



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

STABILIZACE PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH STAVEB POMOCÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN

STABILIZATION OF THE BASE LAYERS OF ROADS BY USING SECONDARY RAW
MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KAROLÍNA BUŘIČOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA,
CSc., MBA, dr.h.c.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Karolína Buřičová
Název	Stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb pomocí druhotných surovin
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- ZAJÍČEK, J. Technologie stavby vozovek. Informační centrum ČKAIT. Praha 2014.
- Navrhování vozovek pozemních komunikací: technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury. Praha. 2010.
- Podkladní vrstvy a podloží vozovek. Sdružení pro výstavbu silnic. Praha. 2018.
- HRDOUŠEK, V. a kol. Inženýrské stavby. Informatorium. Praha 2010.
- KOS, J. Rekonstrukce pozemních staveb. CERM. Brno. 2006.
- ROUŠAR, I. Projektové řízení technologických staveb. Grada. Praha. 2008.
- ČOREJ, J. Mechanika vozoviek: navrhovanie vozoviek a spevnených plôch. Žilinská univerzita. Žilina. 2006.
- PLÁŠEK, O. Železniční stavby: železniční spodek a svršek. CERM. Brno. 2004.
- SNÍŽEK, V. OptiRec – nástroj pro hodnocení variant recyklačních technologií vozovek: vozovky, rekonstrukce, materiály, recyklace, mechanismy. České vysoké učení technické v Praze. Praha. 2014.
- KRESTA, F. Druhotné suroviny v dopravním stavitelství: Secondary materials in highway engineering. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. 2012.
- TP170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR. 2004.
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současnosti se podkladní vrstvy pro dopravní stavby zhotovují zejména z vhodných zemín s minimální úpravou složení. Druhotné suroviny jsou pro tento způsob využití poměrně málo využívané přesto, že je zde potenciál pro dosažení parametrů při nejmenším srovnatelných s materiály na bázi zemín. Cílem práce je navrhnout možný způsob využití druhotných surovin při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb.

1. Studium dostupné literatury popište současný stav problematiky konstrukce podkladních vrstev dopravních i případně pozemních staveb.
 2. Z dostupných informačních zdrojů sestavte teoretické podklady pro zhodnocení vhodnosti zemín pro podkladní vrstvy. Věnujte se také problematice jejich stabilizace.
 3. Na základě rešeršní činnosti sestavte široký soubor potenciálních druhotných surovin pro využití při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb.
 4. Sestavte metodiku postupu experimentálního vývoje nových druhů podkladních vrstev s využitím druhotných surovin.
 5. Na základě teoretických podkladů vyberte vhodný typ zeminy a navrhnete základní soubor surovinových směsí pro experimentální ověření.
 6. Experimentálně ověřte základní soubor surovinových směsí a vyberte optimální variantu pro ověření vlivu druhotných surovin na parametry výsledné hmoty.
 7. Experimentálně ověřte vybrané typy druhotných surovin a vyberte optimální variantu.
- Předpokládaný rozsah bakalářské práce 40-50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE 1)

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).

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

ABSTRAKT

Práce se věnuje tématu využití druhotných surovin, které je v současné době aktuální. Cílem je navržení možného způsobu využití těchto surovin při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb. Práce hodnotí parametry jednotlivých primárních i druhotných surovin a podává ucelený souhrn poznatků z oblasti stabilizace. Praktická část se věnuje návrhu optimální technologie provádění stabilizace, experimentálně ověřuje vhodnost použitých surovin a následně i navržených směsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podkladní vrstvy, zeminy, pojivo, druhotné suroviny, dopravní stavby, železniční stavby, stabilizace...

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the up-to-date subject of secondary raw material usage. The aim of this thesis is to suggest a potential way of these materials' usage by stabilization of base courses of road or railway constructions. Parameters of individual primary and secondary commodities are evaluated and the acquired knowledge in the field of stabilization is presented. An optimal technology for stabilization is suggested and applicability of used materials and their subsequently prepared mixtures is experimentally verified in the experimental work of this thesis.

KEYWORDS

Base courses, soils, binder, secondary raw material, road construction, railway construction, stabilization...

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Karolína Buřičová *Stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb pomocí druhotných surovin*. Brno, 2020. 96 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb pomocí druhotných surovin* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 18. 5. 2020

Karolína Buřičová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb pomocí druhotných surovin* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2019

Karolína Buřičová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA, dr.h.c. vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho odborné vedení. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Magdaléně Michalčíkové Ph.D. a Ing. Vítu Černému Ph.D., za cenné rady a čas, který mi poskytovali v průběhu vypracování bakalářské práce, a v neposlední řadě mé rodině, příteli a přátelům za podporu během studia a při zpracování mé závěrečné práce.

Bakalářská práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS v rámci 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.

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ A PROVÁDĚNÍ PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH STAVEB	12
1.1 Hlavní části železničního tělesa	12
1.1.1 Železniční spodek	13
1.1.2 Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku.....	14
1.2 Seznámení s prováděním konstrukčních vrstev železničního spodku	15
2 PRIMÁRNÍ SUROVINY POUŽÍVANÉ DO PODKLADNÍCH VRSTEV	17
2.1 Kamenivo	17
2.1.1 Rozdělení kameniva.....	17
2.1.2 Vlastnosti kameniva.....	18
2.2 Zeminy a jejich vhodnost použití.....	19
2.2.1 Typy zemin s ohledem na soudržnost.....	19
2.2.2 Spraše.....	20
2.2.3 Jílovité zeminy	20
2.2.4 Klasifikace zemin	20
2.2.5 Vlastnosti zemin	24
2.2.6 Zařídění zemin podle vhodnosti použití	29
2.3 Pojiva a stabilizace zemin	33
2.3.1 Stabilizace	33
2.3.2 Druhy pojiv	38
2.3.3 Směsná pojiva	43
3 DRUHOTNÉ SUROVINY	44
3.1 Obecný přehled vybraných druhotných surovin	45
3.1.1 Stavební recykláty.....	45
3.1.2 Vedlejší energetické produkty	48
CÍL PRÁCE	52
PRAKTICKÁ ČÁST	53
4 METODIKA ŘEŠENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI	53
5 ETAPA I - NÁVRH PRIMÁRNÍHO ŘEŠENÍ STABILIZACE PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH A POZEMNÍCH STAVEB	57
5.1 Kritéria pro vhodnost zeminy.....	57

