámci výzkumu prováděném v roce 2017 se zabývala problematikou použití úplné náhrady kameniva kamenivem z recyklátu. Výzkum se skládal z praktické části, tak i z provádění testů in-situ. Směsi složené čistě vyřazených dlaždic a drceného betonu byly porovnávány s referenční směsí, která byla vyrobena z primárního kameniva. U zjištěných výsledků v rámci laboratorního výzkumu lze konstatovat, že všechny tři receptury vyhověly limitům stanovených italskou technickou specifikací. Dále je potřeba zmínit, že nebyly pozorovány žádné evidentní rozdíly z hlediska mechanických vlastností mezi těmito třemi směsmi. [42]

Dřívější studie z roku 2013 se zabývá využitím drobného recyklovaného kameniva, které ve velké míře vzniká při recyklaci demoličního a stavebního odpadu, a není pro něj dostatečné využití. Vyráběny byly nízkopevnostní směsi, vhodné do podkladních vrstev vozovky. Směsi obsahovaly mimo drobné kamenivo cement, vodu a provzdušňovací přísady. Dle předpokladu nejnižších pevností (0,8 MPa) dostáhly směsi obsahující pouze recyklované kamenivo, nejvyšší pevnosti (1,7 MPa) dosáhla směs obsahující 50 % drobného recyklovaného kameniva a 50 % drobného těženého kameniva. Z výsledků vyplývá, že i tento stavební odpad může mít uplatnění ve stavitelství a z části může substituovat kamenivo přírodní. [43]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. Cíl práce

Cílem této diplomové práce je vytvořit zcela nový funkční materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa na bázi druhotných surovin. Využití takového materiálu v praxi povede k významným úsporám na nákladech stavby a současně k ochraně životního prostředí.

Prvotním cílem je výběr základního souboru druhotných surovin pro vytvoření surovinové báze na základě daných parametrů.

Druhým dílčím cílem je výběr vhodných variant z pilotního ověření a případné optimalizace základního souboru surovinových směsí.

Dalším logickým cílem je výběr vhodných surovinových variant na základě experimentálního ověření směsí s příměsí alternativních pojiv.

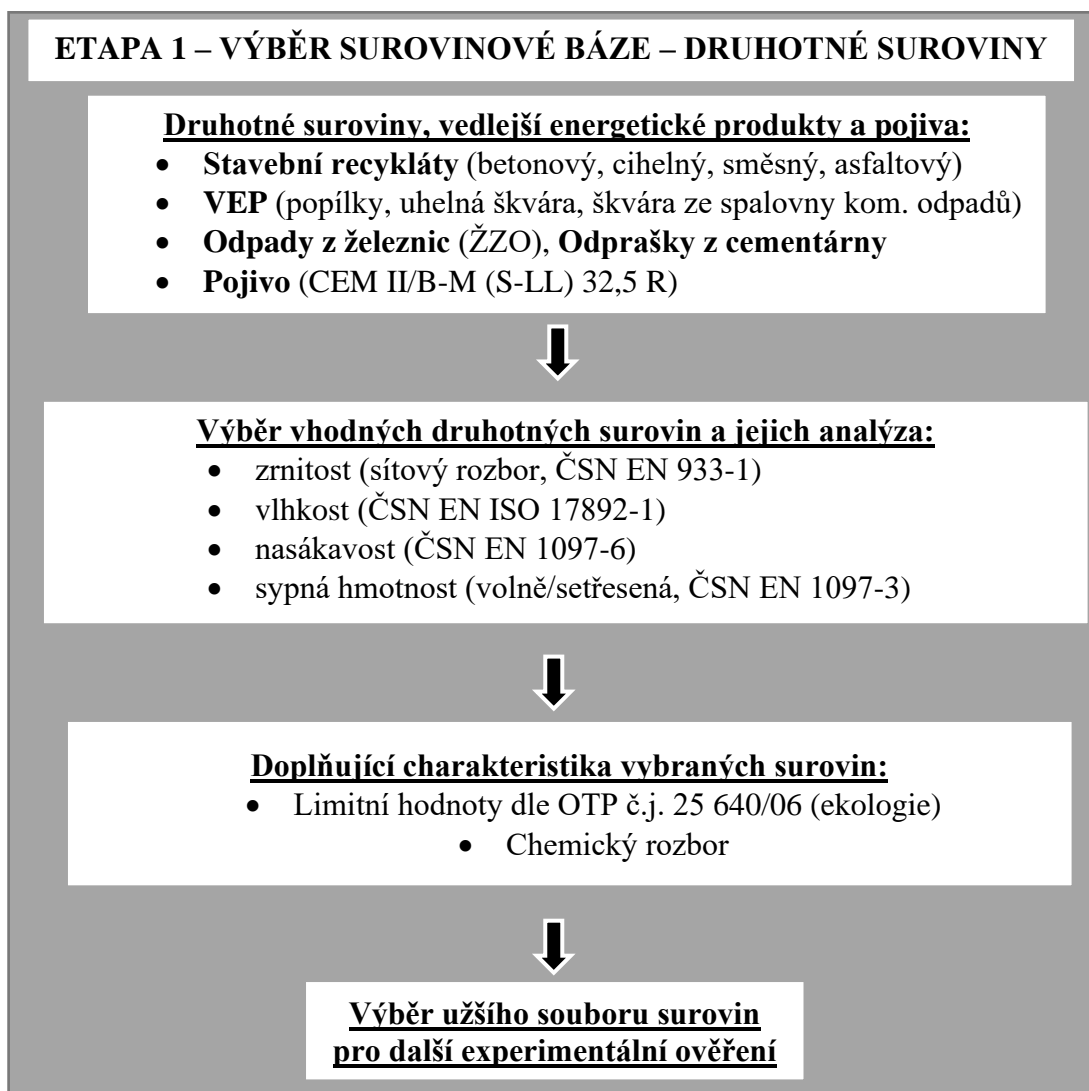
Finálním cílem je pak výběr optimální surovinové varianty na základě pokročilého testování a její ověření formou funkčního vzorku. Součástí rozhodovacího procesu je také ekonomická rozvaha.

Hlavním výstupem je tedy materiál, který nahradí původní kamenivo druhotnou surovinou při částečné substituci pojiva alternativním pojivem také ve formě druhotné suroviny. Informace získané v této diplomové práci jsou součástí probíhajícího výzkumu a slouží jako podklad na výzkum navazující. Včetně využití výsledného materiálu na demonstračním úseku.

2. Metodika diplomové práce

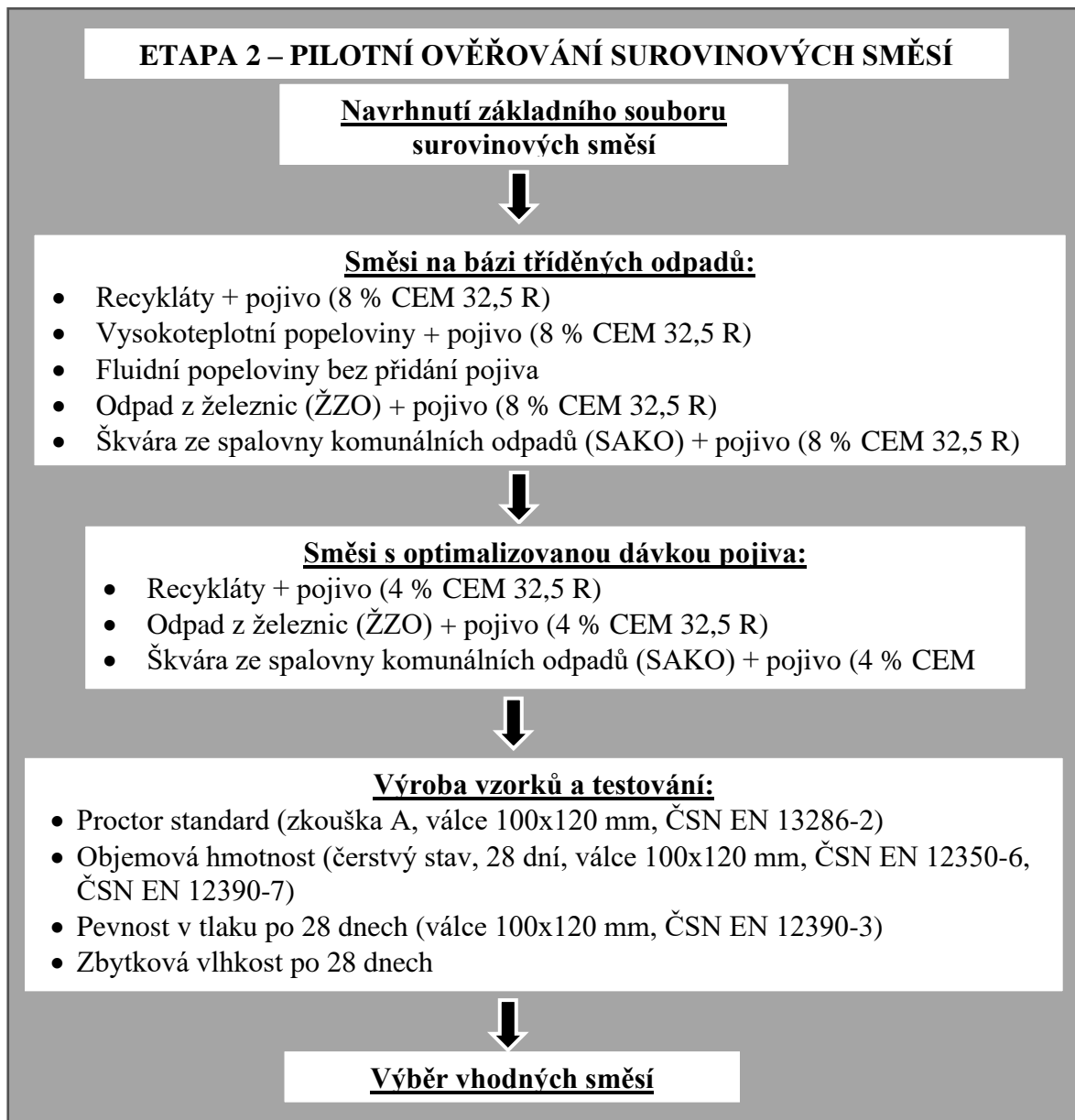
ETAPA 1 – VÝBĚR SUROVINOVÉ BÁZE – DRUHOTNÉ SUROVINY

V první etapě experimentální části bude proveden výběr surovinové báze z druhotných surovin se zaměřením na stavební recykláty, odpady z železnic (ŽZO), odprašky z cementárny, škváry ze spalovny komunálních odpadů a vedlejší energetické produkty. Za primární parametry pro výběr surovin bude zařazena jejich zrnitost, vlhkost, nasákavost jednotlivých frakcí (frakcí 0-4 mm, 4-16 mm, 16-32 mm a 0-16 mm) a sypané hmotnosti. Rovněž bude posuzováno chemické složení a obsah škodlivin. Součástí této etapy bude také charakteristika hlavní pojivové složky ve formě cementu. Výstupem první etapy bude soubor optimálních surovin se všemi dominantními vlastnostmi.



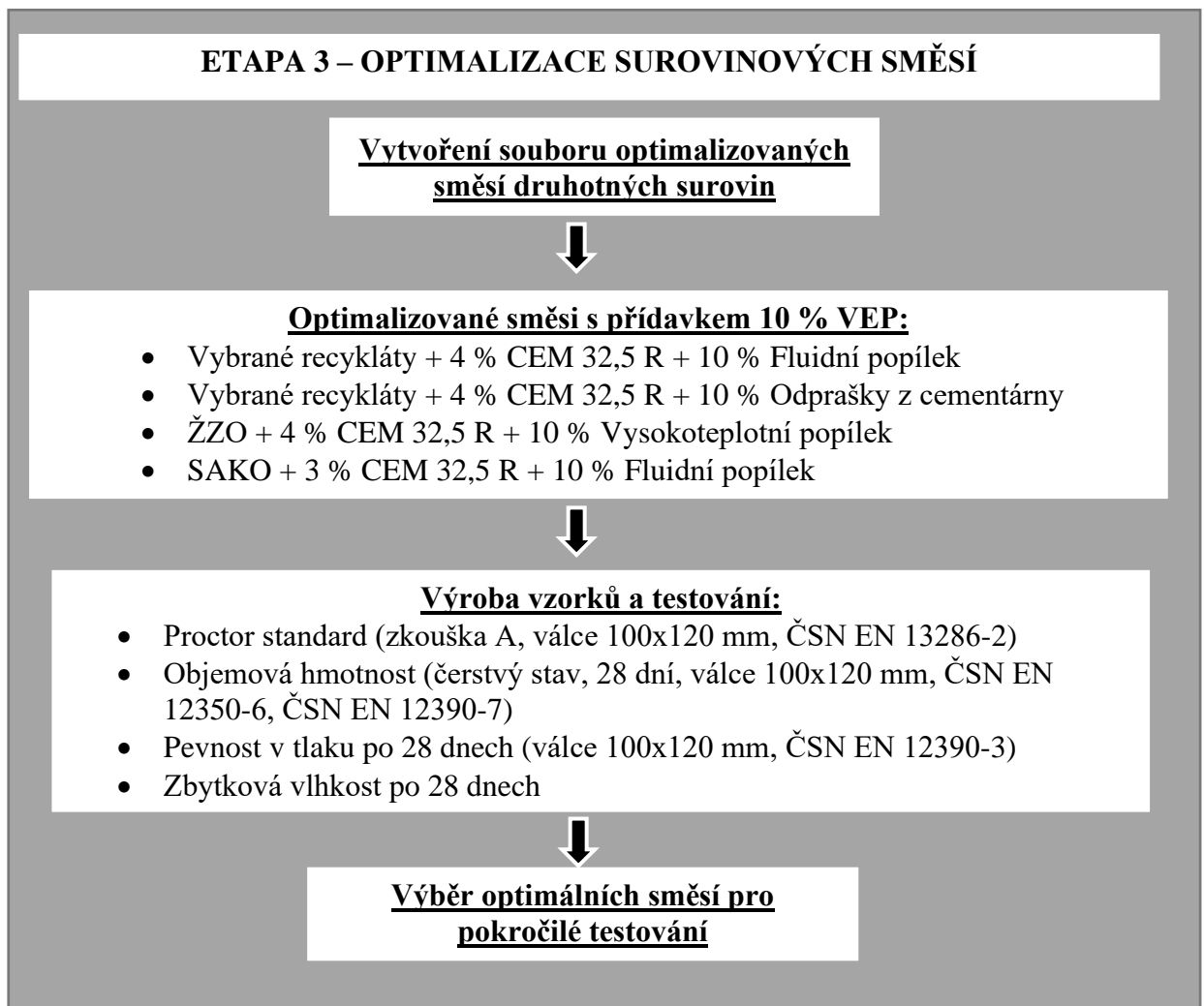
ETAPA 2 – PILOTNÍ OVĚŘOVÁNÍ SUROVINOVÝCH SMĚSÍ

V druhé etapě bude sestaven soubor základních surovinových variant a bude následně podroben pilotnímu testování. Výstupem testování bude zhodnocení spolupůsobení druhotné suroviny s cementem a ověření možnosti použití samotné suroviny bez příměsi cementu. Na základě dosažených pevností v tlaku bude případně modifikována dávka pojiva. V rámci testování budou zkušební tělesa vytvářena hutněním metodou Proctor standard (zrno max. 16 mm), tedy válce o rozměrech 100x120 mm. Za pomoci této zkoušky zjistíme optimální vlhkosti při maximálních objemových hmotností jednotlivých směsí. Výstupem druhé etapy bude výběr užšího souboru surovinových směsí pro další experimentální ověřování.



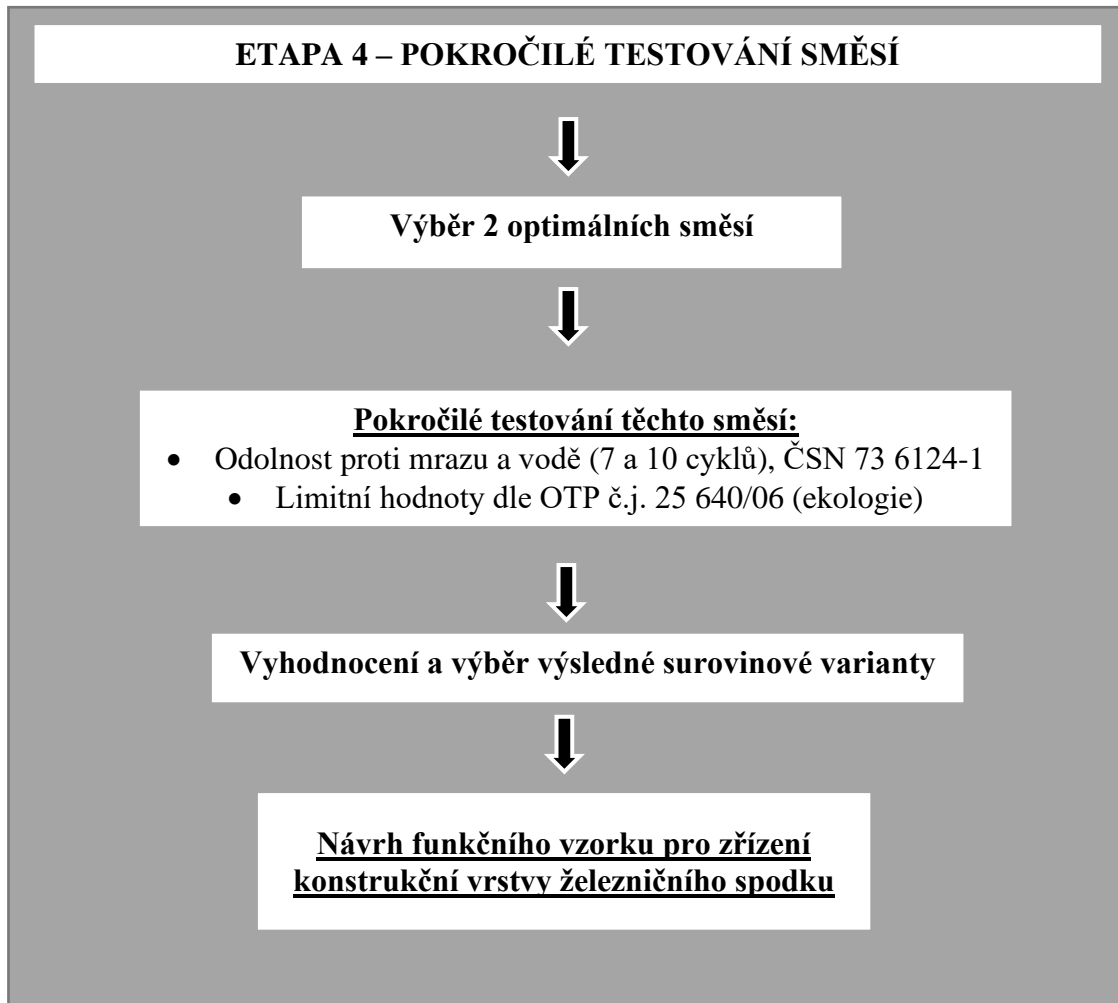
ETAPA 3 – OPTIMALIZACE SUROVINOVÝCH SMĚSÍ

Na základě výsledků druhé etapy dle dosažených koncových pevností v tlaku, bude provedena optimalizace směsí. Optimalizace bude spočívat v dávkování příměsí ve formě vedlejších produktů (popílky, cementové odprašky) v substituci za druhotnou surovinu. Takto upravené směsi budou podrobeny následnému ověřování stejnému jako v předešlé etapě. Cílem této etapy bude výběr optimálních směsí na základě dosažených pevností v tlaku, které budou představovat kombinace vhodných surovin.