5.1.1	Výběr vhodné zeminy z výkopových vrtů z oblasti D11 Jaroměř pro experimentální činnost.....	58
5.2	Návrh zeminy pro experimentální činnost.....	60
5.3	Návrh dvoustupňového testování zeminy.....	60
5.4	Metodika zkoušek pro jednostupňové ověřování.....	61
5.4.1	Stanovení objemové hmotnosti.....	62
5.4.2	Stanovení zhutnitelnosti.....	62
5.4.3	Stanovení pevnosti v prostém tlaku.....	65
5.4.4	Stanovení vlhkosti.....	66
5.5	Zhodnocení etapy I.....	66
6	ETAPA II – MOŽNOSTI STABILIZACE PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH STAVEB DRUHOTNÝMI SUROVINAMI.....	67
6.1	Výběr užšího souboru druhotných surovin.....	67
6.2	Optimalizační výpočet pro výběr VEP.....	68
6.3	Optimalizační výpočet pro výběr stavebních recyklátů.....	70
6.4	Charakteristika vybraných druhotných surovin.....	71
6.5	Zhodnocení etapy II.....	72
7	ETAPA III – EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH SMĚSÍ	73
7.1	Návrh základních surovinových směsí pro stabilizaci podkladních vrstev	73
7.1.1	Primární surovina.....	74
7.1.2	Vápno.....	75
7.1.3	Cement.....	75
7.1.4	Ověřování vhodnosti směsi.....	75
7.2	Zhodnocení etapy III.....	80
8	ETAPA IV – EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI DRUHOTNÝCH SUROVIN.....	81
8.1	Návrh surovinových směsí pro ověření vhodnosti druhotných surovin.....	81
8.2	Ověření vhodnosti směsi.....	81
8.3	Zhodnocení etapy IV.....	85
	ZÁVĚR	86
	POUŽITÁ LITERATURA.....	88
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
	SEZNAM GRAFŮ	96

ÚVOD

V bakalářské práci s názvem „*Stabilizace podkladních vrstev dopravních komunikací pomocí druhotných surovin*“ se zabývám technologií provádění stabilizace a návrhem vhodných druhotných surovin, které by bylo možné použít pro stabilizační směsi.

Podle zákona č. 183/2006 Sb. [1] se dopravní infrastrukturou rozumí pozemky, stavby a s nimi související zařízení. [1] Právě již zmiňované stavby, respektive dopravní stavby, jsou obecně děleny do dvou skupin, a to na pozemní neboli silniční a železniční dopravu. [2] Tato předmětná bakalářská práce bude zaměřena právě na železniční dopravu. Pro použití stabilizace je podstatné znát konstrukční složení dopravních komunikací, zejména tedy železnic. Železnice jako taková je složena ze dvou částí, ze železničního svršku a spodku. Železniční spodek je tvořen z více částí a jednou z nich je pražcové podloží, které je označováno za vícevrstvý systém, v kterém je obsažena konstrukční neboli podkladní vrstva železničního spodku. [3] Hlavním úkolem této vrstvy je zejména zvýšení únosnosti tělesa. Dalšími podstatnými úlohami je ochrana zemní pláně před působením mrazu nebo zabezpečení odtoku vody. [4]

Během výstavby nebo rekonstrukce dopravních staveb vzniká velké množství zemin různorodé kvality, frakce a složení, které bývají nejčastěji odváženy ve formě odpadu na příslušnou skládku. Tyto zeminy jsou většinou odváženy z důvodu nesplnění požadovaných parametrů. Jedná se zejména o pevnost, namrzavost, propustnost, plasticitu apod., díky čemuž není vhodné jejich opětovné použití například pro vytvoření podkladní vrstvy zemního tělesa železničního spodku. [5] Jelikož je takové zacházení se zeminou neefektivní a nežádoucí, a to hlavně z ekonomického hlediska, je velmi často kladen důraz na opětovné použití i méně vhodných zemin za pomoci jejich technologických úprav. V průběhu několika let je usilováno o snížení celkové produkce jakéhokoliv odpadu, a to nejen v České republice, ale i celosvětově.

Nevhodné zeminy lze upravovat buď mechanickým, nebo chemickým způsobem. Mechanická úprava představuje změnu především fyzikálních vlastností zemin. Účelem práce je zlepšení technických vlastností jako je pevnost, trvanlivost nebo snížení vlhkosti, čehož je dosaženo díky chemické stabilizaci. [6] Tato již známá technologie úpravy zemin představuje stabilizaci pomocí pojiv (cement, vápno). Druh pojiva, které bude použito, se odvíjí od daného typu upravované zeminy. Základem stabilizace je vždy vhodný výběr vstupních surovin.

Z názvu bakalářské práce je patrné, že bude kladen důraz obzvláště na využití druhotných surovin při stabilizaci podkladních vrstev. Je potřeba provést výběr těchto surovin a za pomoci optimalizačního výpočtu stanovit vhodné druhotné suroviny, které by mohly být použity pro technologii stabilizace. Druhotné suroviny jsou využívány především za účelem snížení produkce odpadu a z ekonomického a ekologického hlediska. Další možností částečného nahrazení zeminy, mimo druhotné suroviny, mohou být i vedlejší energetické produkty jako je například popílek nebo škvára.

V poslední části práce budou některé návrhy experimentálně ověřeny, a to na základě metodiky práce a zjištěných poznatků z teoretické části. Zde bude proveden návrh a následné ověření receptury pomocí základních zkoušek jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém stavu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ A PROVÁDĚNÍ PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH STAVEB

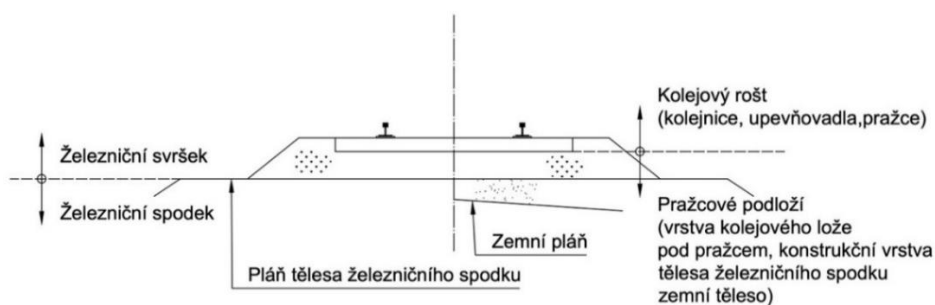
Před začátkem procesu je potřeba objasnit si pojem dopravní infrastruktura a pojmy s ní spojené. Ze zákona 183/2006 Sb. [1] je dána definice dopravní infrastruktury, kterou se rozumí pozemky, stavby a s nimi související zařízení – pozemní komunikace, dráhy, vodní cesty a letiště. [1] Předmětem této práce jsou především dopravní stavby, jejichž hlavním cílem je zaměření na železniční stavby, silniční a dálniční síť. Jejich úkolem je projektování, opravy, realizace, údržba a budování infrastruktury těchto staveb. [7]

Obecně jsou dopravní stavby děleny na již zmiňovanou silniční neboli pozemní, a železniční dopravu. Mezi silniční dopravu řadíme dálnice, silnice I. třídy, II. třídy, III. třídy, místní komunikace a účelové komunikace. Rozdělení je provedeno na základě státněpolitické důležitosti a účelu. [2] Dle zákona o drahách č. 266/1994 Sb. [8] rozdělujeme dráhy na železniční, tramvajové, trolejové a lanové. V souladu s tímto zákonem se rozumí pod pojmem dráha cesta, která je stanovena pro pohyb drážních vozidel včetně pevných zařízení potřebných k zaručení bezpečnosti a plynulosti drážní dopravy. Železnice rozdělujeme dle účelu na celostátní, které slouží k přepravním potřebám, nebo máme vlečky, které jsou určeny pro potřeby podniku. [9]

Po obecném uvedení do problematiky dopravních staveb je dále potřeba si říct z čeho jsou složeny dopravní komunikace, především tedy železnice, které jsou pro zpracovávanou bakalářskou práci s těžejší. V této kapitole se seznámíme se základními pojmy železničního tělesa a se složením konstrukčních vrstev pražcového podloží, kde se budu zejména věnovat struktuře podkladních vrstev. Důraz bude kladen na možnost použití druhotných surovin pro stabilizaci právě těchto vrstev.