ETAPA 4 – POKROČILÉ TESTOVÁNÍ SMĚSÍ

V poslední etapě experimentální části budou vybrány 2 směsi na základě zjištěných poznatků z etap předešlých. Od každé směsi budou vyrobeny zkušební tělesa s optimální vlhkostí, která budou po ukončení 28denní zračí doby vystavena pokročilému testování. Toto testování bude založeno na zkoušení odolnosti proti mrazu a vodě. U vybraných receptur bude také stanoven vliv na životní prostředí. Výsledným výstupem závěrečné etapy bude návrh funkčního vzorku pro zřízení konstrukční vrstvy železničního spodku.



3. Metodika zkoušení

U vstupních materiálů bylo nutné nejprve stanovit jejich základní parametry za pomoci laboratorních zkoušek. Je zde uvedena metodika zkoušení surovin, tak i metodika zkoušení stmelených směsí.

3.1. Zkoušení surovin

3.1.1. Sypná hmotnost setřeseného kameniva

Sypná hmotnost setřeseného kameniva byla stanovena dle normy ČSN EN 1097-3 [44].

3.1.2. Sypná hmotnost volně sypaného kameniva

Stanovení sypné hmotnosti setřeseného kameniva vycházelo ze stejné normy ČSN EN 1097-3 bez hutnění za pomoci vibrace. [44]



Obrázek 8: Měření sypných hmotností (fotografie autora)

3.1.3. Stanovení vlhkosti

Vlhkost byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1 a zaokrouhlena na 0,1 %. Pokud je hodnota vlhkosti $w \leq 1$ %, tak je výsledek zaokrouhlován na 0,01 %. Naopak pokud je hodnota vlhkosti $w \geq 1$ %, tak je výsledek zaokrouhlován na 0,1 %. Zbytková vlhkost u zatvrdlých směsí bude také stanovena podle stejné normy. [45]

3.1.4. Zkouška zrnitosti – Sítový rozbor

Podmínky provádění zkoušky stanovuje norma ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. [46]

Podstatou zkoušky je navážení určitého množství zkušebního materiálu a jeho přecedění přes normovou sadu sít za pomoci vibračního podstavce. Velikost otvorů jednotlivých sít jsou závislé dle druhu zkoušeného materiálu. Síta jsou na sebe seskládána od nejhrubšího po nejjemnější a jsou uzavřena dnem a víkem. Po prosetí materiálu se zaznamenávají hmotnostní zůstatky na jednotlivých sítích, které se za pomoci výpočtu převedou na procentuální hodnotu zůstatku z hmotnosti navážky. Pro grafické vyjádření získaných hodnot nám slouží křivka zrnitosti, která vyjadřuje závislost procenta propadu na velikosti síta. [46]



Obrázek 9: Normová sada sít a vibrační podložka VPK 40 (fotografie autora)

3.1.5. Stanovení nasákavosti

Nasákavost byla stanovena dle normy ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [47]

3.1.6. Chemický rozbor

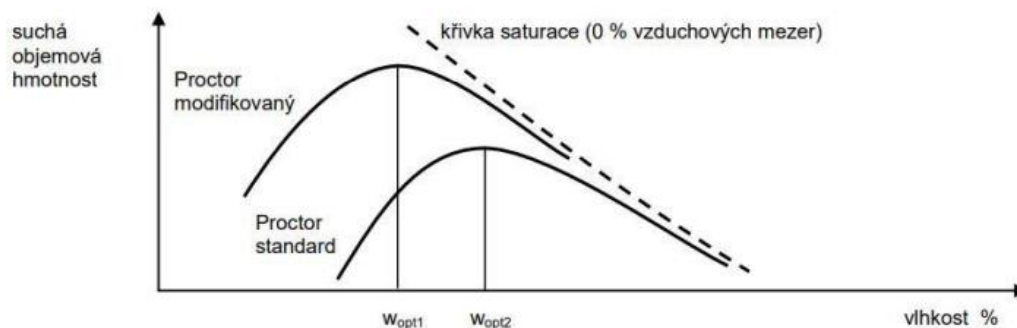
Jedná se o nejstarší metodu určenou ke zjištění chemického složení látky. Vzorky o velmi jemných frakcích se rozpustí za pomoci kyselina převede na roztok. Zastoupení jednotlivých prvků se provádí titračními metodami nebo vážkovými analytickými metodami. Pro běžné prvky je dostačující chyba stanovení s přesností kolem 0,1 hm. %. [48]

3.2. Metodika zkoušení stmelených směsí

3.2.1. Zkouška Proctor standard

Byla provedena dle 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 [49]. Cílem bylo nalezení optimální vlhkosti w_{opt} , při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti ρ_{dmax} zkušebního materiálu. V rámci diplomové práce byla pro vyvážení zkušebních těles vybrána varianta Proctor standard typu A, která je vhodná pro směsi o velikosti maximálního zrna 16 mm. [49]

Nejprve však bylo zapotřebí stanovit optimální vlhkost, při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti. Postup pro zjištění optimální vlhkosti spočíval v postupném přidávání vody do směsi. Získané hodnoty z každé namíchané směsi se vkládaly do grafu do té doby, dokud nedošlo ke zlomu závislosti suché objemové hmotnosti na vlhkosti. Následně byla vytvořena 3 zkušební tělesa s optimální vlhkostí pro danou směs. [49]



Obrázek 10: Závislost suché objemové hmotnosti na vlhkosti [3]

Namíchaná směs se plnila ve třech vrstvách do formy ve tvaru válce o výšce 120 mm a tloušťce 100 mm. Každá vrstva se hutnila pěstem o hmotnosti 2,5 kg po 25 úderech z výšky 305 mm. Po dokončení hutnění poslední vrstvy se zkušební těleso vyjmullo z formy. Zkušební tělesa se zvažila a nechala zrát 28 dní. Po 28 dnech se za pomoci lisu zjistily dosažené pevnosti. [49]

Tabulka 14: Charakteristika jednotlivých zkoušek Proctor standard [49]

Zkouška	Charakteristiky zkoušky	Rozměry	Symbol	Proctorova forma		
				A	B	C
Proctor standard	Hmotnost pěstů	kg		2,5	2,5	15
	Průměr pěstů	mm		50	50	125,5
	Výška dopadu	mm		305	305	600
	Počet vrstev	-	-	3	3	3
	Počet úderů na vrstvu	-	-	25	56	22



Obrázek 11: Ruční zkouška Proctor Standard (fotografie autora)

3.2.2. Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemových hmotností směsí v čerstvém stavu a zatvrdlém stavu bude analogicky vycházet z norem stanovení objemových hmotností pro betonové směsi. Objemová hmotnost v čerstvém stavu bude stanovena dle normy ČSN EN 12350-6 [50] a zatvrdlých směsí dle normy ČSN EN 12390-7 [51].

3.2.3. Stanovení pevnosti v prostém tlaku

Na zkušebních tělesech byla po 28 dnech zjištěna pevnost v tlaku dle normy ČSN EN 13286-41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy. [52] Tlačné desky zkušebního lisu se musí nacházet ve vodorovné poloze a na jejich povrchu nesmí být materiál, který by mohl případně poškodit zkušební těleso nebo zkreslit měření výsledků. Během zatěžování zkušebního tělesa nesmí dojít k jeho posunutí. Zatížení se musí rovnoměrně zvyšovat stálým a plynulým způsobem bez rázů tak, aby k porušení došlo v průběhu 30 s až 60 s po zahájení zatěžování. Následně se vypočítá pevnost v tlaku tělesa jako podíl maximální síly potřebné na porušení zkušebního tělesa a plochy povrchu zkušebního tělesa. Pevnost v tlaku musí být vyjádřena s přesností na 0,1 MPa při pevnosti do 5 MPa. [52]



Obrázek 12: Zkouška pevnosti v tlaku (fotografie autora)

3.2.4. Stanovení odolnosti proti mrazu a vodě

Pro stanovení odolnosti proti mrazu a vodě byla použita stejná válcová zkušební tělesa o rozměrech 100x120 mm dle normy ČSN 73 6124-1 příloha A. [5] Zkouška má být provedena na 3 zkušebních tělesech. Po uplynutí 28denního zrání byly vzorky umístěny na vodou nasycenou podložku tak, aby za pomoci kapilárních sil došlo k nasycení do ustálené hmotnosti. Nasycené vzorky byly následně uloženy do mrazicího boxu po dobu 6 hodin při teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po šesti hodinách byla zkušební tělesa vyjmuta a opět položena na vodou nasycenou podložku po dobu 18 hodin, aby došlo dalšímu nasycení při rozmrazování v laboratorní teplotě. Následně dojde k opětovnému zmrazování těles a cyklus se opakuje. Po ukončení předepsaného počtu cyklů byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku dle ČSN EN 13286-41. Aby vzorky vyhověly zkoušce odolnosti mrazu a vodě, nesmí být výsledné pevnosti v tlaku nižší než 85 % hodnot pevností v tlaku těles nepodrobených této zkoušce. [5],[52]

Tabulka 15: Počty cyklů a zmrazovací teploty [5]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování ($^{\circ}\text{C}$)	Počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti ($^{\circ}\text{C} \times \text{den}$) ^a		
		do 350	350 až 600	nad 600
horní podkladní vrstva	-20 ± 2	10	13	16
spodní podkladní vrstva ^b	-15 ± 2	7	10	13

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

4. Etapa 1 – Výběr surovinové báze – druhotné suroviny

4.1. Výběr vhodných druhotných surovin

Soubor vstupních surovin byl vybrán z hlediska dostupnosti jednotlivých surovin, tak i z hlediska vhodného zapojení v rámci realizace samotných podkladních vrstev železničního spodku. Hlavním záměrem je snaha o vytvoření funkčního materiálu na bázi z čistě druhotných surovin, který bude schopen plnohodnotně nahradit konvenčně používané materiály. Výsledná směs bude složena z druhotné suroviny, pojiva ve formě cementu a jemné příměsi ve formě vedlejšího energetického produktu.

4.2. Analýza vstupních surovin

Stavební recykláty:

- Betonový recyklát (Dufonev R.C., a.s., označení: Bet. r.)
- Cihelný recyklát (Dufonev R.C., a.s., označení: Cihl. r.)
- Asfaltový recyklát (Dufonev R.C., a.s., označení: Asf. r.)
- Směsný recyklát (Dufonev R.C., a.s., označení: Směs. r.)

Vedlejší energetické produkty + druhotné suroviny:

- Škvára ze spalovny komunálních odpadů (SAKO Brno, a.s., označení: SAKO)
- Ložový popel ze spalování biomasy (elektrárna Poříčí, označení: Lože.)
- Fluidní popílek ze spalování biomasy (elektrárna Poříčí, označení: Fluid. p.)
- Uhelná škvára (elektrárna Tušimice, označení: Škv.)
- Vysokoteplotní popílek (elektrárna Tušimice, označení: Vys. p.)
- Odprašky z cementárny (cementárna Mokrý, označení: Odpr. z cem.)
- Odpad z čištění kolejového lože (označení: ZŽO)
- Odpad z autodomíchávače (TBG BETONMIX a.s., označení: Odpad z mix.)

Pojivo:

- Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R (Cementárna Mokrý, označení: CEM 32,5)

4.2.1. Stavební recykláty



Obrázek 13: Směsný recyklát



Obrázek 14: Asfaltový recyklát



Obrázek 15: Cihelný recyklát



Obrázek 16: ŽZO



Obrázek 17: Odpad z autodomíchávače



Obrázek 18: Betonový recyklát

4.2.2. Vedlejší energetické produkty



Obrázek 19: Fluidní popílek Poříčí



Obrázek 20: Ložový popel Poříčí



Obrázek 21: Uhelná škvára Mělník



Obrázek 22: Vysokoteplotní popílek
Tušimice



Obrázek 23: Škvára ze spalovny
komunálních odpadů SAKO



Obrázek 24: Odprašky z cementárny
Mokrá

4.2.3. Pojivo – Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Při výrobě stmelých směsí bylo zvoleno pojivo cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R (Mokrá) od společnosti Českomoravský Cement, a.s. Tento cement je vhodný pro běžné i profesionální použití. Je složen z portlandského slínku, vysokopecní strusky a vápence. Dosahuje nízkého hydratačního tepla. Je fyzikálně a chemicky stálý. Je vhodný jak pro přípravu běžných betonů a malt, tak i pro přípravu podkladních betonů nižších pevností. Označení R neboli rapid má za následek rychlejší vývin počáteční pevnosti od běžných cementů. Cement byl vybrán s ohledem na dosažení poměrně nízkých výsledných pevností a rovněž také kvůli nižší pořizovací ceně. Základní vlastnosti cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R jsou uvedeny v následující tabulce č. 16. [53]

Tabulka 16: Vybrané vlastnosti cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [53]

Základní charakteristiky:	Požadavky:
Pevnost v tlaku počáteční [MPa]	≤ 10
Pevnost v tlaku normalizovaná [MPa]	$\geq 42,5$
Počátek tuhnutí [min.]	≥ 60
Objemová stálost [mm]	0,9
Obsah síranů [% z hmot.]	≤ 3
Obsah chloridů [% z hmot.]	$\leq 0,1$

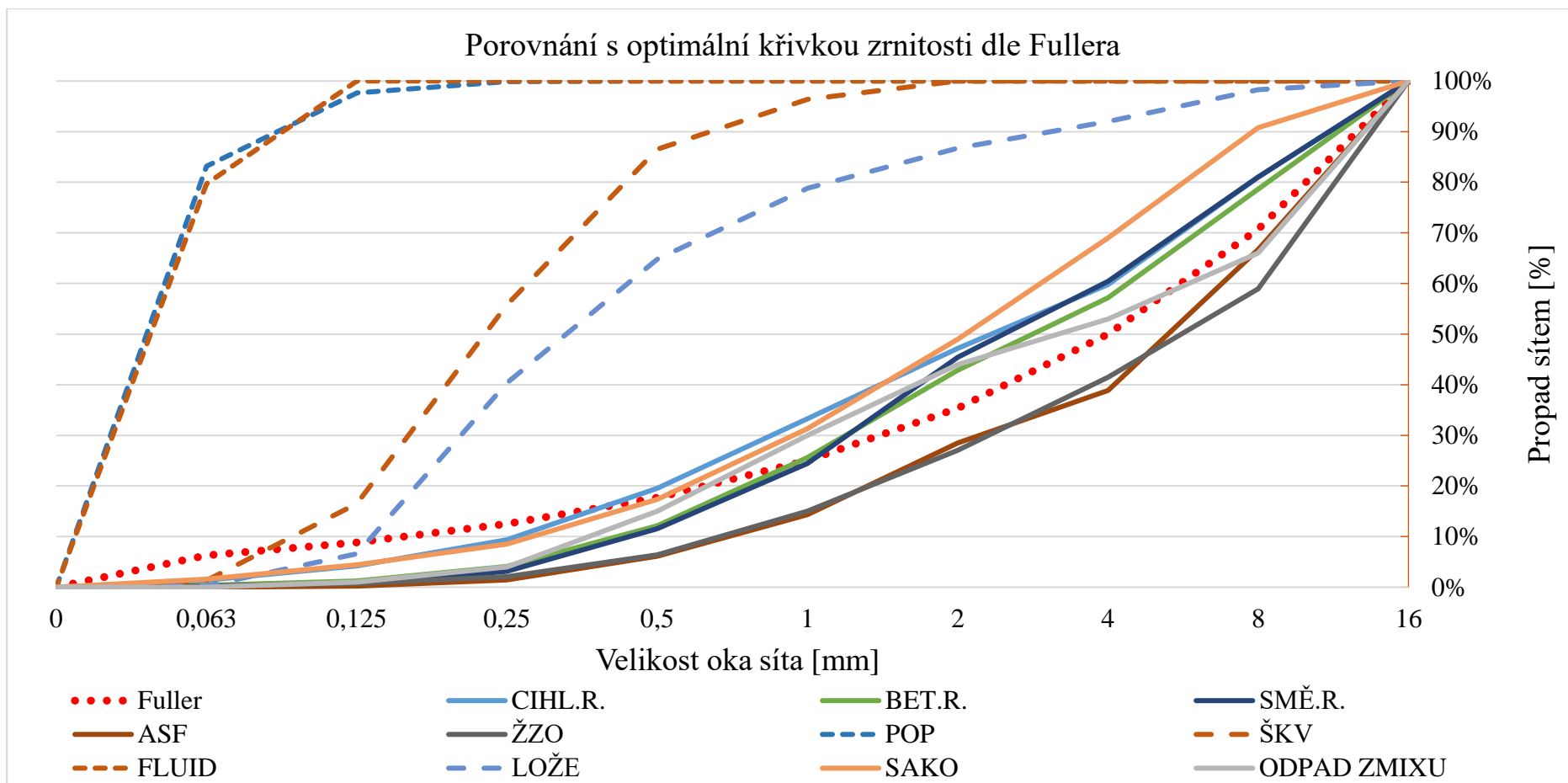
4.3. Vstupní parametry druhotných surovin

U surovin, které tvoří surovinovou bázi, byly stanoveny jejich dominantní vlastnosti, kam patří zrnitost, zbytková vlhkost, nasákavost a sypné hmotnosti. Odebralo se potřebné množství od vybraných vzorků, které bylo následně odesláno do akreditované laboratoře k chemickému rozboru a zjištění obsahu škodlivin v sušině a výluhu. Všechny získané hodnoty byly pak přehledně zpracovány do tabulek a grafů, které jsou uvedeny níže.

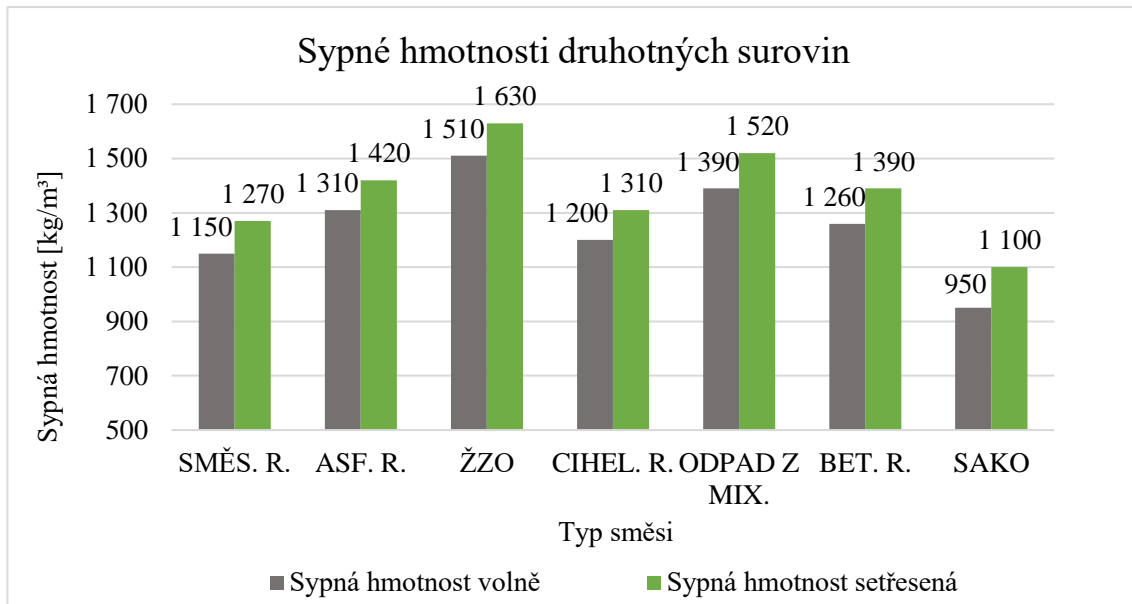
V následujícím grafu č.1 jsou znázorněny křivky zrnitosti jednotlivých druhotných surovin ve společné komparaci s ideální křivkou zrnitosti dle Fullera. Z grafu je tak možné pozorovat, zda se jednotlivé křivky zrnitosti blíží optimální křivce zrnitosti či nikoliv.

Tabulka 17: Vybrané vlastnosti vstupních surovin

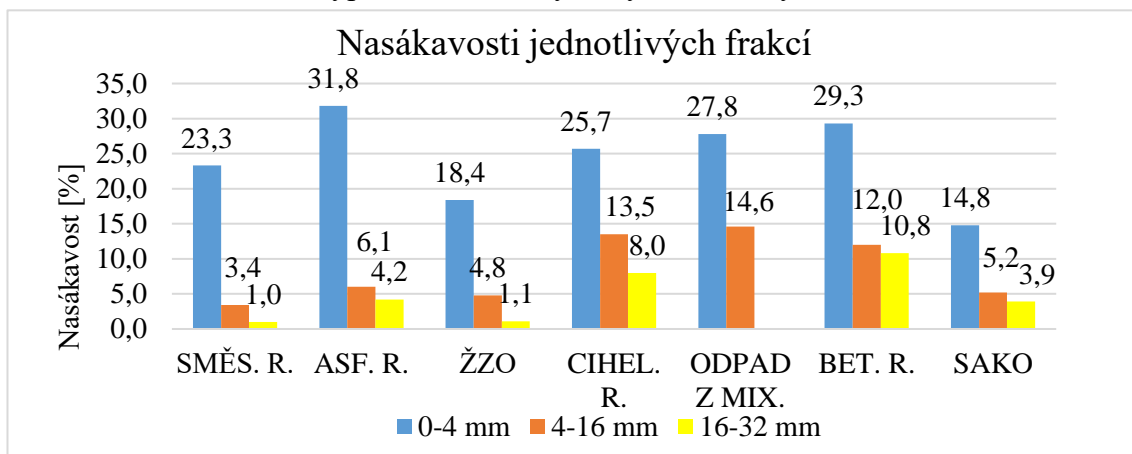
Vybrané vlastnosti			
Směsný recyklát			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1150		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1270		
Vlhkost [%]	7,4		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	23,3	3,4	1,0
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	15,3		
Asfaltový recyklát			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1310		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1420		
Vlhkost [%]	2,1		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	31,8	6,0	4,2
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	16,1		
ZŽO			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1510		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1630		
Vlhkost [%]	0,3		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	18,4	4,8	1,1
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	10,4		
Cihelný recyklát			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1200		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1310		
Vlhkost [%]	3,7		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	25,7	13,5	8,0
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	20,7		
Odpad z autodomíchávače			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1390		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1520		
Vlhkost [%]	1,6		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	27,8	14,6	
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	21,6		
Betonový recyklát			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	1260		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1390		
Vlhkost [%]	1,1		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	29,3	12,0	10,8
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	21,9		
Škvára ze spalovny odpadů (SAKO)			
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m ³]	950		
Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	1100		
Vlhkost [%]	19,2		
Nasákavost [%]	0-4 mm	4-16 mm	16-32 mm
	14,8	5,2	3,9
Nasákavost frakce 0-16 mm [%]	12,5		



Graf 1: Porovnání křivek zrnitosti s optimální křivkou zrnitosti dle Fullera



Graf 2: Sypné hmotnosti vybraných druhotných surovin



Graf 3: Nasákavosti jednotlivých frakcí

4.4. Dílčí zhodnocení etapy 1

Stanovení sypných hmotností vycházelo z normy ČSN EN 1097-3 a slouží jako orientační hodnoty, které by měly dosahovat podobných hodnot jako materiály, které budou nahrazeny druhotnými surovinami v podkladních vrstvách. Ve srovnání s běžně používanou štěrkodrtí však stavební recykláty dosahují celkově nižších hmotností. Zároveň lze také předpokládat, že hutnější a těžší materiál bude dosahovat vyšší mechanické odolnosti a výsledné pevnosti. Suroviny s nižší sypnou hmotností by měly naopak dosahovat nižších výsledných pevností. Nejvyšších sypných hmotností dosáhl odpad z čištění kolejového lože a nejnižších hmotností dosáhla škvára ze spalovny komunálních odpadů.

Nasákavost vstupních surovin byla stanovena podle normy ČSN EN 1097-6. V tabulce č.19 je uvedena průměrná hodnota nasákavosti frakce 0-16 mm, protože při vytváření zkušebních těles metodou Proctor standard se vždy pracovalo se směsí s maximální velikostí zrna 16 mm. Nasákavost ovlivňuje množství záměsové vody a pórovitost výsledného materiálu, která může mít negativní dopad na pevnosti v tlaku. Nejvyšší hodnoty nasákavosti dosáhla u všech surovin frakce 0-4 mm. Tato frakce obsahuje nejjemnější zrna a má vysoký měrný povrch. V rámci hodnocení nasákavosti frakce 0-16 mm dosáhly nejvyšší nasákavosti zástupci cihelného recyklátu (20,7 %), odpadu z autodomíchavače (21,6 %) a betonového recyklátu (21,9 %). Nejnižší nasákavosti u všech zástupců dosáhla naopak frakce 16-32 mm. To bylo způsobeno menším měrným povrchem a nižším zastoupením této frakce ve všech surovinách. Celkové nejnižší nasákavosti frakce 0-16 mm dosáhl odpad z čištění kolejového lože (10,4 %), škvára ze spalovny komunálních odpadů (12,5 %) a směsný recyklát (15,3 %).

Jako další byla stanovena zbytková vlhkost, která je důležitým parametrem z hlediska dávkování záměsové vody při následném testování. Je zapotřebí ji stanovovat vždy před přípravou směsi, aby bylo dodrženo přesné množství přidané záměsové vody.

Pro každý recyklát a vedlejší energetický produkt byl rovněž stanoven síťový rozbor dle normy ČSN EN 933-1. Jednotlivé křivky zrnitosti byly porovnány s optimální křivkou zrnitosti dle Fullera. Na základě porovnání jednotlivých křivek zrnitosti se pak v následujících etapách dávkoval přídavek vedlejšího produktu v substituci za druhotnou surovinu.

4.5. Obsah škodlivin a chemický rozbor surovin

V níže uvedených tabulkách jsou zpracovaná data získaná z obsahu škodlivin a chemického rozboru. Všechna stanovení byla provedena akreditovanou laboratoří. Pro stanovení obsahu škodlivin je uveden limit technických podmínek, dle kterého se jednotlivá kritéria vyhodnocovala. Pro přehlednost jsou jednotlivé výsledky rozlišeny pouze barevně tak, aby bylo jednodušší rozpoznat, zda jsou nebo nejsou jednotlivé limity splněny.

Tabulka 18: Obsah škodlivin v sušině a výluhu jednotlivých vzorků

Ukazatel	Metoda	Jednotka	Limit tech. podmíněk	ASF.R.	ŽZO	CIHL.R.	SMĚS.R.	BET.R.	
benzen	S-VOCGMS01	mg/kg suš.	-						
suma BTEX	S-VOCGMS01	mg/kg suš.	0,4						
suma 7 PCB	S-PCBGMS05	mg/kg suš.	0,2						
extrahovatelné organické halogeny (EOX)	S-EOX-COU	mg/kg suš.	1						
As	S-METAXHB1	mg/kg suš.	10						
Cd	S-METAXHB1	mg/kg suš.	1						
Cr	S-METAXHB1	mg/kg suš.	200						
Cu	S-METAXHB1	mg/kg suš.	-						
Hg	S-METAXHB1	mg/kg suš.	0,8						
Ni	S-METAXHB1	mg/kg suš.	80						
Pb	S-METAXHB1	mg/kg suš.	100						
V	S-METAXHB1	mg/kg suš.	180						
Zn	S-METAXHB1	mg/kg suš.	-						
suma 12 PAU (odpad)	S-PAHGMS05	mg/kg suš.	6						
>C10 - C40 frakce	S-TPHFID01	mg/kg suš.	300						
Ukazatel	Metoda	Jednotka	Limit tech. podmíněk	ASF.R.	ŽZO	CIHL.R.	SMĚS.R.	BET.R.	SAKO
fenoly těkající s v.p.	W-PHI-CFA	mg/l	0,1						
CHSK-Cr	W-COD-SPC	mg/l	40						
Cu	W-METMSFX6	mg/l	190						
Zn	W-METMSFX6	mg/l	720						
elektrická vodivost (25 °C)	W-CON-PCT	mS/m	200						
hodnota pH	W-PH-PCT	-	5,5-11						
nepolární extrahovatelné látky	W-TPH-IR	mg/l	0,2						
pach	W-ODOUR	-	-						

Vyhovuje	
Nevyhovuje	

Tabulka 19: Chemický rozbor stavebních recyklátů

Chemický rozbor							
Parametr	Jednotka	Surovina					
		Cihel. r. 0-4 mm	Směs. r. 0-4 mm	Asf. r. 0-4 mm	Odpad z mixu 0-4 mm	ŽZO 0-4 mm	Bet. r. 0-4 mm
Sušina při 105 °C	[%]	99,5	99,60	99,60	99,80	99,8	99,6
Chloridy	[mg/kg suš.]	141	168,00	111,00	253,00	158	126
SiO ₂	[% suš.]	62,9	60,00	58,30	76,70	67,6	60,6
Sírany jako SO ₄ ⁻²	[% suš.]	0,66	0,24	<0,10	<0,10	0,15	0,25
P ₂ O ₅	[mg/kg suš.]	929	1 300	928	967	1760	921
P	[mg/kg suš.]	406	569	405	422	767	402
Al ₂ O ₃	[% suš.]	8,37	9,02	9,08	9,88	10,8	8,3
Fe ₂ O ₃	[% suš.]	2,91	3,31	3,02	1,44	6,44	2,67
MgO	[% suš.]	1,46	1,81	1,59	0,743	1,98	1,48
MnO	[% suš.]	0,0659	0,0683	0,0749	0,0344	0,0771	0,0552
K ₂ O	[% suš.]	2,22	2,03	2,50	4,72	2,7	2,39
Na ₂ O	[% suš.]	1,22	1,30	1,71	1,89	1,98	1,4
TiO ₂	[% suš.]	0,281	0,32	0,30	0,177	0,656	0,211

Tabulka 20: Chemický rozbor ostatních surovin

Chemický rozbor							
Parametr	Jednotka	Surovina					
		Vys. p. Tušimice	Fluid. p. Poříčí	Odprašky Mokrá	Lož. p.	Uhel. š. Mělník	SAKO
Sušina při 105 °C	[%]	99,70	99,80	99,8	99,7	82,2	99,7
Chloridy	[mg/kg suš.]	76,00	552,00	167 000	<40	142	0,48
SiO ₂	[% suš.]	51,40	55,20	7,05	77,4	48,6	45,8
Sírany jako SO ₄ ⁻²	[% suš.]	0,60	1,05	11,5	<0,10	0,57	1,53
P ₂ O ₅	[mg/kg suš.]	1 830	10 300	585	4560	1 750	1,53
P	[mg/kg suš.]	798	4 500	256	1990	764	*
Al ₂ O ₃	[% suš.]	25,70	7,48	1,64	6	25,8	9,22
Fe ₂ O ₃	[% suš.]	10,10	2,79	0,834	1,83	11,7	7,57
MgO	[% suš.]	1,17	1,72	0,523	1,25	1,15	1,86
MnO	[% suš.]	0,04	1,01	0,0761	0,559	0,104	0,132
K ₂ O	[% suš.]	1,54	4,53	32,1	3,07	1,4	1,94
Na ₂ O	[% suš.]	0,26	1,04	0,821	0,838	0,342	3,24
TiO ₂	[% suš.]	1,19	0,46	0,116	0,229	1,11	1,29
Volné CaO	[% suš.]	*	11,08	11,78	0,87	*	*

* ...hodnoty nebyly stanoveny

Odchyly od ostatních (maximální)	
Ostatní hodnoty	
Odchyly od ostatních (minimální)	

V rámci hodnocení obsahu škodlivin byl určen rozsah limitu hodnocení podle SŽDC: obecně technické podmínky č.j. 25 640/06. Obecně lze konstatovat, že vzorky uvedené v tabulce č.18 vyhověly většině druhu škodlivin v sušině. Odpad čištění kolejového lože ŽZO nevyhověl limitu technických podmínek na obsah arsenu v mg/kg suš. Dále všechny vzorky nevyhověly limitu technických podmínek na obsah PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky) v mg/kg suš. Vzorek asfaltového recyklátu nevyhověl limitu kontaminace uhlovodíků (C10-C40) v mg/kg suš. V rámci hodnocení obsahu škodlivin ve výluhu

vyhověly všechny vzorky až na škváru ze spalovny komunálních odpadů, která nevyhověla limitům CHSK-Cr, elektrické konduktivity a hodnotě pH.

V tabulce č. 19 je uveden chemický rozbor pro stavební recykláty a v tabulce č. 20 pro ostatní suroviny. Pro fluidní popílek, odprašky z cementárny a ložový popel spalování byl navíc stanoven obsah volného CaO. U surovin s vyšším obsahem volného vápna bude možné jejich přínos pozorovat z hlediska zvýšení koncových pevností po jejich přidání u výsledných receptur. Pro zpřehlednění a vyhodnocení byly opět za pomoci barevného rozlišení vyznačeny maximální a minimální odchylky od ostatních hodnot. Dále je možné pozorovat pro popeloviny z fluidního spalování biomasy vyšší obsah SiO₂. To je zapříčiněno přidáváním křemičitého písku při spalování biomasy pro dosažení vyšší objemové hmotnosti.