1.1 HLAVNÍ ČÁSTI ŽELEZNIČNÍHO TĚLESA

Železniční těleso je složeno, jak můžeme vidět na Obr. 1, ze dvou částí. Horní vrstva se nazývá železniční svršek a spodní vrstva je označována jako železniční spodek. Bakalářská práce se bude zabývat pouze **železničním spodkem** a to především, jak už bylo zmíněno, konstrukční neboli podkladní vrstvou.



Obr. 1 – Hlavní části železničního tělesa [10]

1.1.1 ŽELEZNIČNÍ SPODEK

Železniční spodek je označován za spodní vrstvu železničního tělesa a jedná se především o jednu ze základních částí trati. Je složen z více částí, jako je zemní pláň a pláň tělesa železničního spodku, které můžeme vidět na Obr. 1. Těleso železničního spodku je tvořeno zemním tělesem, konstrukčními vrstvy tělesa železničního spodku a odvodňovacím zařízením. Jeho rozměry, tvary, stabilita a únosnost vytvářejí základ pro geometrické parametry koleje a přispívají k zajištění bezpečnosti a plynulosti železničního spodku. [3] Železniční spodek a jeho konstrukci je potřeba navrhnout tak, aby vyhovovali především ustanovením z předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek. [3] Pro dílčí metody návrhu a posouzení konstrukce jsou v předpisu uvedeny náležitě technické normy a typové podklady. [3]

Železničním spodem se rozumí:

- těleso železničního spodku,
- stavba železničního spodku,
- dopravní plochy a komunikace,
- drobné stavby a zařízení železničního spodku. [3]

Jak už bylo zmíněno, je potřeba, aby těleso železničního spodku zabezpečovalo geometrické parametry koleje a také, aby zaručilo přenášení zatížení železničních vozidel bez deformace tělesa. Proto musí být navrženo tak, aby vyhovělo těmto kritériím. Jedním z hlavních parametrů, které jsou důležité pro návrh konstrukce tělesa železničního spodku, je především stav a druh zeminy zemní pláně. Další z věcí, které jsou důležité pro návrh, je rychlost vlaků pro požadovanou konstrukci. Jedním z podstatných parametrů tělesa železničního spodku je jeho únosnost a schopnost přenášet zatížení. Tento parametr je zkoušen statickou zatěžovací zkouškou, která se provádí za pomoci tuhé kruhové desky

o průměru 0,3 m. Díky této zkoušce jsme schopni stanovit modul přetvárnosti na zemní pláni a také na povrchu konstrukčních vrstev železničního spodku. Právě z důvodu získání potřebné únosnosti pláně se provádějí v tělese železničního spodku konstrukční vrstvy. [3]

Železniční spodek je třeba navrhovat nejen, aby vyhovoval požadavkům nejvyšší předepsané rychlosti jízdy či druhu tratě, ale zejména aby zemní pláň byla dostatečně chráněna před vlivem mrazu. Pokud je zemina zemní pláně nenamrzavá, tak není potřeba posuzování. Jestliže by se jednalo o zeminu namrzavou nebo nebezpečně namrzavou je potřeba provést návrh ochrany zemí pláně v souvislosti s indexem mrazu, nejvyšší předepsanou rychlostí jízdy a vodním režimem zemní pláně. Jednou z možností, jak ochránit zemní pláň před mrazem je například pomocí podkladní vrstvy. Tato vrstva je víceúčelová a splňuje několik dalších funkcí v konstrukci tělesa železničního spodku. Jedná se zejména o funkci nosnou, filtrační nebo odvodňovací. Ve většině případů dochází pouze k částečné ochraně proti působení mrazu. Úplná ochrana se provádí, pouze pokud se jedná o zeminu zemní pláně nebezpečně namrzavou. Pak se konstrukční vrstvy provádějí tak, aby hloubka promrzání (viz. Tab. 1) nezasahovala pod úroveň zemní pláně. Při působení mrazu na zeminu dochází k nepříznivým změnám či poruchám geometrické polohy koleje. Díky účinku mrazu vznikají v zemině ledová zrna, která způsobují nadměrné zdvihy nivelety koleje a snižování únosnosti zemní pláně v době kdy dochází k tání. [3]

Tab. 1 – Dovolené tloušťky promrznutí zemin zemní pláně [10]

Vodní režim	Dovolené tloušťky promrznutí zemin zemní pláně $h_{z\text{ dov}}$ [m]					
	Zeminy vysoce namrzavé Zeminy nebezpečně namrzavé			Zeminy namrzavé Zeminy mírně namrzavé		
	Druh tratě					
	A	B	C	A	B	C
Příznivý	0,30	0,40	0,50	0,50	0,60	0,70
Nepříznivý	0,15	0,30	0,40	0,40	0,50	0,60
Velmi nepříznivý	0,00	0,15	0,30	0,30	0,40	0,50

Vysvětlivky k Tab. 1: A – celostátní tratě pro rychlost 120 až 160 km/hod

B – celostátní tratě pro rychlost menší než 120 km/hod

C – regionální tratě [10]

1.1.2 KONSTRUKČNÍ VRSTVY TĚLESA ŽELEZNIČNÍHO SPODKU

Konstrukční vrstvy tvoří vrstvy materiálů mezi zemní plání a plání tělesa železničního spodku. Jak už bylo zmíněno, tak jednou z jejich hlavních úloh je právě zvýšení únosnosti tělesa železničního spodku, což znamená, že jsou schopny přenášet a také snižovat účinky zatížení, které působí na zemní pláň. Další z jejich podstatných úloh je ochrana zemní pláně

před negativními účinky mrazu a dále zabezpečení odtoku vody do vhodných odvodňovacích zařízení. [4] U konstrukčních vrstev je důležitá jejich reakce na zatížení, která se posuzuje dle jejich reologických vlastností a také druhem porušování. Podloží, které má funkci jako horní část zemního tělesa, kde působí zatížení a klimatické účinky, má velmi výrazný vliv na funkci tratě. Slovo podloží je označováno také jako aktivní zóna. Pokud aktivní zóna vyhoví podmínkám, které jsou požadovány na vrstvy tratí, je snaha ji zařadit do vrstev tratí. [3]