4.6. Zhodnocení etapy 1

V rámci první etapy byla z dostupné surovinové báze provedena celková analýza vstupních surovin. Surovinovou bázi tvoří stavební recykláty, vedlejší energetické produkty, druhotné suroviny a pojivo. Za pojivo byl zvolen cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, protože u výsledných směsí nejsou požadovány vysoké výsledné pevnosti a také je přijatelný z ekonomického hlediska. Stanovily se zrnitosti vybraných surovin a křivky porovnaly s optimální křivkou dle Fullera. Vedlejší energetické produkty vykázaly vysoké zastoupení jemných frakcí. Stavební recykláty, odpad z čištění kolejového lože a škvára ze spalovny komunálních odpadů vykazují křivky zrnitosti podobající se optimální křivce zrnitosti dle Fullera. Dále byly stanoveny sypné hmotnosti, zbytkové vlhkosti a nasákavosti vstupních surovin. Nejvyšších sypných hmotností dosáhl zástupce z čištění odpadů kolejového lože. Nejvyšší zbytkové vlhkosti dosáhl směsný recyklát. Nasákavost se stanovila pro tři dílčí frakce. Obecně lze konstatovat, že nejvyšší nasákavosti dosáhla nejjemnější frakce u všech surovin. Hrubší frakce všech surovin vykázaly podstatně nižší nasákavosti. Celkové nejnižší nasákavosti dosáhla škvára ze spalovny komunálních odpadů. Rozhodující je nasákavost frakce 0-16 mm, ze které se budou za pomoci zkoušky Proctor standard vyrábět zkušební tělesa. V závěru první etapy byl akreditovanou laboratoří stanoven obsah škodlivin a chemický rozbor surovin. Na jehož základě lze obecně konstatovat, že všechny suroviny vyhověly většině ukazatelů.

5. Etapa 2 – Pilotní ověřování surovinových směsí

5.1. Základní testování

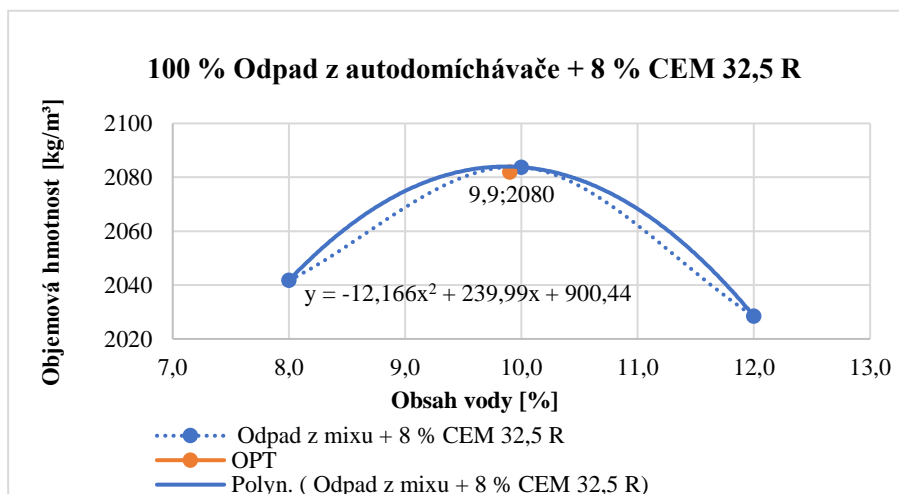
Úvod experimentálního ověřování se věnoval základnímu testování vlivu příměsí pojivové složky ve formě portlandského směsného cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R v dávce 8 %. Dávka 8 % byla záměrně určena jako vyšší, aby bylo možné získat základní pevnosti, ze kterých bylo následně možné vycházet pro další experimentální ověřování. Ložový popel a vysokoteplotní popílek byl namíchán bez přídavku cementu, protože se předpokládalo, že již obsahují zbytky volného pojiva obsažené přímo z produkce. U úletového popílku z elektrárny Poříčí se nepodařilo vyrobit zkušební tělesa, to mohlo být způsobeno vlivem vyššího vývinu tepla v důsledku hydratace volného vápna.

Namíchaly se jednotlivé směsi a zkouškou Proctor standard (metoda A) byla následně stanovena optimální vlhkost a suchá maximální objemová hmotnost. Poté byla od každé směsi vyrobena tři zkušební tělesa s optimální vlhkostí. Stanovila se objemová hmotnost v čerstvém stavu a tělesa se nechala zrát po dobu 28 dní. Po uplynutí zrační doby byla stanovena pevnost v tlaku, objemová hmotnost v zatvrdlém stavu a zbytková vlhkost.

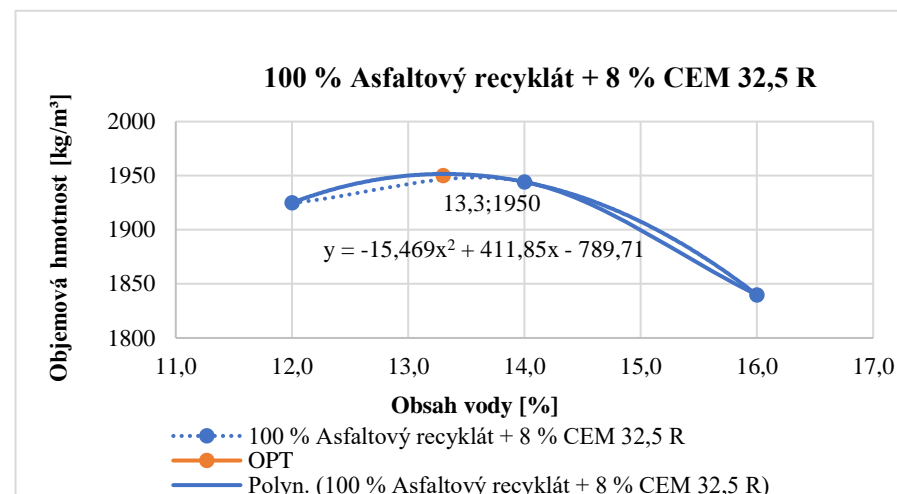
Níže jsou uvedeny všechny grafické zpracování zkoušky Proctor standard pro každou namíchanou směs a tabulky s naměřenými hodnotami.

Tabulka 21: Koncepce základního testování

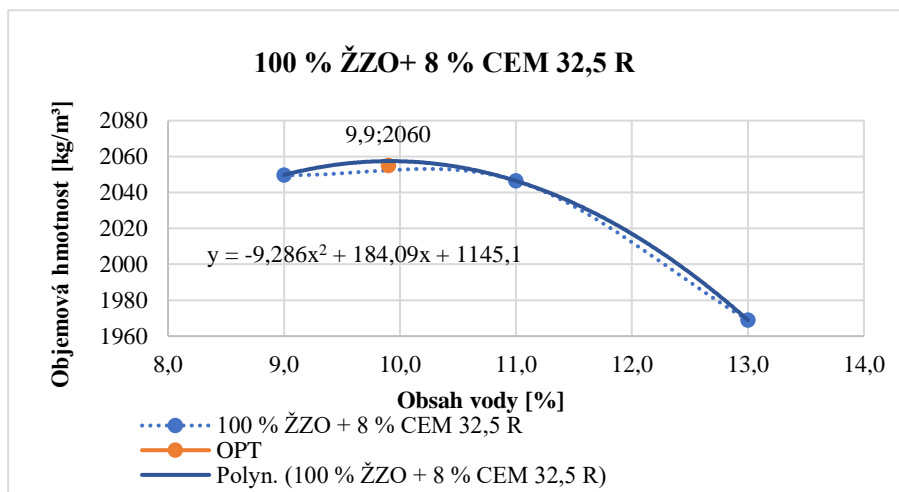
Základní testování	
Pilotní směsi	
Vybraná druhotná surovina + 8 % cementu	Vybraný VEP + 0 % cementu



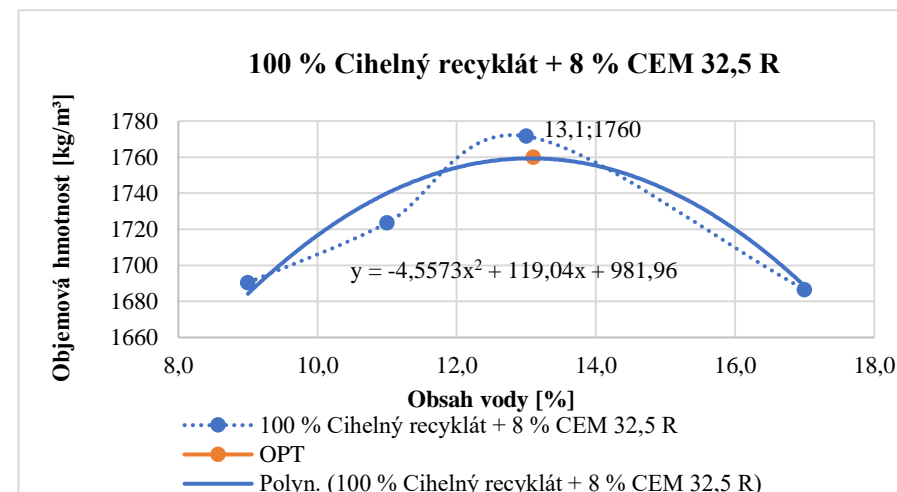
Graf 4: Zkouška Proctor standard pro odpad z autodomíchávače



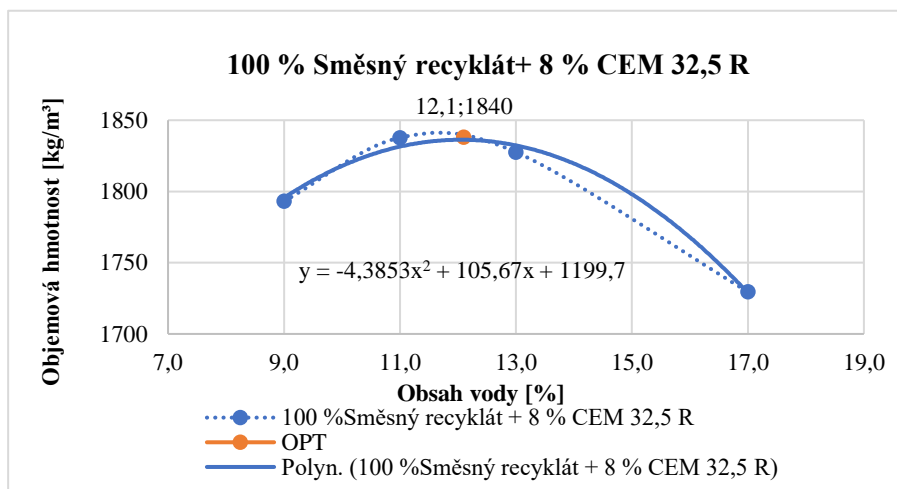
Graf 5: Zkouška Proctor standard pro asfaltový recyklát



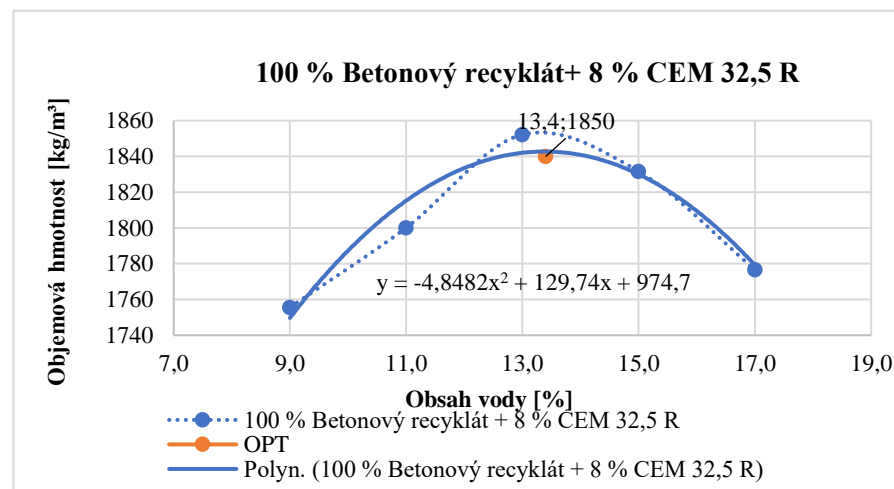
Graf 6: Zkouška Proctor standard pro ŽZO



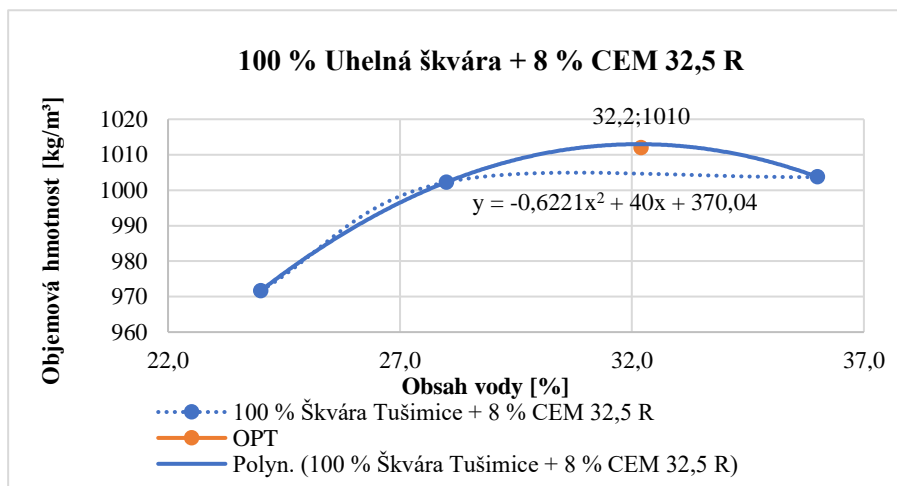
Graf 7: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát



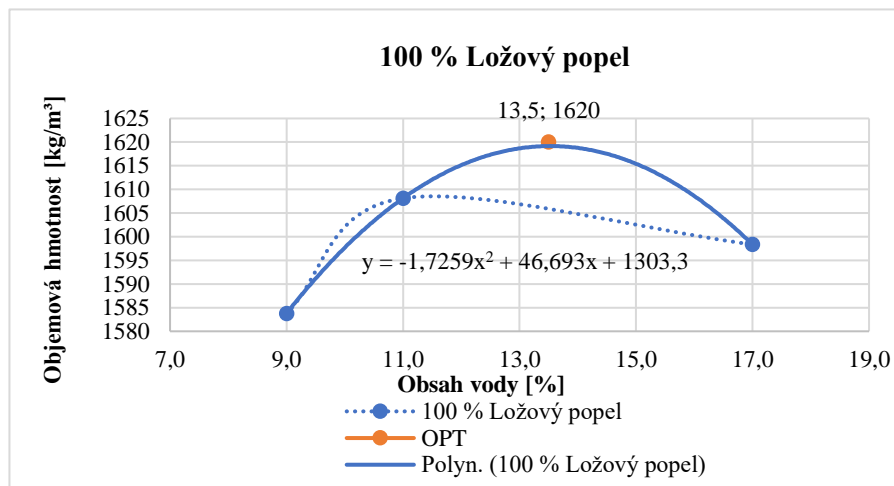
Graf 8: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát



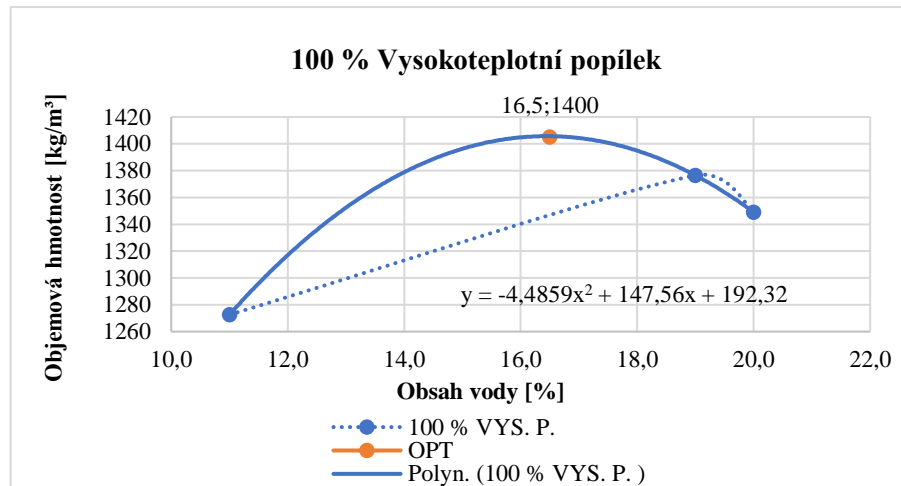
Graf 9: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát



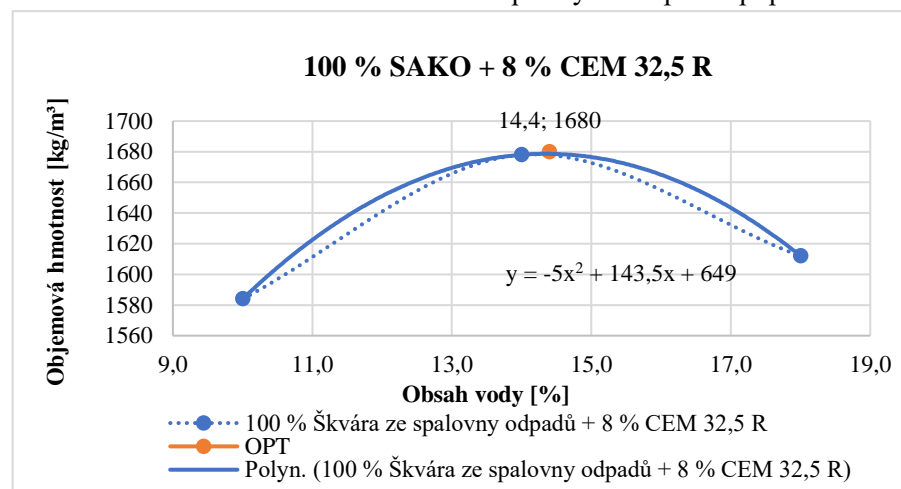
Graf 10: Zkouška Proctor standard pro uhelnou škváru



Graf 11: Zkouška Proctor standard pro ložový popel



Graf 12: Zkouška Proctor standard pro vysokoteplotní popílek



Graf 13: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny komunálních odpadů

Tabulka 22: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti směsí s dávkou 8 % CEM

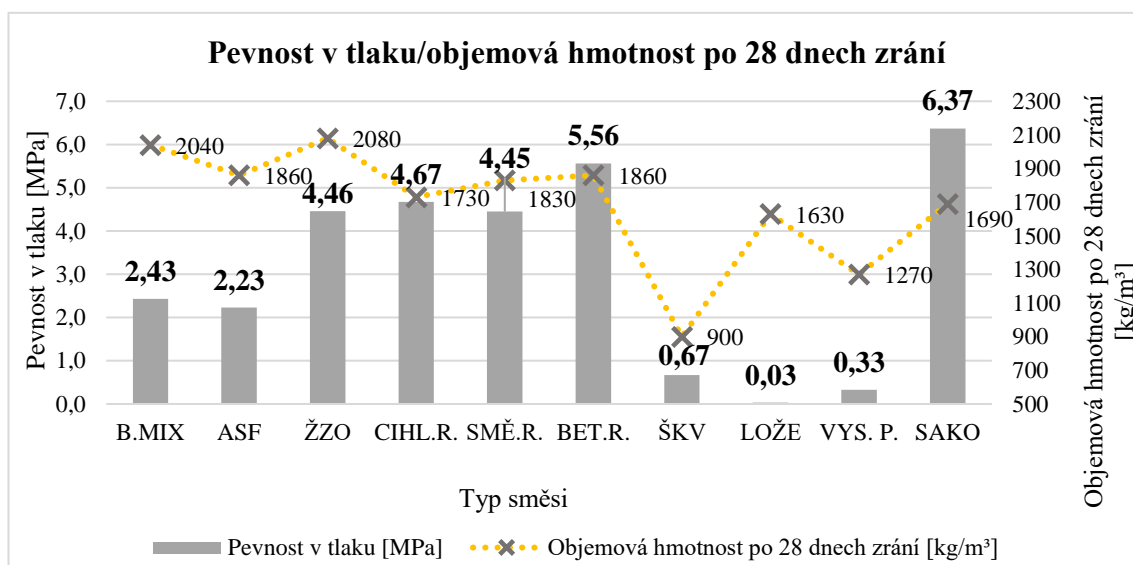
Receptura	Optimální vlhkost [%]	Maximální OH [kg/m ³]
Odpad z autodomíhávače + 8 % CEM	9,9	2080
Asfaltový recyklát + 8 % CEM	13,3	1950
ŽZO + 8 % CEM	9,9	2060
Cihelný recyklát + 8 % CEM	13,1	1760
Směsný recyklát + 8 % CEM	12,1	1840
Betonový recyklát + 8 % CEM	13,4	1850
Škvára + 8 % CEM	32,2	1010
Ložový popel	13,5	1620
Vysokoteplotní popílek	16,5	1400
SAKO + 8 % CEM	14,4	1680

U pilotních směsí byly za pomoci zkoušky Proctor standard stanoveny optimální vlhkosti a maximální suché objemové hmotnosti. Nejvyšší optimální vlhkosti dosáhla uhelná škvára, protože obsahovala vysoké množství zbytkové vlhkosti. Nejvyšší

objemové hmotnosti dosáhl odpad z autodomíchávače a odpad z čištění kolejového lože (ŽZO).

Tabulka 23: Vybrané vlastnosti receptur

	OH vlhkého vzorku [kg/m ³]	Vlhkost po 28 dnech [%]	OH suchého vzorku [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
Odpad z autodomíchávače + 8 % CEM	2250	0,6	2040	2,43
Asfaltový recyklát + 8 % CEM	2120	0,9	1860	2,23
ŽZO + 8 % CEM	2280	0,7	2080	4,46
Cihelný recyklát + 8 % CEM	1970	1,1	1730	4,67
Směsný recyklát + 8 % CEM	2060	1,1	1830	4,45
Betonový recyklát + 8 % CEM	2120	1,2	1860	5,56
Škvára + 8 % CEM	1300	1,5	900	0,67
Ložový popel	1840	1,3	1630	0,03
Vysokoteplotní popílek	1500	1,5	1270	0,33
SAKO + 8 % CEM	1830	6,2	1690	6,37



Graf 14: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti s 8 % CEM po 28 dnech

5.1.1. Zhodnocení základního testování

Po uplynutí zrační doby byly na zkušebních tělesech stanoveny objemové hmotnosti, zbytkové vlhkosti a pevnosti v tlaku, která je z hlediska hodnocení stěžejní. Při vyhodnocování výsledných pevností se vycházelo z požadavku uvedených v SŽDC S4. Nejvyšších pevností v tlaku dosáhl cihelný (4,67 MPa), směsný (4,45 MPa), betonový recyklát (5,56 MPa), odpad z čištění kolejového lože (4,46 MPa) a škvára ze spalovny

komunálních odpadů (6,37 MPa). Tyto receptury tak vyhověly pevnostnímu požadavku min. pevnosti v tlaku 2,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny, tak i požadavku 3,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny odolné proti mrazu a vodě. Odpad z autodomíchávače a asfaltový recyklát nedosáhl min. pevnosti 2,5 MPa. Ostatní receptury dosáhly velice nízkých pevností. Nejnižších pevností dosáhly VEP. Ložový popel a vysokoteplotní popílek byl namíchán bez přídavku cementu. Obecně všechny VEP lze charakterizovat jako jemnozrné materiály, které samostatně nejsou schopny bez přidání cementu vytvořit pevnou strukturu z jednotlivých zrn, a tak nedosáhly požadovaných pevností.

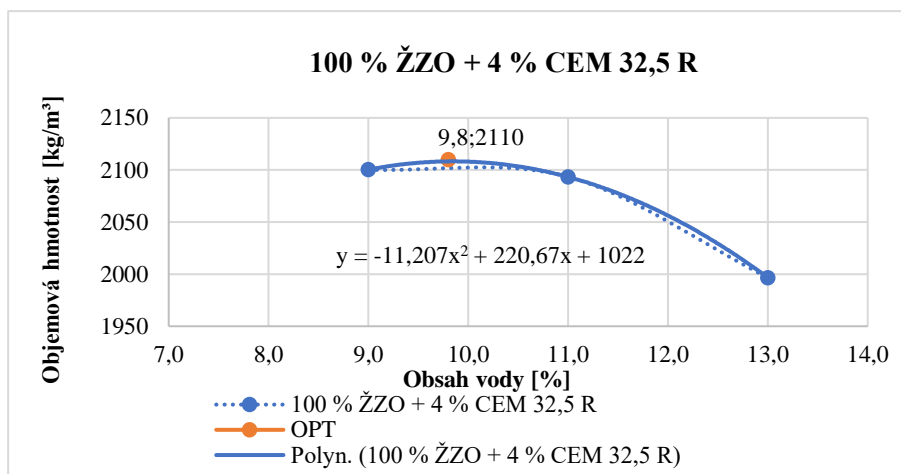
5.2. Optimalizace dávky pojiva

Na základě zjištěných výsledků v první fázi testování byli pro navazující experimentální ověřování vybráni všichni zástupci receptur, kteří dosáhli minimální pevnosti v tlaku 2,5 MPa, tudíž pro vrstvy aktivní zóny bez požadavku na odolnost proti mrazu. Optimalizace spočívala v redukci množství přidaného pojiva z původních 8 % na výsledné 4 %. Byly namíchány směsi se sníženou dávkou pojiva pro směsný, betonový, cihelný recyklát. Dále pak pro odpad z čištění kolejového lože a škvárou ze spalovny komunálních odpadů.

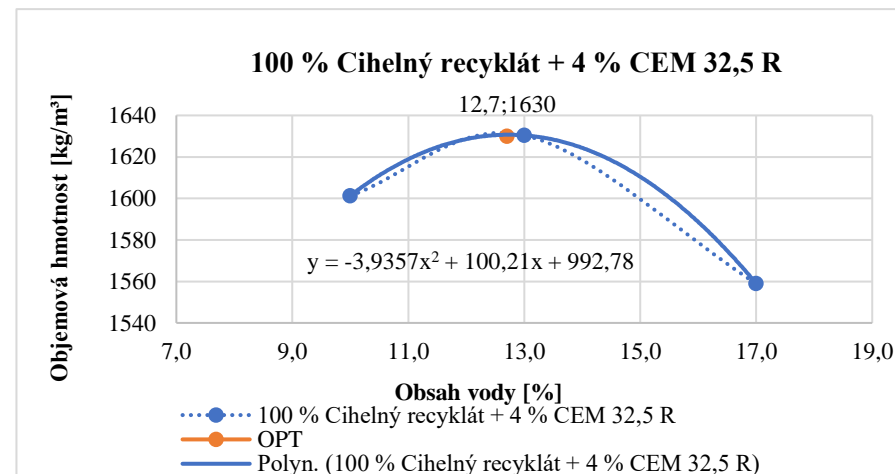
Každá směs byla namíchána dle optimální vlhkosti a byla vyrobena tři zkušební tělesa. Níže jsou uvedeny jednotlivé grafy metody Proctor standard. Dále jsou uvedeny tabulky se získanými daty a grafické zpracování výsledných pevností.

Tabulka 24: Optimalizovaná dávka pojiva

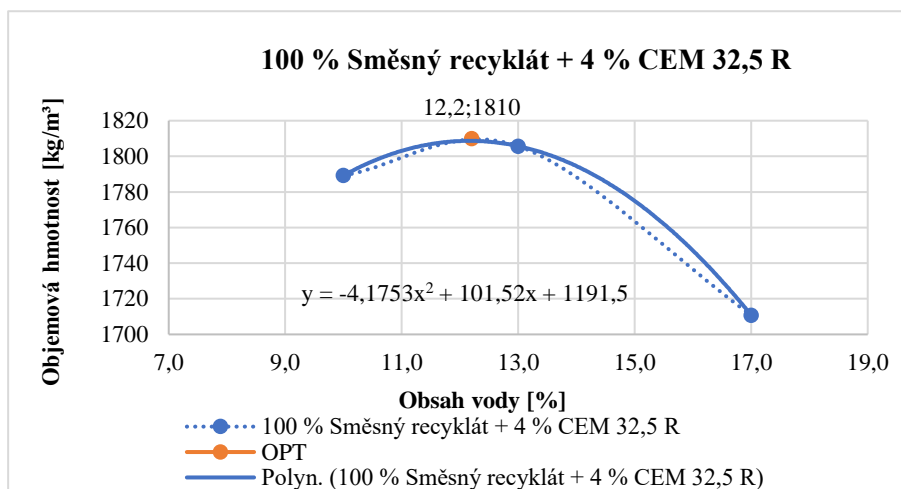
Základní testování	
Pilotní směsi + optimalizovaná dávka pojiva	
Vybraná druhotná surovina + 4 % cementu	Vybraný VEP + 4 % cementu



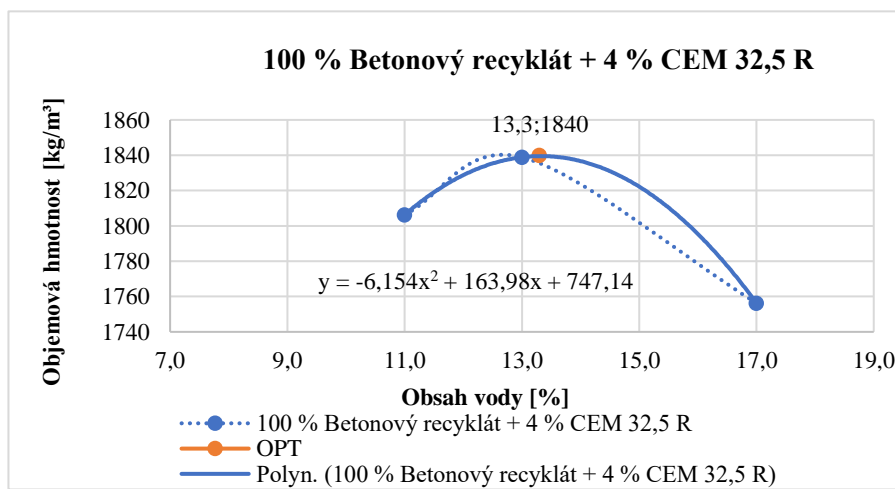
Graf 15: Zkouška Proctor standard pro ŽZO



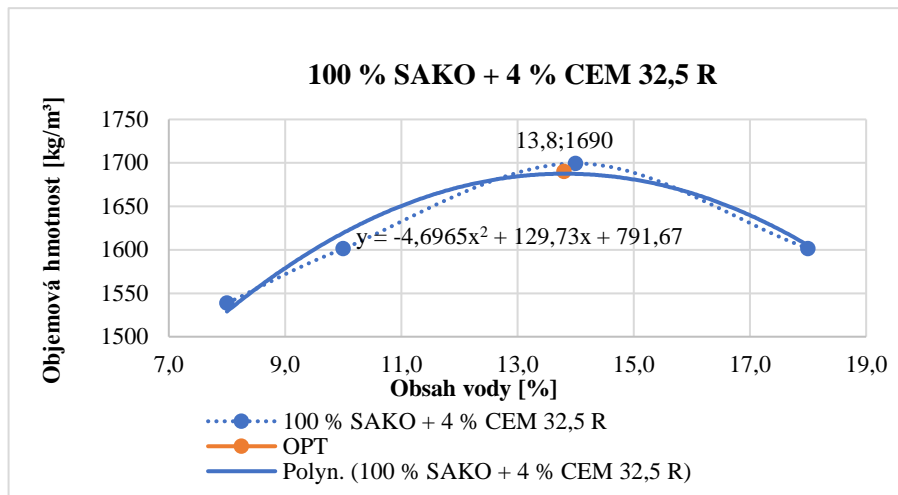
Graf 16: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát



Graf 17: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát



Graf 18: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát



Graf 19: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny komunálních odpadů

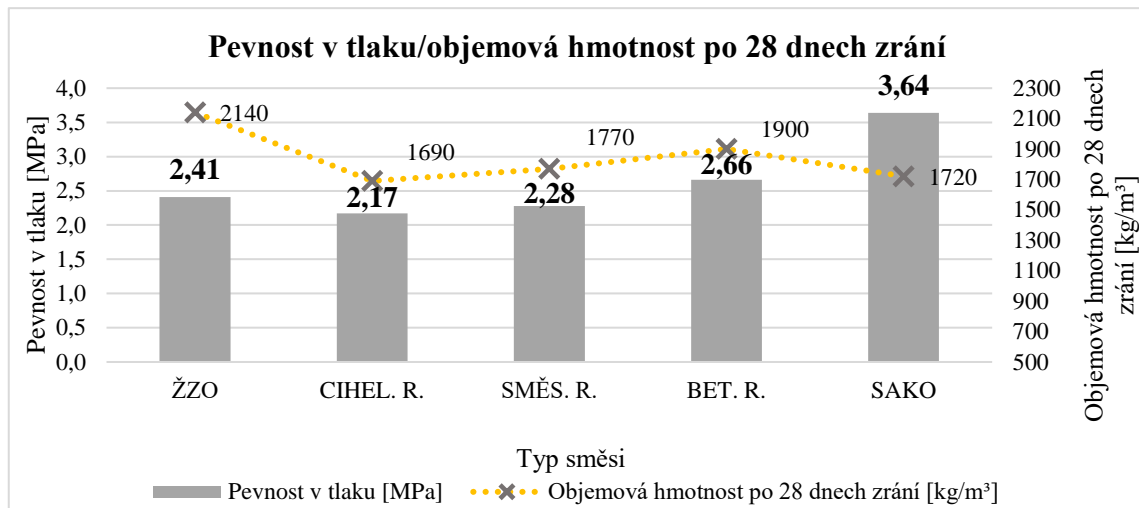
Tabulka 25: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti směsí s dávkou 4 % CEM

Receptura	Optimální vlhkost [%]	Maximální OH [kg/m ³]
ŽZO + 4 % CEM	9,8	2110
Cihelný recyklát + 4 % CEM	12,7	1630
Směsný recyklát + 4 % CEM	12,2	1810
Betonový recyklát + 4 % CEM	13,3	1840
SAKO + 4 % CEM	13,8	1690

Optimální vlhkosti a maximální suché objemové hmotnosti receptur se sníženou dávkou pojiva 4 % jsou analogicky podobné jako u receptur s původní dávkou pojiva 8 %.

Tabulka 26: Vybrané vlastnosti směsí

	OH vlhkého vzorku [kg/m ³]	Vlhkost po 28 dnech [%]	OH suchého vzorku [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
ŽZO + 4 % CEM	2270	4,2	2140	2,41
Cihelný recyklát + 4 % CEM	1830	3,7	1690	2,17
Směsný recyklát + 4 % CEM	1930	1,8	1770	2,28
Betonový recyklát + 4 % CEM	2080	6,2	1900	2,66
SAKO + 4 % CEM	1850	7,1	1720	3,64



Graf 20: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti s 4 % CEM po 28 dnech

Obecně lze konstatovat, že snížení množství cementu na polovinu původní dávky mělo podobný dopad i na snížení koncových pevností. Nejvyšší pevnosti dosáhla škvára ze spalovny komunálních odpadů (3,64 MPa), která jako jediná vyhověla pevnostnímu požadavku 3,5 MPa. Pevnosti v tlaku min. 2,5 MPa, tedy pro vrstvy aktivní zóny vyhověl i betonový recyklát (2,66 MPa). Ostatní receptury nevyhověly minimálnímu pevnostnímu požadavku.