Konstrukční vrstvy v pražcovém podloží představují několik dalších vrstev, ze kterých jsou složeny. Jedná se o nestmelené a stmelené vrstvy a konstrukční prvky. Nestmelené vrstvy jsou nejčastěji vytvářeny z materiálu jako je přírodní kamenivo (písek, šterkopísek, šterkodrt'), umělé kamenivo (struska) anebo také z materiálů, které už byly nějakým způsobem použity. Nejčastěji převažuje použití drceného materiálu především šterkodrt' nebo je hodně využíván i recyklovaný materiál z kolejového lože. Důvodem proč se právě využívá drcené kamenivo je především tvar a ostrohrannost zrn. Díky tomu vytváří vrstvu, která se vyznačuje významně vyšší únosností. Z toho tedy plyne, že např. těženy šterkopísek, který má zaoblená zrna je podstatně méně vhodný z hlediska únosnosti. Hlavním požadavkem těchto vrstev je zrnitostní složení, které je důležité obzvlášť kvůli zaručení nenamrzavosti, propustnosti a nestejnozrnitosti. Další potřebné požadavky jsou stanoveny a podrobně popsány v předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek. [3] Drcené kamenivo je možné nahradit již zmiňovaným upraveným recyklátem. Konstrukční vrstvy vytvořeny z tohoto materiálu jsou nenamrzavé, s modulem přetvárnosti po zhutnění až $E=95$ MPa a na základě množství doplňkového materiálu jsou propustné či málo propustné. Stmelené vrstvy představují stabilizování zeminy a živičné úpravy. Stabilizování konstrukčních vrstev, na rozdíl od stabilizace zemní pláně, se provádí víceméně v misícím centru. Podrobnější popis stabilizace bude uveden v další části práce. Co se týče konstrukčních prvků, tak se jedná zejména o geosyntetiku (geomřížky, geotextilie) antivibrační rohože, betonové desky atd. Těmto prvkům nebude dále věnována pozornost, jelikož nejsou stěžejní pro tuto práci. [4]

1.2 SEZNÁMENÍ S PROVÁDĚNÍM KONSTRUKČNÍCH VRSTEV ŽELEZNIČNÍHO SPODKU

Po uvedení, z jakých částí je složen železniční spodek, následuje seznámení s technologií provádění konstrukčních vrstev. Vlastnosti podloží, pro které je navrhována

železniční konstrukce, podléhají druhu zeminy a dále mohou být ovlivnitelné návrhem či způsobem provedení zemního tělesa. Pomocí geotechnického průzkumu dle TP 76 [11] jsou poskytovány podklady, dle kterých je možné provést návrh zemního tělesa, které je zhotovováno podle ČSN 73 6133 [12]. O užití málo vhodné až nevhodné zeminy do násypu stanovuje ekonomické porovnání zhotovených variant zemního tělesa. Pro zlepšení nebo výměnu zeminy v podloží se navrhne vozovka s nižší tloušťkou. Při návrhu železniční konstrukce musí být stanoveny tyto charakteristiky podloží:

- zatřídění zemin dle ČSN EN ISO 14689-1 [13] a ČSN EN 1997-1[14],
- namrzavost zemin dle ČSN 72 1002 [15] nebo v případě zeminy, která je upravena příměsí pojiv, stanovíme zkouškou dle ČSN 72 1191 [16],
- vodní režim podloží dle ČSN 73 6114 [17],
- poměr únosnosti dle ČSN 72 1016 [18]. [19]

Konstrukční vrstvy jsou prováděny dvěma způsoby, a to technologií se snesením kolejového roštu a technologií bez snesení kolejového roštu. Běžnější a starší je spíše technologie se snesením kolejového roštu. Zhotovitelé tuto metodu znají, mají dostatečné zkušenosti, a hlavně i potřebnou mechanizaci. Pokud se jedná o technologii bez snesení kolejového roštu, tak jde poměrně o novou metodu zhotovení konstrukčních vrstev. Jestliže zhotovitelé zvolí tuto variantu, tak je potřeba aby měli k dispozici zahraniční mechanizaci. Jedná-li se o činnost strojních sestav, tak jsou principiálně obě technologie stejné. Po sanování kolejí pojíždí strojní sestava a do odtěženého prostoru pod kolejovým roštem vkládá a hutní materiál konstrukční vrstvy. Technologie bez snesení má oproti technologii se snesením řadu výhod. Jednou z nich je například to, že je možné konstrukční vrstvy zřizovat i za nepříznivého počasí. Dále je např. možné to, že je strojní sestava schopna vytvořit rovnoměrnou tloušťku konstrukční vrstvy. Tato metoda je výkonnější a tím pádem se snižují výlukové časy. Jednou z hlavních nevýhod je poměrně vysoká cena za pronájem strojních sestav ze zahraničí. Technologie bez snesení kolejového roštu je vhodná obzvlášť v místech s nízkou únosností zemní pláně nebo vysokou hladinou podzemní vody. [4]

2 PRIMÁRNÍ SUROVINY POUŽÍVANÉ DO PODKLADNÍCH VRSTEV

V následující kapitole bude uveden obecný přehled primárních surovin, které je možné využít pro provedení podkladních vrstev tělesa železničního spodku. Jedná se především o kamenivo, zeminy a pojiva. Každý typ primární suroviny je v následujících kapitolách důkladněji popsán. U každé suroviny je uveden její charakter, specifikace a požadavky na použití do podkladních vrstev tělesa železničního spodku. Pojiva jsou navíc doplněna o technologii stabilizace podkladních vrstev, jelikož jejich účinky jsou se stabilizací poměrně spjaty.

2.1 KAMENIVO

Pojem kamenivo znamená zrnitý (sytký) materiál anorganického původu s velikostí zrna do 125 mm, který rozdělujeme na přírodní nebo umělé. Jedním ze základních materiálů ve stavebnictví je právě kamenivo, kde je nejčastěji využíváno ve formě plniva. Dle získaných hodnot dílčích vlastností kameniva, se jednotlivá kameniva, která jsou z různorodých hornin a zhotovena odlišnými technologiemi, zatřídí podle jejich kvality do tříd. V dopravních stavbách, které jsou využívány zejména pro náročné účely (např. kryty vozovek) jsou využívána kameniva, která jsou řazena do nejvyšších tříd A, B anebo se jedná o kameniva se zvětšenými technickými vlastnostmi. Kamenivo se v silničním a železničním stavitelství využívá zejména k vytvoření uměle zhutněných těles a vrstev, což mohou být např. násypy kolejových loží či vozové vrstvy. [20] [21]

2.1.1 ROZDĚLENÍ KAMENIVA

a) Podle původu

Jak už bylo na začátku této kapitoly zmíněno, tak máme kamenivo **přírodní**, které může být buď drcené z přírodního kamene anebo se může těžit z přírodních ložisek. Dále dle původu máme kamenivo **umělé**. Jak už z názvu vyplývá, tak toto kamenivo je vyráběno průmyslově, a to buď tepelným procesem anebo jinou úpravou. Existuje i **recyklované kamenivo**, které vzniká zhotovením již použitého anorganického materiálu, který byl využit ve stavebních konstrukcích. [21]

b) Podle velikosti zrn

Kamenivo s největšími zrny o velikosti 4–125 mm nazýváme **hrubé**. Následuje kamenivo **drobné**, jež má zrna do velikosti 4 mm. Směsí drobného a hrubého drceného kameniva nazýváme **šterkodrt**. Směs drobného a hrubého, ale přírodního drceného kameniva označujeme za **šterkopísek**. Nejmenší zrna má **kamenná moučka**, která vznikla pomletím větších zrn nebo odsáváním kamenného prachu s propadem sítem 0,09 mm nejméně 60 %. U asfaltových směsí označujeme propad sítem 0,09 mm pojmem **filler**. [21]

c) Podle objemové hmotnosti

Rozdělujeme kamenivo na **pórovité**, které má objemovou hmotnost menší než 2000 kg/m^3 , dále je **hutné**, u něhož dosahuje hodnot větších jak 2000 kg/m^3 . Právě toto kamenivo se nejvíce uplatňuje v dopravních stavbách. Jako poslední je kamenivo **těžké**, které má objemovou hmotnost menší než 3000 kg/m^3 . [21]

2.1.2 VLASTNOSTI KAMENIVA

V následující kapitole jsou uvedeny základní vlastnosti kameniva, které jsou rozděleny do dvou skupin, a to na fyzikální a mechanické. V každé skupině je obsažen výtah vlastností, které do dané skupiny patří.

a) Fyzikální vlastnosti kameniva

Představují vlastnosti, které zobrazují velikosti, tvar, hutnost a nasákavost zrn.

Jde především o:

- frakce zrnitosti,
- čáru zrnitosti,
- tvar zrn,
- nasákavost,
- obsah cizorodých částic,
- odplavitelné částice. [21]

b) Mechanické vlastnosti kameniva

Každý materiál, v tomto případě kamenivo, jsou vystaveny různým namáháním, např. ohyb, tlak, tah apod. Z důvodu odolání těmto namáháním je potřeba, aby daný materiál měl určité vlastnosti. Mechanické vlastnosti kameniva jsou:

- mrazuvzdornost,
- trvanlivost,
- ohladitelnost,
- otlukovost nebo drtitelnost. [21]

2.2 ZEMINY A JEJICH VHODNOST POUŽITÍ

Po charakteristice kameniva je na řadě další primární surovina, kterou je zemina. V této kapitole budou popsány vlastnosti zemin a jejich specifikace, což bude podkladem pro výběr zeminy pro experimentální část práce. Pro použití zeminy jako základní suroviny využívané pro dopravní stavby je nutné, aby splňovala technické parametry. Pokud zeminy vyhoví daným kritériím je možnost je využít na zakládání staveb. Klasifikace zemin pro dopravní stavby se provádí podle ČSN 72 1002 [15].

Pojmem zemina je označována klasifikace hornin. Díky strukturní soudržnosti hornin rozlišujeme horniny na více typů. Zeminy mají dvoufázové prostředí, které je složeno ze zrn a vody, která se nachází v pórech, nebo trojfázové prostředí, ve kterém jsou navíc ještě bublinky vzduchu. Tyto bublinky vznikají nepřetržitým procesem zvětrávání anebo rozpadem vzniklým vodou, větrem a změnami teplot. [22]

2.2.1 TYPY ZEMIN S OHLEDEM NA SOUDRŽNOST

Zeminy soudržné: Do této kategorie zemin patří spraše, různé druhy jílu, zeminy písčité i jílovitopísčité, které jsou složeny z jílovitých částic, obsahující hrubší frakce. Soudržnost těchto zemin je dána obsahem právě jílovitých částic. U těchto zemin závisí konzistence na obsahu vody. Pokud obsahují větší množství, tak u jílu dochází k bobtnání, naopak u spraše dojde k rozbřednutí. V suchém stavu jak jíly, tak spraše jsou velmi tuhé a smršťují se. Tyto zeminy jsou náchylné k sesouvání a také jsou pohyblivé a je tedy potřeba při použití soudržných zemin sledovat důkladně jejich proměnlivé vlastnosti. [22]

Sypké nesoudržné zeminy: Do kategorie nesoudržných zemin zařazujeme písky a šterky o různém původu a složení. Dále sem můžeme zařadit kamenopísčité suti či písčité zvětraliny. Tento typ zemin je většinou vhodný pro zakládání staveb. Únosnost základové půdy je založena na zrnitosti těchto zemin a také jejich ulehlosti. Další jejich vlastností je to, že nejsou schopné zadržovat vodu z důvodu velkých pórů mezi zrny. [22]

Organické neúnosné základové půdy: Tato kategorie se z velké části nehodí pro žádné zakládání staveb. Řadíme sem zpravidla sedimenty organického původu – rašeliny, slatiny a bahnité náplavy. Mezi jejich negativní vlastnost, kvůli které jsou nevhodné, patří vysoký podíl vody, což způsobuje jejich velkou stlačitelnost. Dále jsou schopné zmenšovat svůj objem, a to díky rozkladu organických částic. [22]

2.2.2 SPRAŠE

Jedná se o jemnozrnné zeminy eolitického původu, což znamená vátého, obsahující z velké části křemičitá zrna prachové frakce (0,002-0,006 mm), především makropórovitá. Zejména bývají zbarvena do žlutohněda až světlehněda. U spraší se často objevuje přítomnost CaCO_3 , který bývá následně vyloučen ve formě tzv. cicvárů. [12] Typickými znaky spraší je, že jsou nevrstevnaté a dají se rozmělnit v prstech. Díky silnému odvápnění jsou spraše schopny se přeměnit na sprašové hlíny. Tyto dva druhy sedimentů jsou u nás rozšířené, a to zejména v nižších oblastech. [23]

Spraše jsou vyznačovány především těmito vlastnostmi:

- vysoký podíl hlinité složky (45–75 %),
- nízká hodnota indexu plasticity (většinou nižší než 15 %),
- vysoká pórovitost (vyšší než 40 %),
- nízká objemová hmotnost suché zeminy (pohybuje se od 1250–1600 kg/m^3),
- velká stlačitelnost nebo prosedavost po provlhčení. [12]

2.2.3 JÍLOVITÉ ZEMINY

Představují klastické sedimenty, které se mohou vyskytovat ve formě zpevněné anebo sypké. Jsou složeny z velké části různými minerály o různé velikosti jejich zrn, a to až do velikosti zrna 2 mm. Jejich textura je velmi masivní, a jelikož se jedná o plastickou surovinu, tak jejich typickou vlastností je schopnost se rozplavovat ve vodě, čímž dochází k jejich následnému tvarování. Tyto zeminy jsou z větší poloviny složeny z částic jílové frakce a dle velikosti zrn jsou rozdělovány na jílovinu, prachovinu a pískovinu. Do skupiny jílovitých zemin řadíme jíly a hlíny, které rozlišujeme podle obsahu jíloviny. Jak už je z názvů patrné, tak jíly obsahují více jak 50 % jíloviny a hlíny kolem 20-50 %. Jílovina je tvořena především jílovými nerosty, mezi které patří zejména kaolinit, montmorillonit a illit. [24]

2.2.4 KLASIFIKACE ZEMIN

Po uvedení základní charakteristiky zemin, je potřeba popsat jakým způsobem a podle čeho jsou klasifikovány. Zeminy jsou všeobecně klasifikovány podle norem ČSN EN ISO 14689 Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování, popis a klasifikace hornin [13], ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis [25], ČSN EN ISO 14688–2 Geotechnický průzkum

a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 2: Zásady pro zařídování [26] a ČSN 73 6133 Návrh a provádění pozemního tělesa pozemních komunikací. [12]

Pokud provádíme návrh zemního tělesa, tak je potřeba, aby byl založený na znalostech o vlastnostech různých druhů zemin a hornin, které mají být pro tento návrh použity. Všechny vlastnosti, dle kterých se posuzuje vhodnost zeminy, se dosahují za pomoci geotechnických průzkumů. Nejhlavnějšími parametry, ze kterých vychází inženýrskogeologická klasifikace jednotlivých druhů zemin pro potřebu železničního spodku, je zrnitost a plasticita zemin.