5.3. Zhodnocení etapy 2

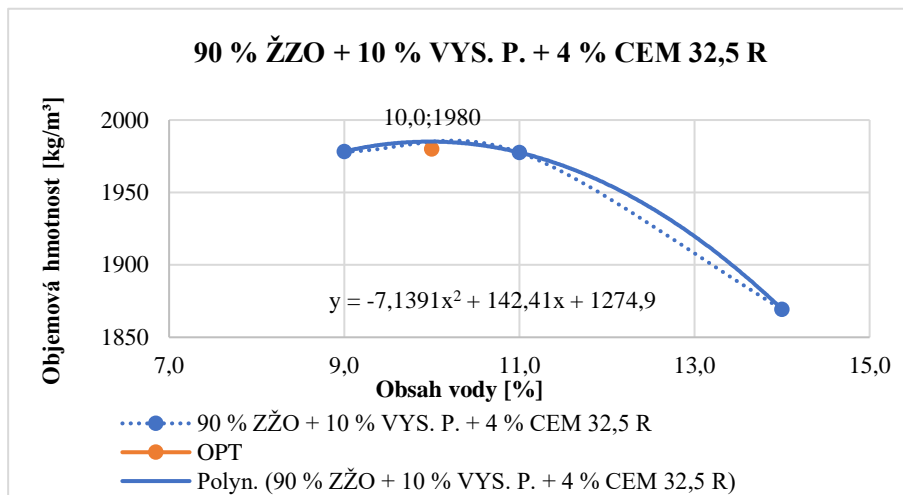
Druhá etapa se věnovala pilotnímu ověřování surovinových směsí. V základním testování byl u vybraných surovin ověřen vliv přídatku 8 % pojiva ve formě cementu. Zkouškou Proctor standard byla pro všechny receptury stanovena optimální vlhkost a suchá maximální objemová hmotnost. Stavební recykláty, odpad z čištění kolejového lože dosáhly vyšších pevností než 2,5 MPa, což lze považovat za přijatelné pro aktivní zónu. U těchto receptur byla následně optimalizována dávka pojiva, která spočívala v redukci na poloviční množství. Pevnostnímu požadavku min. 2,5 MPa pak vyhověla receptura betonového recyklátu a škvára ze spalovny komunálních odpadů.

6. Etapa 3 – Optimalizace surovinových směsí

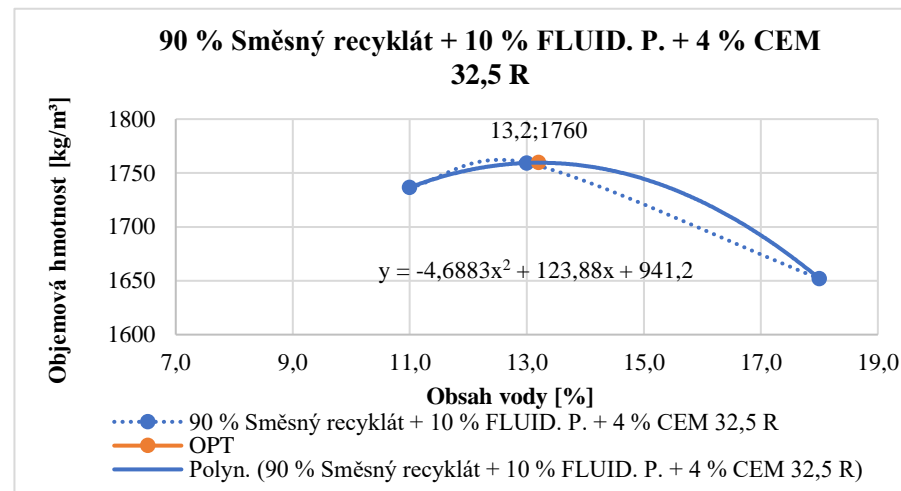
Na základě dosažených pevností v rámci druhé etapy, kdy minimálnímu pevnostnímu požadavku 2,5 MPa vyhověly pouze dvě receptury, došlo k následné optimalizaci surovinových směsí. Tato modifikace byla kromě redukce dávky pojiva obohacena přídavkem vedlejšího produktu v substituci za druhotnou surovinu. Za použité vedlejší produkty byl zvolen vysokoteplotní popílek, fluidní popílek a odprašky z cementárny vždy v zastoupení 10 % vůči vybraným surovinám. U škváry ze spalovny komunálních odpadů (SAKO) se kvůli dosažení vysokých pevností, kromě přidání vedlejších produktů, zredukovala dávka pojiva na 3 % cementu. Pro každou směs byla opět za pomoci zkoušky Proctor standard stanovena optimální vlhkost a suchá maximální objemová hmotnost. Na vyzrálých zkušebních vzorcích došlo ke stanovení objemových hmotností, zbytkových vlhkostí a pevností v tlaku. Získané informace je možné vidět v následujících grafických zpracováních a tabulkách.

Tabulka 27: Upravené primární směsi

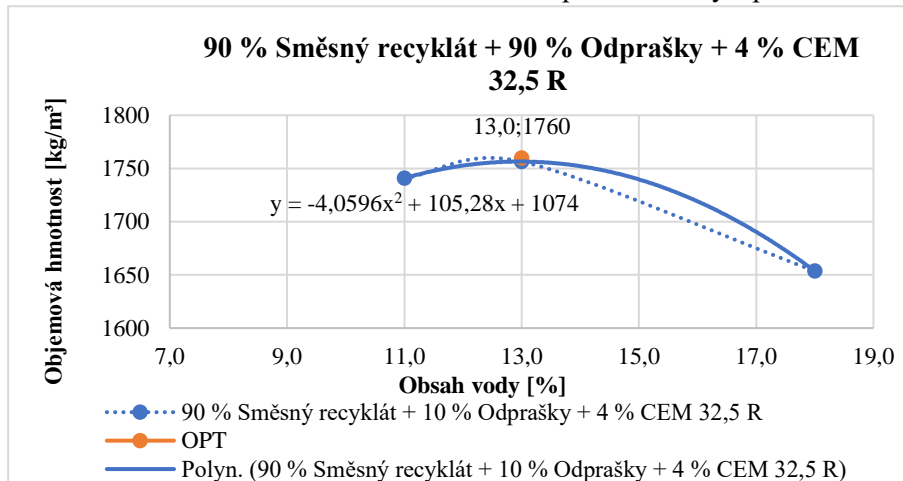
Modifikované testování		
Optimalizované primární směsi		
90 % Druhotná surovina + 4 % cementu + 10 % Vys. p., Fluid. p.	90 % Druhotná surovina + 4 % cementu + 10 % Odprašky z cem.	90 % SAKO + 3 % cementu + 10 % Fluid. p.



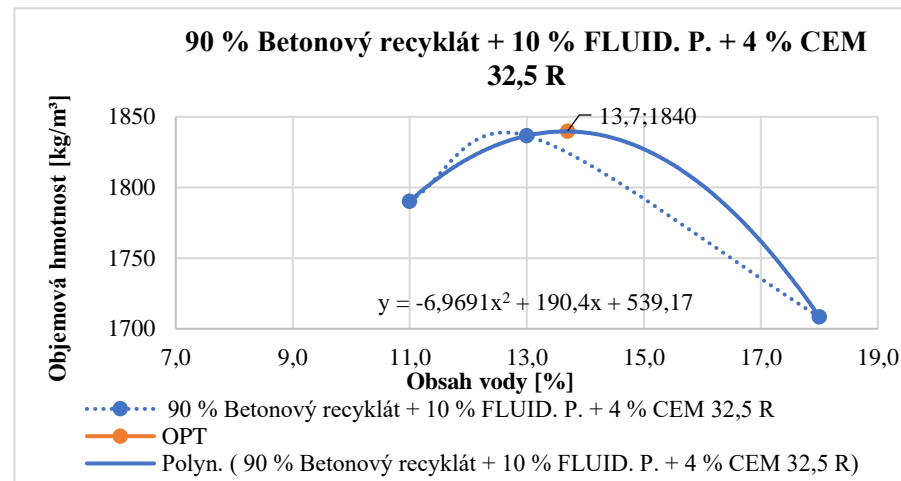
Graf 21: Zkouška Proctor standard pro ŽZO + vys. p.



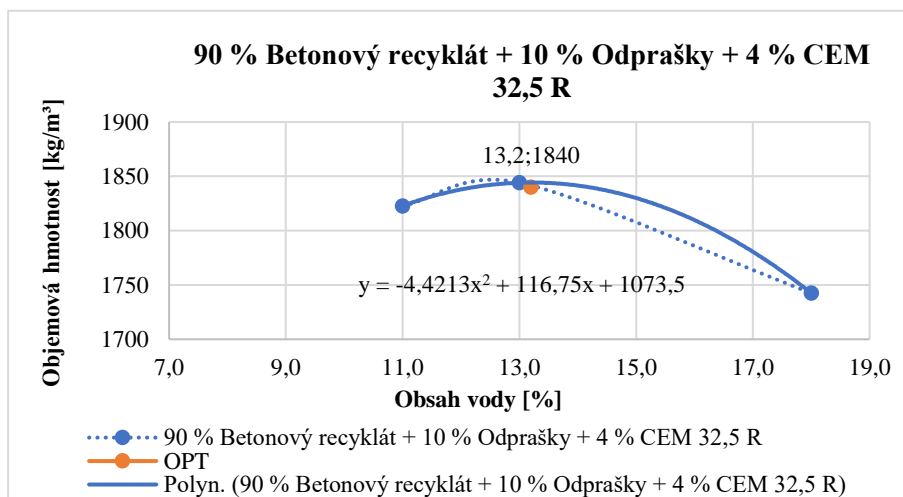
Graf 22: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát + fluid. p.



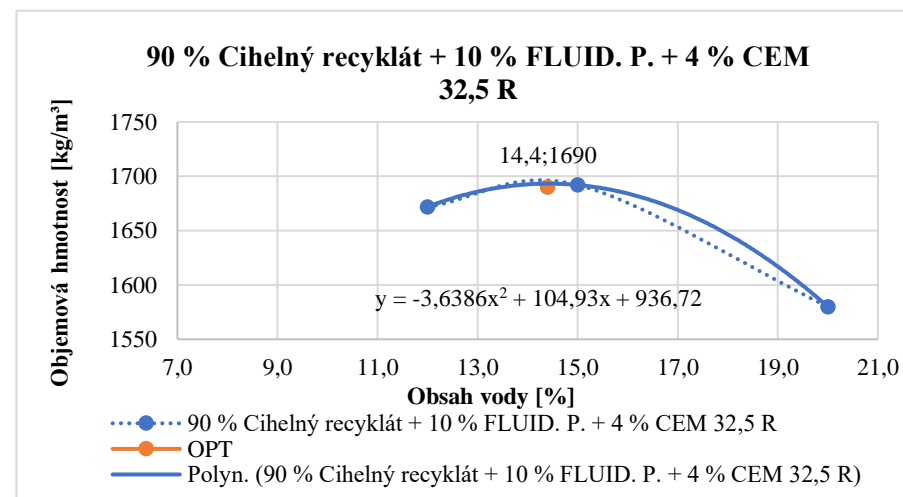
Graf 23: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát + odprašky z cem.



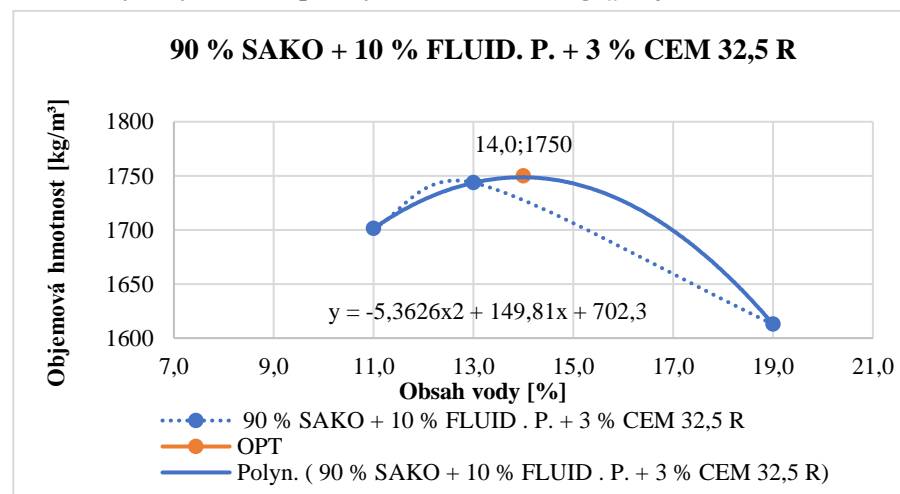
Graf 24: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát + fluid. p.



Graf 25: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát + odprašky z cem.



Graf 26: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát + fluid.p.



Graf 27: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny odpadů + fluid.p.

Tabulka 28: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti modifikovaných směsí

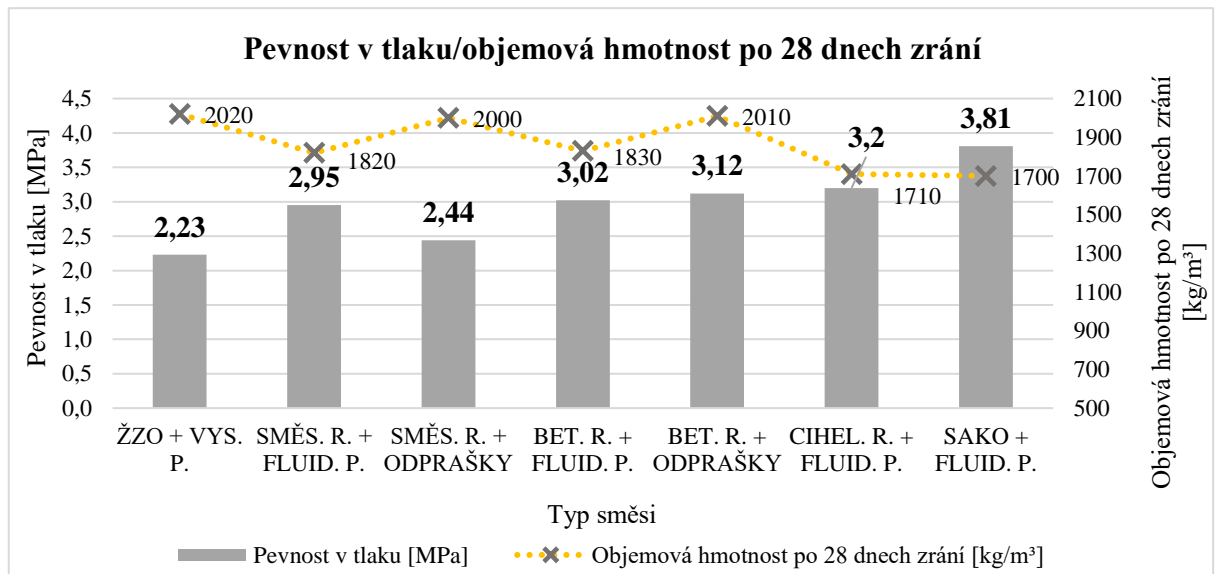
Receptura	Optimální vlhkost [%]	Maximální OH [kg/m ³]
ŽZO + Vys. p. + 4 % CEM	10,0	1980
Směsný recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	13,2	1760
Směsný recyklát + Odprašky z cem. + 4 % CEM	13,0	1760
Betonový recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	13,7	1840
Betonový recyklát + Odprašky z cem. + 4 % CEM	13,2	1840
Cihelný recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	14,4	1690
SAKO + Fluid. p. + 3 % CEM	14,0	1750

Metodou Proctor standard byly stanoveny optimální vlhkosti a suché maximální objemové hmotnosti. Přidavkem vedlejšího produktu lze pozorovat nepatrné zvýšení všech optimálních vlhkostí. To mohlo být způsobeno zvýšením měrného povrchu směsí právě v důsledku jeho přidání, protože se jedná o jemnozrný materiál.

Tabulka 29: Vybrané vlastnosti modifikovaných směsí

	OH vlhkého vzorku [kg/m ³]	Vlhkost po 28 dnech [%]	OH suchého vzorku [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
ŽZO + Vys. p. + 4 % CEM	2200	2,8	2020	2,23
Směsný recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	1940	3,1	1820	2,95
Směsný recyklát + Odprašky z cem. + 4 % CEM	2040	2,9	2000	2,44
Betonový recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	2040	5,0	1830	3,02
Betonový recyklát + Odprašky z cem. + 4 % CEM	2150	8,3	2010	3,12
Cihelný recyklát + Fluid. p. + 4 % CEM	1920	2,4	1710	3,20
SAKO + Fluid. p. + 3 % CEM	1910	8,7	1700	3,81

Přidavek vedlejšího produktu měl pozitivní vliv na zvýšení koncových pevností ve většině případů. Pokles pevnosti je možné pozorovat pouze u receptury z odpadu čistění kolejového lože s přidavkem vysokoteplotního popílku.



Graf 28: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti modifikovaných směsí po 28 dnech

Z grafu výše uvedeném lze konstatovat, že požadavku pevnosti min. 2,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny vyhověly všechny směsi až na odpad z čištění kolejového lože s vysokoteplotním popílkem (2,23 MPa) a směsný recyklát s odprašky z cementárny (2,44 MPa). Škvára ze spalovny komunálních odpadů vyhověla i požadavku 3,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny odolné proti mrazu a vodě, protože dosáhla pevnosti 3,81 MPa.