Zeminy se dají různými způsoby klasifikovat. Jedním z hlavních znaků je již zmiňovaná zrnitost neboli zrnitostní složení. Dílčí složky zemin jsme schopni rozdělit dle velikostí částic, které jsou uvedeny v Tab. 2 podle normy ČSN 73 6133. [12]

Tab. 2 – Složky zemin podle velikosti částic [12]

Částice	Popis	Označení	Rozsah
Velmi hrubé	balvanitá složka	b	> 200 mm
	kamenitá složka	cb	60 mm až 200 mm
Hrubé	šterkovitá složka	g	2 mm až 60 mm
	písčítá složka	s	0,06 mm až 2 mm
Jemné (f)	hlinitá složka	m	0,002 až 0,06 mm
	jílovitá složka	c	<0,002 mm

Velmi hrubé částice se při zařídování vyjmou, zaznamená se jejich hmotnostní podíl. Zbytek zeminy se klasifikuje podle dalších hledisek.

V Tab. 2 je uvedeno rozdělení zemin dle jejich zrnitostního složení, což znamená procentuální obsah složek v suché zemině. Podle normy ČSN 73 6133 [12] je v následující Tab. 3 znázorněno základní členění zemin podle jejich zrnitosti v závislosti na Tab. 2. [12]

Tab. 3 – Základní členění zemin podle zrnitost [12]

Výchozí skupina	Základní název	Symbol	Kvalitativní znaky
Jemnozrná (F1-F8)	Jemnozrná zemina	F (jíl – C, hlína – M)	$f > 35 \% (g+s+f)$
Písčítá (S1-S5)	Písek	S	$f < 35 \% (g+s+f) s > g$
Šterkovitá (G1-G5)	Šterk	G	$f < 35 \% (g+s+f) g > s$

POZNÁMKA: Symbol tvoří základ názvu zeminy a stojí na prvním místě názvu v 1. pádě. Doplnující písmeno tvoří přívlastek názvu. Např.: S-písek, S-F – písek s příměsí jemnozrné zeminy, SC – písek jílovitý.

Pokud je výskyt kamenité a balvanité složky ($cb + b$) < 50 % z celkové hmotnosti zeminy, tak se jedná o příměs velmi hrubých částic:

- převažuje-li kamenitá složka nad balvanitou ($cb > b$), označují se jako zeminy s příměsí kamenité složky,

- převažuje-li balvanitá složka nad kamenitou ($b > cb$), označují se jako zeminy s příměsí balvanité složky.

Pokud je výskyt kamenité nebo balvanité složky ($cb + b$) $> 50\%$ z celkové hmotnosti zeminy je kvalitativním znakem pro zařazení do kategorií:

- zeminy kamenité (cb), když obsah kamenité složky je větší než balvanité,
- zeminy balvanité (b), když obsah balvanité složky je větší než kamenité. [25]

V Tab. 3 je pouze základní rozdělení zemin, které lze dále ještě rozšířit. Pokud bychom chtěli jejich podrobnější klasifikaci zrnitosti je potřeba nahlédnout do normy ČSN EN ISO 14688-1 [25], ve které se nachází Tab. 4, jež zeminy blíže specifikuje. [25]

Tab. 4 – Podrobnější klasifikace zemin podle zrnitosti [25]

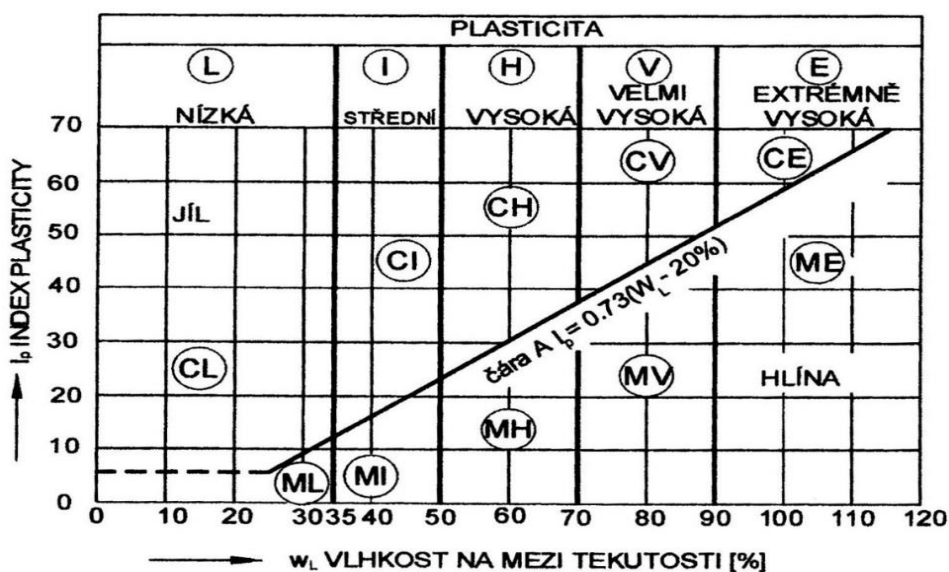
Skupiny zemin	Frakce a symbol	Velikost zrn [mm]
Velmi hrubozrnná zemina	Velký balvan (lBo)	> 630
	Balvan (Bo)	> 200 do ≤ 630
	Valoun (Co)	> 63 do ≤ 200
Hrubozrnná zemina	Štěrk (Gr)	$> 2,0$ do ≤ 63
	hrubozrnný (cGr)	> 20 do ≤ 63
	střednězrnný (mGr)	$> 6,3$ do ≤ 20
	jemnozrnný (fGr)	$> 2,0$ do $\leq 6,3$
	Písek (Sa)	$> 0,063$ do $\leq 2,0$
	hrubozrnný (cSa)	$> 0,63$ do $\leq 2,0$
	střednězrnný (mSa)	$> 0,20$ do $\leq 0,63$
	jemnozrnný (fSa)	$> 0,063$ do $\leq 0,20$
Jemnozrnná zemina	Prach (Si)	$> 0,002$ do $\leq 0,063$
	hrubozrnný (cSi)	$> 0,02$ do $\leq 0,063$
	střednězrnný (mSi)	$> 0,0063$ do $\leq 0,02$
	jemnozrnný (fSi)	$> 0,002$ do $\leq 0,0063$
	Jíl (Cl)	$\leq 0,002$
Legenda: Large boulder (lBo), Boulder (Bo), Cobble (Co), Gravel (Gr), Coarse gravel (cGr), Medium gravel (mGr), Fine gravel (fGr), Sand (Sa), Coarse sand (cSa), Medium sand (cSa), Fine sand (fSa), Silt (Si), Coarse silt (cSi), medium silt (mSi), Fine silt (fSi), Clay (Cl)		

U jemnozrnných zemin je potřeba uvažovat s dalším kvalitativním znakem, což je jejich **plasticita**. Tento důležitý znak je popisován za pomoci konzistenční meze tekutosti w_L , meze plasticity w_P a dle čísla plasticity I_P . Podle množství vlhkosti, která se nachází na mezi tekutosti w_L rozlišujeme plasticitu zemin dle Tab. 5. [12]

Tab. 5 – Rozlišení plasticity zemin podle velikosti meze tekutosti [12]

Plasticita	Symbol	Mez tekutosti w_L (%)
Nízká	L	< 35
Střední	I	35 až 50
Vysoká	H	50 až 70
Velmi vysoká	V	70 až 90
Extrémně vysoká	E	>90

Pro částice, které jsou menší než 0,5 mm, je na Obr. 2 znázorněný jejich diagram plasticity, který je uveden v normě ČSN 73 6133 [12].



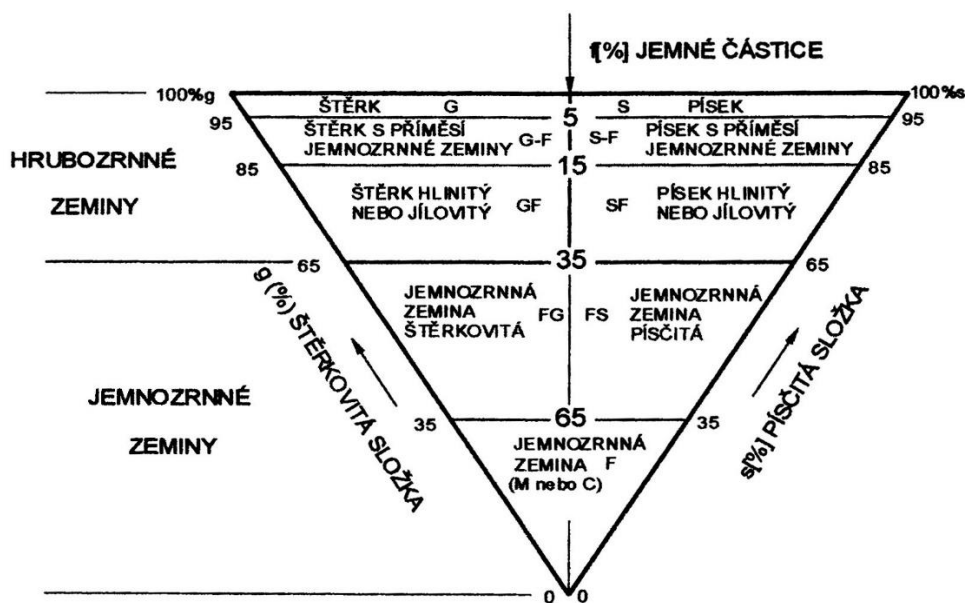
Obr. 2 – Diagram plasticity pro částice menší než 0,5 mm [12]

Z diagramu plasticity (viz Obr. 2) je vidět, že čára A vyjadřuje ve vztahu meze tekutosti w_L a indexu plasticity I_p zlom mezi jílem (C), což je část nad čarou A, a hlínou (M), což je naopak část, která se nachází pod úrovní čáry A. [12]

Dalším možným klasifikačním dělením zemin do tříd dle normy ČSN EN ISO 14689 [13], které je postaveno na základě obsahu jemných částic f (%), meze tekutosti w_L (%) a postavení v diagramu je rozdělení do tří skupin:

- skupina jemnozrnných zemin (F1-F8),
- skupina písčitých zemin (S1-S5),
- skupina šterkovitých zemin (G1-G5). [13]

Pro jemné zeminy k jejich klasifikaci dále slouží **trojúhelníkový diagram**, který je možné vidět na Obr. 3, dle normy ČSN EN ISO 1997-1 [14].



Obr. 3 – Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm [14]

Mezi další znaky zemin řadíme **stupeň konzistence**, který slouží k zjištění stavu, ve kterém zemina právě je. Představuje rozdíl meze tekutosti a vlhkosti zeminy v poměru k indexu plasticity. Z výsledku lze určit, zda se jedná o zeminu pevnější nebo měkčí. Jak můžeme v Tab. 6 vidět, tak čím je hodnota stupně konzistence vyšší, tím je zemina pevnější a naopak. [27]

Tab. 6 – Rozlišení konzistence zeminy [12]

Konzistence	Stupeň konzistence	Chování konzistence
Kašovitá	< 0,05	Při sevření se protlačuje mezi prsty
Měkká	0,05 až 0,50	Dá se lehce hníst v prstech
Tuhá	0,50 až 1,00	Hněte se obtížně v prstech
Pevná	>1,00	Lze do ní vtisknout nehet
Tvrdá	-	Vyschlá, při úderu kladiva se drolí

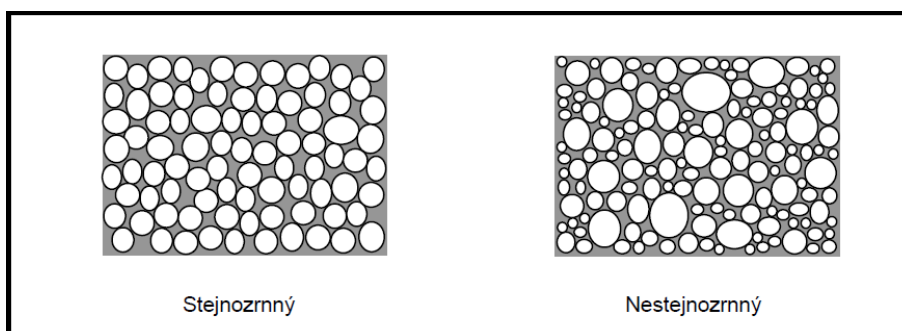
2.2.5 VLASTNOSTI ZEMIN

Po klasifikaci neboli zařazení zeminy je nezbytné vyhodnotit, zda je daná zemina pro zemní těleso vhodná nebo ne. Z toho důvodu je potřeba znát základní kritéria zemin, kterými jsou jejich fyzikální a mechanické vlastnosti, které jsou dále stanoveny uvedenými zkouškami. Ze všech možných vlastností zemin jsou vybrány pouze ty, které jsou pro moji práci podstatné. Jedná se o zrnitost, objemovou hmotnost, konzistenční meze, plasticitu, zhutnitelnost, namrzavost a propustnost.