6.1. Zhodnocení etapy 3

V rámci třetí etapy experimentální části byly pilotní receptury modifikovány o 10% přídavek vedlejšího produktu v substituci za druhotnou surovinu. Pro každou recepturu byla stanovena optimální vlhkost při maximální objemové hmotnosti za pomoci zkoušky Proctor standard. Zkušební tělesa po 28 dnech zrání se rovněž podrobila stanovení pevnosti v tlaku, objemových hmotností v zatvrdlém stavu a zbytkové vlhkosti. Přídavek VP se pozitivně neprojevil u receptury odpadu kolejového lože s vysokoteplotním popílkem a směsného recyklátu s odprašky z cementárny. Obě receptury nevyhověly požadavku pevnosti min. 2,5 MPa. Z hlediska dosažených pevností ostatních surovinových variant lze přídavek vedlejších produktů považovat za pozitivní. Nejvyšší výsledné pevnosti dosáhla receptura se škváry ze spalovny komunálních odpadů s 10% přídavkem fluidního popílku a sníženou dávkou pojiva na 3 % (3,81 MPa). U směsí, které byly optimalizovány o přídavek odprašků z cementárny bylo po uplynutí zrací doby možno pozorovat tvorbu výkvětů solí na jejich povrchu. To bylo zapříčiněno vysokým

obsahem chloridů v odprašcích z cementárny, který byl zjištěn na základě chemického rozboru. Výkvěty solí však neměly negativní dopad na výsledné koncové pevnosti.



Obrázek 25: Výkvěty solí na směsném recyklátu s přidavkem odprašků z cementárny

7. Etapa 4 – Pokročilé testování směsí

V poslední etapě experimentální části byly na základně získaných poznatků vybrány dvě finální receptury. Za prvního zástupce byl zvolen betonový recyklát s fluidním popílkem a 4 % cementu, který vyhověl požadavku min. pevnosti 2,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny. U této receptury se pozitivně projevil přídavek vedlejšího energetického produktu. Dalším rozhodujícím faktorem výběru smíšeného recyklátu byla také jeho nízká pořizovací cena oproti ostatním zástupcům. Jako druhá byla vybrána škvára ze spalovny komunálních odpadů (SAKO), protože vyhověla pevnostnímu požadavku 3,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny odolné proti působení mrazu a vody. Této pevnosti dosáhla i za snížené dávky pojiva a přídavku vedlejšího energetického produktu, což byly rozhodující faktory výběru. Obě směsi byly namíchány s dávkou vody zjištěnou z předchozího stanovování dle metody Proctor standard tak, aby dosáhly optimální vlhkosti a suché maximální objemové hmotnosti. Na zkušebních vzorcích 28denního staří byla v rámci pokročilého testování provedena zkouška odolnosti proti mrazu a vodě dle normy ČSN 73 6124-1 příloha A.

Tabulka 30: Vybrané receptury pro pokročilé testování

Pokročilé testování směsí	
90 % Betonový recyklát + 10 % Fluidní popílek + 4 % cementu	90 % Škvára ze spalovny komunálních odpadů + 10 % Fluidní popílek + 3 % cementu

7.1. Odolnost proti mrazu a vodě na vybraných recepturách

Stanovení odolnosti proti mrazu a vodě vycházelo normy ČSN 73 6124-1 příloha A. Byl určen počet zmrazovacích cyklů, který vycházel z tabulky uvedené v normě. Zvolil se cyklus pro stmelenu směs spodních podkladních vrstev, pro které trvá jeden zmrazovací cyklus 24 hodin. Index mrazu v této spodní podkladní vrstvě je 350 až 600 °C za jeden den. Zkušební tělesa se uložila do mrazícího zařízení, kde byla vystavena mrazu -15 °C po dobu šesti hodin. Po uplynutí této doby byly zkušební vzorky vytaženy

a položeny na mokrou podložku tak, aby bylo po dobu 18 hodin rozmrazování při laboratorní teplotě zajištěno kapilární sycení vzorků. Po 18 hodinách se tělesa opět vložila do mrazicího zařízení. Tento celý postup se 7krát a 10krát opakoval. Po ukončení posledního požadovaného cyklu byla na zkušebních tělesech stanovena pevnost v tlaku. Získané pevnosti vzorků oslabených působením mrazu a vodu by měly dosahovat alespoň 85 % pevnosti v tlaku vzorků neoslabených těmito vnějšími vlivy.



Obrázek 26: 90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM po 7. před zmrazovacími cykly



Obrázek 27: 90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM před zmrazovacími cykly

Tabulka 31: Hodnoty pevností po 7. cyklech

Odolnost proti mrazu a vodě po 7. cyklech					
Receptura	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tlaku po 7. cyklech [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku po 7. cyklech [MPa]	Srovnání pevností
90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM	3,07	3,02	1,32	1,38	pokles o 54,3 %
	2,87		1,45		
	3,13		1,38		
90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM	3,82	3,81	1,95	2,05	pokles o 46,2 %
	4,31		2,05		
	3,31		2,14		



Obrázek 28: 90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM po 7. cyklech



Obrázek 29: 90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM po 7. cyklech

Tabulka 32: Hodnoty pevností po 10. cyklech

Odolnost proti mrazu a vodě po 10. cyklech					
Receptura	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tlaku po 10. cyklech [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku po 10. cyklech [MPa]	Srovnání pevností
90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM	3,07	3,02	1,12	1,10	pokles o 63,6 %
	2,87		1,09		
	3,13		1,10		
90 % SAKO + 10 % % Fluid. p. + 3 % CEM	3,82	3,81	1,76	1,74	pokles o 54,4 %
	4,31		1,81		
	3,31		1,65		



Obrázek 30: 90 % Bet. r. + 10 %
Fluid. p. + 4 % CEM po 10. cyklech



Obrázek 31: 90 % SAKO + 10 %
Fluid. p. + 3 % CEM po 10. cyklech

Na vzorcích v průběhu provádění zkoušky odolnosti proti mrazu a vodě bylo možné pozorovat značné změny v jejich struktuře. Se zvyšujícím se počtem cyklů docházelo k postupnému rozvoji prasklin, šířících se zejména v místě styku jednotlivých hutněných vrstev během jejich výroby. Propagace prasklin byla způsobena vlivem kapilárního sycení a následného zmrazení, kdy voda dosáhne přibližně 9krát většího objemu. To se i negativně projevilo na vysokém poklesu pevností po ukončení předepsaných cyklů. Jedná se tedy o hmoty, které nejsou odolné vůči působení mrazu a vodě. Při vytváření vrstev aktivní zóny je však zapotřebí tyto vrstvy chránit proti mrazu.

Obě směsi byly rovněž podrobeny stanovení obsahu škodlivin akreditovanou laboratoří. Získané výsledky byly porovnány se surovinami bez přidání vedlejšího energetického produktu. Pro zpřehlednění jsou získané hodnoty barevně rozlišeny, zda vyhovují nebo nevyhovují daným limitům.

Tabulka 33: Obsah škodlivin směsí pokročilého testování

Ukazatel	Metoda	Jednotka	Limit tech. podmínek	BET.R.F.	SAKO.F.
benzen	S-VOCGMS01	mg/kg suš.	-		
suma BTEX	S-VOCGMS01	mg/kg suš.	0,4		
suma 7 PCB	S-PCBGMS05	mg/kg suš.	0,2		
extrahovatelné organické halogeny (EOX)	S-EOX-COU	mg/kg suš.	1		
As	S-METAXHB1	mg/kg suš.	10		
Cd	S-METAXHB1	mg/kg suš.	1		
Cr	S-METAXHB1	mg/kg suš.	200		
Cu	S-METAXHB1	mg/kg suš.	-		
Hg	S-METAXHB1	mg/kg suš.	0,8		
Ni	S-METAXHB1	mg/kg suš.	80		
Pb	S-METAXHB1	mg/kg suš.	100		
V	S-METAXHB1	mg/kg suš.	180		
Zn	S-METAXHB1	mg/kg suš.	-		
suma 12 PAU (odpad)	S-PAHGMS05	mg/kg suš.	6		
>C10 - C40 frakce	S-TPHFID01	mg/kg suš.	300		
Ukazatel	Metoda	Jednotka	Limit tech. podmínek	BET.R.F.	SAKO.F.
fenoly těkající s v.p.	W-PHI-CFA	mg/l	0,1		
CHSK-Cr	W-COD-SPC	mg/l	40		
Cu	W-METMSFX6	mg/l	190		
Zn	W-METMSFX6	mg/l	720		
elektrická vodivost (25 °C)	W-CON-PCT	mS/m	200		
hodnota pH	W-PH-PCT	-	5,5-11		
nepolární extrahovatelné látky	W-TPH-IR	mg/l	0,2		
pach	W-ODOUR	-	-		
Vyhovuje					
Nevyhovuje					

7.2. Zhodnocení etapy 4

Poslední etapa experimentální části se věnovala pokročilému testování vybraných směsí. Byly vybrány zástupci betonového recyklátu s fluidním popínkem a škváry ze spalovny komunálních odpadů s fluidním popínkem. Od každé vybrané směsi bylo vyrobeno 6 zkušebních těles, která se nechala zrát po dobu 28 dní. Po uplynutí zračí doby byly vzorky podrobeny zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě dle normy ČSN 73 6124-1. Počet cyklování se stanovil na 7 cyklů (první sada vzorků) a 10 cyklů (druhá sada vzorků). Po ukončení daného počtu cyklování byla na zkušebních vzorcích stanovena pevnost v tlaku. Receptura betonového recyklátu, fluidního popínku a cementu vykázala pokles pevností po 7. cyklech o 54,3 % na 1,38 MPa a po 10. cyklech o 63,6 % na 1,10 MPa. U receptury škváry ze spalovny komunálních odpadů, fluidního popínku a cementu bylo možné pozorovat pokles pevností po 7. cyklech o 46,2 % na 2,05 MPa a po 10. cyklech

o 54,4 % na 1,74 MPa. Betonový recyklát prokázal vyšší pokles pevností než škvára ze spalovny komunálních odpadů. Zkušební vzorky této receptury více absorbovaly vodu během kapilárního sycení mezi zmrazovacími cykly. Obě receptury tak jsou vhodné do aktivní zóny bez odolnosti proti účinkům působení mrazu a vody.

V závěru poslední etapy byl rovněž stanoven obsah škodlivin v sušině a výluhu. Betonový recyklát vyhověl narozdíl od škváry ze spalovny komunálních odpadů všem limitům technických podmínek, a tak je z hlediska hodnocení ekologie přijatelným zástupcem.

7.3. Návrh funkčního vzorku

Hlavním cílem diplomové práce je nalezení funkčního materiálu pro podkladní vrstvy železničního tělesa z druhotných surovin. Navržený funkční vzorek je složen z betonového recyklátu s 10% přídavkem fluidního popílku a 4 % cementu. Fluidní popílek byl dávkován jako příměs v substituci za betonový recyklát. Za pomoci zkoušky Proctor standard byla stanovena optimální vlhkost 13,7 % a maximální suchá objemová hmotnost 1840 kg/m³. Dle optimální vlhkosti byla vyrobena zkušební tělesa o rozměrech 100 x 120 mm, která se následně nechala zrát po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách. Po uplynutí zračí doby byla stanovena průměrná pevnost v tlaku 3,02 MPa. Byl tak splněn požadavek minimální pevnosti 2,5 MPa pro vrstvy aktivní zóny dle hodnocení SŽDC S4. Tato receptura byla následně podrobena pokročilému testování, které spočívalo ve zjištění odolnosti proti mrazu a vodě. Dále byl také stanoven obsah škodlivin. Pokles pevností vzorků po ukončení cyklování byl vyšší než 85 % původních pevností. Konkrétně u betonového recyklátu byl po 7 cyklech pokles pevnosti 54,3 % na výsledných 1,38 MPa a po 10 cyklech na konečnou hodnotu 1,10 MPa. Z pohledu vlivu na životní prostředí splnila receptura betonového recyklátu všechny limity, předepsané technickými podmínkami.

8. Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou využití druhotných materiálu do konstrukčních vrstev a tělesa železničního spodku. Hlavním cílem této práce bylo vyvinout nový pokročilý materiál podkladních vrstev na bázi čistě z druhotných surovin.

V teoretické části diplomové práce jsou shrnuty celkové informace týkající se jednotlivých témat uvedených v zadání práce. Je zde uvedena charakteristika konstrukčních vrstev, materiály používané pro stmelené podkladní vrstvy, požadavky na směsi stmelené cementem a podmínky pro vytvoření podkladních vrstev čistě z druhotných surovin.

Experimentální část je rozdělena na 4 etapy a v jejím úvodu je uvedena metodika zkoušení surovin a stmelených směsí. V první etapě experimentální části bylo z dostupné surovinové báze, složené ze stavebních recyklátů, vedlejších produktů a pojiv, provedeno stanovení vstupních parametrů. Křivky zrnitosti jednotlivých surovin byly porovnány s optimální křivkou zrnitosti dle Fullera. Stavební recykláty, odpad z čištění kolejového lože a škvára ze spalovny komunálních odpadů mají podobné křivky zrnitosti jako je optimální křivka zrnitosti dle Fullera. U vedlejších produktů je možné pozorovat vyšší zastoupení jemnějších frakcí. Nejvyšší zbytkovou vlhkost zaznamenala škvára ze spalovny komunálních odpadů. Všechny suroviny vykázaly nižší sypné hmotnosti než konvenčně používané šterkodrti. Nejvyšší nasákavosti dosáhly nejjemnější frakce 0-4 mm. Z hlediska hodnocení nasákavosti byla rozhodující nasákavost frakce 0-16 mm. Nejvyšších nasákavostí frakce 0-16 mm dosáhl cihelný recyklát (20,7 %), odpad z autodomíchače (21,6 %) a betonový recyklát (21,9 %). V rámci hodnocení obsahu škodlivin v sušině vyhověli všichni zástupci většině hodnoceným parametrům až na obsah PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky). Podmínkám hodnocení výluhů vyhověly všem požadavkům všechny suroviny až na škváru ze spalovny komunálních odpadů, která nesplnila předepsané limity pro chemickou spotřebu kyslíku, elektrickou konduktivitu a hodnotu pH.

Druhá etapa se v rámci úvodu pilotního testování věnovala vlivu přídatku 8% pojiva na výsledné pevnosti. Za pomoci zkoušky Proctor standard byly stanoveny optimální vlhkosti a maximální suché objemové hmotnosti všech namíchaných receptur. Na vyzrálých zkušebních tělesech byla stanovena zbytková vlhkost, objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Při vyhodnocování výsledných pevností se vycházelo z požadavku na

minimální pevnosti v tlaku dle SŽDC S4. U receptur, které dosáhly pevnosti v tlaku bezpečně vyšší než 2,5 MPa (limit pro aktivní zónu) došlo k redukcí pojiva z původních 8 % na 4 %. Tato optimalizace se týkala stavebních recyklátů, odpadu z čištění kolejového lože a škváry ze spalovny komunálních odpadů. Snížení dávky pojiva na polovinu mělo podobný trend v poklesu pevnosti, kdy pevnostnímu požadavku min. 2,5 MPa vyhověl betonový recyklát a škvára ze spalovny komunálních odpadů.

Ve třetí etapě byly všechny receptury s dávkou 4 % pojiva dále optimalizovány o přídavek 10% příměsi ve formě vedlejšího produktu v substituci za druhotnou surovinu. U škváry byla navíc snížena i dávka pojiva na 3 %. Za použité vedlejší produkty byl zvolen fluidní popílek, vysokoteplotní popílek a odprašky z cementárny. Vliv přídavku vedlejšího produktu měl i pozitivní vliv na výsledné pevnosti. Přídavek vedlejšího produktu se projevil negativně pouze v případě odpadů z čištění kolejového lože s vysokoteplotním popínkem a směsného recyklátu s odprašky z cementárny. Ve všech ostatních případech byl splněn požadavek min. pevnosti 2,5 MPa. Nejvyšší pevnosti dosáhla škvára ze spalovny komunálních odpadů s přídavkem fluidního popínku (3,81 MPa).

V poslední etapě experimentální části se dvě vybrané receptury podrobily pokročilému testování ve formě zkoušky odolnosti proti mrazu a vodě. Jako první byl vybrán betonový recyklát, fluidní popílek a 4 % cementu. Za druhého zástupce byla zvolena škvára ze spalovny komunálních odpadů (SAKO), fluidní popílek a 3 % cementu. Získané pevnosti všech vzorků oslabených působením mrazu a vodou nedosáhly alespoň 85 % pevnosti v tlaku vzorků bez zatížení mrazem a vodou. Vzorky tak nejsou vhodné do tohoto expozičního prostředí. Ekologickému hodnocení vyhověla lépe receptura na bázi betonového recyklátu, a proto byla navržena za funkční vzorek materiálu pro zřízení vrstvy zemního tělesa bez požadavku na odolnost proti mrazu a vodě.

Hlavní cíl diplomové práce lze považovat za splněný. Za návrh funkčního vzorku byla zvolena receptura betonového recyklátu s 10% přídavkem fluidního popínku a dávkou pojiva 4 %. Byl tak navržen nový pokročilý materiál pro zřízení vrstvy zemního tělesa výhradně na bázi druhotných surovin, který dostatečně vyhověl pevnostním i ekologickým požadavkům, kladeným na vrstvy aktivní zóny bez kombinovaného zatížení mrazem a vodou. Pro jeho následné využití v praxi tak bude nezbytně zajištěno jeho odvodnění. Za přínosné lze považovat také použití příměsi popínku ze spalování biomasy, s kterou není dosud mnoho zkušeností využívání v této oblasti.

Použitá literatura a zdroje

- [1] SŽDC S4 – Železniční spodek. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2008.
- [2] PLÁŠEK, O. Úvod do železničních staveb. Dostupné také z: https://www.fce.vutbr.cz/zel/plasek.o/studium/5_zeleznice_uvod.pdf
- [3] ZAJÍČEK, J. Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [4] Ministerstvo dopravy. *Navrhování vozovek pozemních komunikací: Technické podmínky*. 2010.
- [5] ČSN 73 6124-1: Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelovaných hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění kontroly a shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [6] Kolektiv autorů. Školení o evropských normách pro stavbu vozovek 3 – Směsi stmelené hydraulickými pojivy (SENS 3). Vydává Sdružení pro výstavbu silnic Praha, Prosecká 74, 190 00 Praha 9. Redakce PRAGOPROJEKT, a.s., Oddělení publikačních a školicích činností, Prosecká 74, 190 00 Praha 9 v Praze 2008.
- [7] NEJEZCHLEB, M. *Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku modernizovaných tratí* [online]. Brno, 2000 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43169046-Konstrukcni-vrstvy-telesa-zeleznicniho-spodku-modernizovanych-trati.html>
- [8] TP 170 – Technické podmínky 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2004.
- [9] STEHLÍK, D. Pozemní komunikace II-přednášky. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [10] FRIDRICHOVÁ, M. Maltoviny II-přednášky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019.
- [11] ČSN EN 14227-1: Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi stmelené cementem. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [12] JIRÁSEK, J. a M. VAVRO. Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3.

- [13] PEŘKA, L. Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1: TP 2.4. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011, 17 s., ISBN 978-80-87438-13-8.
- [14] BELL, F. G. *Ground engineer's reference book*. London; Boston : Butterworths, 1987. ISBN 0408011734 9780408011730.
- [15] DROCHYTKA, R. a P. MATULOVÁ. *Lehké stavební látky: Modul M01*. Brno, 2006. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [16] SIKOROVÁ, V. Způsoby využití by-passových cementářských odprašků v technologii stavebních hmot [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=188931
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.
- [17] TP 210, Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, obor pozemních komunikací, 2011.
- [18] Analýza současného stavu vybraných komodit druhotných surovin a jejich zdrojů včetně vize rozvoje daného odvětví: Podklad pro aktualizaci Politiky druhotných surovin České republiky. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. Prosinec 2018. Praha, 2018. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Analyza_materialove-toky_PDS-CR.pdf
- [19] Popis recyklátů. [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <http://dufonev.cz/popis-recyklatu.php>
- [20] Základní druhy recyklátů a možnosti jejich využití. [online]. [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <http://www.arism.cz/recyklaty.php>
- [21] NOVOTNÝ, B. Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních recyklátů. Brno, 2001. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [22] ČIHÁK, J. Milníky recyklace kameniva kolejového lože. <https://www.spravazeleznic.cz> [online]. Ústí nad Labem: Správa železniční dopravní cesty, 2018, 2018 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50157286/18-cihak-szdc-o13->

- sb.pdf?fbclid=IwAR2wLPbj_d9sQbwNGpNcrAS7qqVUst1nTP0AIDQJQzyoIDQYoQDkPXpVmSY
- [23] HUBÁLEK, T. Využití odpadního materiálu z výroby betonu. <http://files.tretiruka.cz/> [online]. 2016, 2016 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: http://files.tretiruka.cz/200006810-f2d1b00a13/31_Cemex%20-%20predchazeni%20odpadu%202016.pdf
- [24] FRIDRICHOVÁ, M. Maltoviny III-přednášky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020.
- [25] SOKOLÁŘ, R. a M. NGUYEN. Vlastnosti fluidních elektrárenských popílků s ohledem na jejich použitelnost ve výrobě pálených staviv. *TZB info* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-9-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrarenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv>
- [26] Odpadové fórum. [online]. Praha, České ekologické manažerské centrum, 2011. [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/10-2011-pdf.pdf>
- [27] KRENÍKOVÁ, V. Odpady a druhotné suroviny II. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2014. ISBN 978-80-7414-871-2.
- [28] VLČEK J. a FIEDOR J. *Průmyslové odpady: strusky z výroby železa a oceli*. Ostrava: ECOFER, 2015. Tech-link. ISBN 978-80-260-7775-6.
- [29] <https://www.technicke-normy-csn.cz/> [online]. ČS. armády 216/41 500 03 Hradec Králové: TECHNOR print, 2020 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/hledani/?search=%C4%8CSN+72+2072#tab=undefined&ppp=9&os=18<=4>
- [30] Popílek. *Silo transport* [online]. [cit. 2021-9-21]. Dostupné z: <https://www.silotransport.cz/popilek>
- [31] Využití odpadů ze spaloven je problematické, ukazují zkušenosti z Dánska. [online]. 2020 [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: <https://arnika.org/vyuziti-odpadu-ze-spaloven-je-problematicke-ukazuji-zkusenosti-z-danska>

- [32] Ani struska spalovny neobhájí. [online]. Jindřich Petrlík, 2021 [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: <https://denikreferendum.cz/clanek/32539-ani-struska-spalovny-neobhaji>
- [33] ČSN EN 14227-1: Směsi stmelené hydraulickými pojivy-Specifikace-Část 1- Směsi stmelené cementem Praha: Český normalizační inštitút, 2004.
- [34] Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech. Parlament České republiky, 2020.
- [35] Obecné technické podmínky (OTP) č.j. 25640/06, Štěrkopísek, šterkodrt' a recyklovaná šterkodrt' pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha, 2006.
- [36] ČSN 73 6133. Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Únor 2010.
- [37] STEHLÍK, D. Aktuální stav v provádění podkladních vrstev-přednáška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018.
- [38] ŠKOPÁN, M. Analýza produkce recyklátů ze SDO a možnosti jejich uplatnění na trhu. In: Sborník konference RECYCLING 2010: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 12.3.2010, s. 56-63. Dostupné z: http://www.arasm.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2010.pdf
- [39] STEHLÍK, D. Technické podmínky pro užití recyklovaných stavebních materiálů do pozemních komunikací. In: Recycling 2011: "Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin": Brno 17.-18. března 2011 : sborník přednášek 16. ročníku konference. Brno: VUT, 2011, s. 26-31.
- [40] DUFONEV R.C. - ceník. *DUFONEV R.C.* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.dufonev.cz/images/CENK_deponie_Brno_od_172021_do_31122021.pdf
- [41] Feasibility study of cement-treated 0–8 mm recycled aggregates from construction and demolition waste as road base layer, 2016. Road Materials and Pavement Design [online]. 678-692 [cit. 2021-10-07]. DOI: 10.1080/14680629.2015.1108221. ISSN 1468-0629. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/14680629.2015.1108221?scroll=top&needAccess=true>

- [42] TATARANNI, P., SANGIORGI, C., SIMONE, A., VAGNALI, V., LANTIERI, C., DONDI, G.. A laboratory and field study on 100% Recycled Cement Bound Mixture for base layers. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017.
- [43] Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production, 2013. *Construction and Building Material* [online]. 142-148 [cit. 2021-12-08]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.journals.elsevier.com/construction-and-building-materials>
- [44] ČSN EN 1097-3: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 3. Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [45] ČSN EN ISO 17892-1: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti, 2015.
- [46] ČSN EN 933-1 (721193). Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor, 2012.
- [47] ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti, 2014.
- [48] Metody výzkumu chemického složení minerálů: Klasická chemická analýza [online]. Brno: Vávra Václav, Losos Zdeněk, 2013 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_5_1_metody_chem/kap_5_1_metody_chem.htm#5.1.1
- [49] ČSN EN 13 286–2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška, 2011.
- [50] ČSN EN 12350–6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost, 2009.
- [51] ČSN EN 12390–7 Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu, 2009.
- [52] ČSN EN 13286-41: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy. Praha: Český normalizační institut, 2004.

- [53] Česko moravský cement a.s. [online]. Technický list CEM I 42,5 R Mokrý. 2020
[cit. 2021-10-10]. Dostupné z:
<https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemiibmsl1325r>

Seznam zkratek a symbolů

AB...	Asfaltové vrstvy vozovek
ACB...	Asfaltocementový beton
Al ₂ O ₃ ...	Oxid hlinitý
As...	Arsen
Ba...	Baryum
Be...	Beryllium
C10-C40...	Kontaminace uhlovodíků
C ₂ S...	Belit
C ₃ A...	Trikalciumaluminát
C ₃ S...	Alit
C ₄ AF...	Brownmillerit
CaO...	Oxid vápenatý
CB...	Cementobetonové kryty vozovek
CBR...	Kalifornský poměr únosnosti
CBR _{sat} ...	Poměr únosnosti
Cd...	Kadmium
CEM I...	Portlandský cement
CEM II...	Portlandský cement směsný
CEM III...	Vysokopecní cement
CEM IV...	Pucolánový cement
CEM V...	Směsný cement
CO ₂ ...	Oxid uhličitý
Cr...	Chrom
c _u ...	Číslo nestejnozrnnosti
Cu...	Měď
E...	Modul pružnosti
EOX...	Extrahovatelné organicky vázané halogeny
Fe ₂ O ₃ ...	Oxid železnatý
Hg...	Rtuť

CHRL...	Chemicky rozpustná látka
CHSK-Cr	Chemická spotřeba kyslíku
K ₂ O...	Oxid draselný
KAPS...	Kamenivo zpevněné popílkovou suspenzí
LS...	Objemové změny
MgO...	Oxid hořečnatý
MnO...	Oxid manganatý
MZ...	Mechanicky zpevněná zemina
MZK...	Mechanicky zpevněné kamenivo
MZKO...	Mechanicky zpevněné kamenivo otevřené
Na ₂ O...	Oxid dusnatý
Ni...	Nikl
OH...	Objemová hmotnost
P...	Fosfor
P ₂ O ₅ ...	Oxid fosforečný
PAU...	Polycyklické aromatické uhlovodíky
Pb...	Olovo
PCB...	Polychlorované bifenyly
pH	Vodíkový exponent
PM...	Penetrační makadam
R _c ...	Pevnost v tlaku
R _c ^b ...	Pevnostní třída
R _{ck} ...	Charakteristická pevnost v tlaku
R _{cs} ...	Pevnost v tlaku po určité době zrání
R _{itk} ...	Charakteristická pevnost v příčném tahu
RSM...	Recyklované stavební materiály
Rt...	Pevnost v tahu
R _{tk} ...	Charakteristická pevnost v tahu
SAKO...	Spalovna a komunální odpady Brno
SDO...	Stavebně demoliční odpad
SH...	Směs stmelená hydraulickými silničními pojivy

SiO ₂ ...	Oxid křemičitý
SO ₃ ...	Oxid sírový
SO ₄ ⁻² ...	Sírany
SP...	Směs stmelená popílkem
SS...	Směs stmelená struskou
SŽDC...	Správa železniční dopravní cesty
ŠČM...	Štěrk částečně vyplněný cementovou maltou
ŠDA, ŠDB...	Štěrkodrt'
ŠPA, ŠPB...	Štěrkopísek
TiO ₂ ...	Oxid Titaničitý
TOC...	Celkový organický uhlík
TP...	Technické požadavky
V...	Vanad
VEP	Vedlejší energetický produkt
VP	Vedlejší produkt
VŠ...	Vibrovaný štěrk
w...	Vlhkost
w _L ...	Mez tekutosti
w _{opt} ...	Optimální vlhkost
XRD...	Rentgenová difrakční analýza
Zn...	Zinek
ZŽO...	Odpad z čištění kolejového lože
ρ _{dmax} ...	Maximální objemová hmotnost
+...	Doporučuje se používat
-...	Nedoporučuje se používat
0...	Podmínečně použitelný

Seznam tabulek

Tabulka 1: Pevnostní třídy stmelенých vrstev [5]	13
Tabulka 2: Orientační hodnoty modulu přetvárnosti materiálů používaných v nestmelенých konstrukčních vrstvách [7].....	16
Tabulka 3: Požadavky na kamenivo pro ŠCM dle ČSN EN 13242 [9].....	17
Tabulka 4: Požadavky na kamenivo pro PM dle ČSN EN 13242 [9]	18
Tabulka 5: Požadavky na kamenivo pro KAPS dle ČSN EN 13242 [9].....	19
Tabulka 6: Norma ČSN EN 14227-1: minimální obsah pojiva [11]	20
Tabulka 7: Vliv oxidu na vlastnosti popílku [28]	27
Tabulka 8: Limitní hodnoty škodlivin recyklované šterkodrtě pro konstrukční vrstvy [35].....	31
Tabulka 9: Pevnosti a odolnosti proti mrazu a vodě dle SŽDC S4 [1].....	32
Tabulka 10: Doporučené požadavky na RSM pro stmelенé směsi a prolévané vrstvy [17].....	32
Tabulka 11: Požadavky pro směsi s použitím RSM [17]	33
Tabulka 12: Doporučené užití dle zastoupené hlavního materiálu [17]	33
Tabulka 13: Ceny výrobce recyklátů DUFONEV R.C. z roku 2021 [40].....	35
Tabulka 14: Charakteristika jednotlivých zkoušek Proctor standard [49].....	45
Tabulka 15: Počty cyklů a zmrazovací teploty [5]	47
Tabulka 16: Vybrané vlastnosti cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [53]	51
Tabulka 17: Vybrané vlastnosti vstupních surovin.....	52
Tabulka 18: Obsah škodlivin v sušině a výluhu jednotlivých vzorků	56
Tabulka 19: Chemický rozbor stavebních recyklátů	57
Tabulka 20: Chemický rozbor ostatních surovin	57
Tabulka 21: Koncepce základního testování	59
Tabulka 22: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti směsi s dávkou 8 % CEM.....	62
Tabulka 23: Vybrané vlastnosti receptur	63
Tabulka 24: Optimalizovaná dávka pojiva	64
Tabulka 25: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti směsi s dávkou 4 % CEM.....	66
Tabulka 26: Vybrané vlastnosti směsí	66
Tabulka 27: Upravené primární směsi.....	68
Tabulka 28: Optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti modifikovaných směsí	71
Tabulka 29: Vybrané vlastnosti modifikovaných směsí.....	71
Tabulka 30: Vybrané receptury pro pokročilé testování	74
Tabulka 31: Hodnoty pevností po 7. cyklech	75
Tabulka 32: Hodnoty pevností po 10. cyklech	76
Tabulka 33: Obsah škodlivin směsí pokročilého testování	77

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání křivek zrnitosti s optimální křivkou zrnitosti dle Fullera.....	53
Graf 2: Sypné hmotnosti vybraných druhotných surovin.....	54
Graf 3: Nasákavosti jednotlivých frakcí	54
Graf 4: Zkouška Proctor standard pro odpad z autodomíchávače	60
Graf 5: Zkouška Proctor standard pro asfaltový recyklát	60
Graf 6: Zkouška Proctor standard pro ŽZO.....	60
Graf 7: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát.....	60
Graf 8: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát.....	61
Graf 9: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát.....	61
Graf 10: Zkouška Proctor standard pro uhelnou škváru	61
Graf 11: Zkouška Proctor standard pro ložový popel.....	61
Graf 12: Zkouška Proctor standard pro vysokoteplotní popílek.....	62
Graf 13: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny komunálních odpadů	62
Graf 14: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti s 8 % CEM po 28 dnech.....	63
Graf 15: Zkouška Proctor standard pro ŽZO.....	65
Graf 16: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát.....	65
Graf 17: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát.....	65
Graf 18: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát.....	65
Graf 19: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny komunálních odpadů	66
Graf 20: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti s 4 % CEM po 28 dnech.....	67
Graf 21: Zkouška Proctor standard pro ŽZO + vysp. p.....	69
Graf 22: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát + fluid. p.....	69
Graf 23: Zkouška Proctor standard pro směsný recyklát + odprašky z cem.	69
Graf 24: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát + fluid. p.....	69
Graf 25: Zkouška Proctor standard pro betonový recyklát + odprašky z cem.	70
Graf 26: Zkouška Proctor standard pro cihelný recyklát + fluid.p.	70
Graf 27: Zkouška Proctor standard pro škváru ze spalovny odpadů + fluid.p.	70
Graf 28: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti modifikovaných směsí po 28 dnech..	72

Seznam obrázků

Obrázek 1: Řez technickými vrstvami kolejiště [2].....	12
Obrázek 2: Moohrova kružnice – stmelené směsi [6]	14
Obrázek 3: Schematické znázornění norem pro stmelené směsi [6]	14
Obrázek 4: Moohrova kružnice – nestmelené směsi [6].....	15
Obrázek 5: Schematické znázornění norem pro nestmelené směsi [6]	16
Obrázek 6: Recyklační proces [16].....	24
Obrázek 7: Schématické znázornění získávání popílku [30].....	28
Obrázek 8: Měření sypaných hmotností (fotografie autora)	42
Obrázek 9: Normová sada sít a vibrační podložka VPK 40 (fotografie autora).....	43
Obrázek 10: Závislost suché objemové hmotnosti na vlhkosti [3].....	44
Obrázek 11: Ruční zkouška Proctor Standard (fotografie autora).....	45
Obrázek 12: Zkouška pevnosti v tlaku (fotografie autora).....	46
Obrázek 13:Směsný recyklát	49
Obrázek 14: Asfaltový recyklát	49
Obrázek 15: Cihelný recyklát	49
Obrázek 16: ŽZO	49
Obrázek 17: Odpad z autodomíchače	49
Obrázek 18: Betonový recyklát	49
Obrázek 19: Fluidní popílek Poříčí.....	50
Obrázek 20: Ložový popílek Poříčí.....	50
Obrázek 21: Uhelná škvára Mělník	50
Obrázek 22: Vysokoteplotní popílek Tušimice	50
Obrázek 23: Škvára ze spalovny komunálních odpadů SAKO	50
Obrázek 24: Odprašky z cementárny Mokrá	50
Obrázek 25: Výkvěty solí na směsném recyklátu s přídatkem odprašků z cementárny	73
Obrázek 26: 90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM před zmrazovacími cykly.....	75
Obrázek 27: 90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM před zmrazovacími cykly.....	75
Obrázek 28: 90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM po 7. cyklech.....	75
Obrázek 29: 90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM po 7. cyklech.....	75
Obrázek 30: 90 % Bet. r. + 10 % Fluid. p. + 4 % CEM po 10. cyklech.....	76
Obrázek 31: 90 % SAKO + 10 % Fluid. p. + 3 % CEM po 10. cyklech.....	76