2.2.5.1 ZRNITOST

Laboratorní zkoušení zrnitosti se provádí dle ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti. [28] Pojem zrnitost značí velikost jednotlivých zrn v hornině jakéhokoliv druhu. Tento parametr je nejpodstatnější u usazených hornin obzvláště u hornin klastických. Pro zjištění zrnitosti se používají granulometrické rozbory sypkých zemin. Dalším způsobem může být měření částic ve výbrusu, a pokud mají zrna dostačující velikost, dá se provést i měření přímé. Nejčastější možností zjištění zrnitosti je síťový rozbor. Nejhrubší frakci označujeme nadsítné, naopak nejjemnější frakci nazýváme podsítné. U velice jemných sedimentů se využívá sedimentační metoda rozboru zrnitosti. Ke zhodnocení výsledků granulometrických rozborů slouží zrnitostní křivka. [29]

Zeminy, které ve své struktuře zahrnují z velké části zrna o stejné velikosti, označujeme jako stejnozrné. Naopak u zemin, které obsahují zrna různých velikostí, a žádná z nich nedominuje svou četností, označujeme za nestejnozrné. Na Obr. 4 můžeme vidět rozdíl mezi stejnozrnou a nestejnozrnou zeminou. [27]



Obr. 4 – Stejnozrná a nestejnozrná zemina [27]

2.2.5.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Objemová hmotnost se stanovuje dle ČSN 72 1010 – Stanovení objemové hmotnosti zemin [30]. Představuje hmotnost objemové jednotky zeminy. Objemovou hmotnost vypočítáme jako podíl hmotnosti zeminy počítající i s obsaženou vodou a jejího celkového objemu. V některých případech je potřeba znát objemovou hmotnost suché zeminy, z důvodu dosažení porovnatelných výsledků, které nebudou ovlivněny vlhkostí zkušebního vzorku. [27]

Vzorec pro výpočet objemové hmotnosti

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1)$$

ρ ... objemová hmotnost [kg/m³]

m ... hmotnost zeminy [kg]

V ... objem zeminy [m³]

Objemová hmotnost je zaokrouhlována na nejbližších 10 kg/m³.

2.2.5.3 KONZISTENČNÍ MEZE A PLASTICITA

Konzistence je stanovována dle ČSN CEN ISO 17892-12. [28] Vyznačuje stav zeminy, díky kterému v závislosti na typu a vlhkosti zeminy vystihuje její odolnost proti deformaci. Fyzikální stav soudržných zemin záleží na jejich vlhkosti a je popsán konzistencí zeminy. U konzistence řešíme mez tekutosti, mez plasticity a číslo (index) plasticity, což je numerický rozdíl právě těchto dvou mezí (2). Význam meze plasticity je takový, že více podléhá množství jílovitých částic a mez tekutosti je spíše citlivá jak na množství, tak i na druh jílovitých částic. Plastické vlastnosti se určují podle toho, jak je hodnota meze tekutosti a číslo plasticity velké. Čím je hodnota obou parametrů vyšší, tím jsou plastické vlastnosti výraznější. Na Obr. 5 je vidět, jak je zemina závislá na objemu zeminy a vlhkosti. Podle toho se může vyskytovat ve stavu:

- kašovitém,
- plastickém – měkká, tuhá,
- pevném,
- tvrdém. [27]

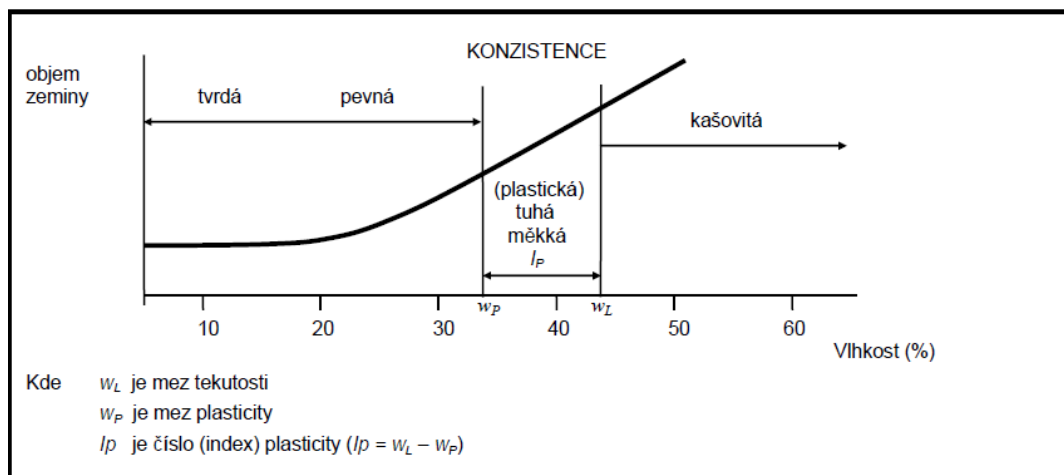
Vzorec pro index plasticity

$$I_p = w_L - w_p \text{ [%]} \quad (2)$$

I_p ... index plasticity [%]

w_L ... hmotnost zeminy [%]

w_p ... objem zeminy [%]



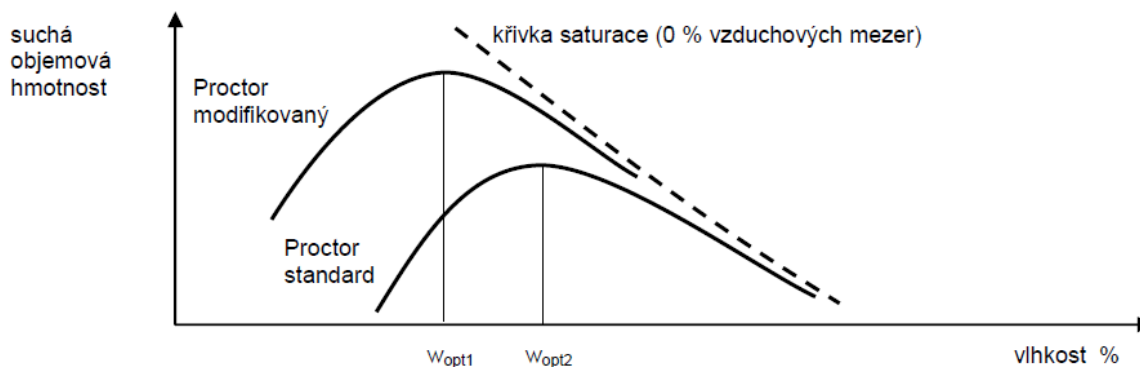
Obr. 5 – Konzistence zeminy [27]

Plasticita vystihuje možnost materiálu, podléhající vnějšímu silovému účinku, nepřetržitě pozměňovat svůj tvar, a přitom neustále klást stejný odpor. Zjednodušeným způsobem řečeno, že takový materiál se chová jako plastelína. Jemnozrnné zeminy, které jsou schopny v souvislosti s vlhkostí změnit objem a konzistenci mohou mít plastické vlastnosti. [27]

2.2.5.4 ZHUTNITELNOST

Pro nestejnozrnné materiály, které mají velikost největšího zrna 31,5 mm, se využívá zkouška Proctor standard. Jestliže je zemina do té míry stejnozrnná, že touto metodou nejde zhutnit, použije se zkouška relativní ulehlosti.

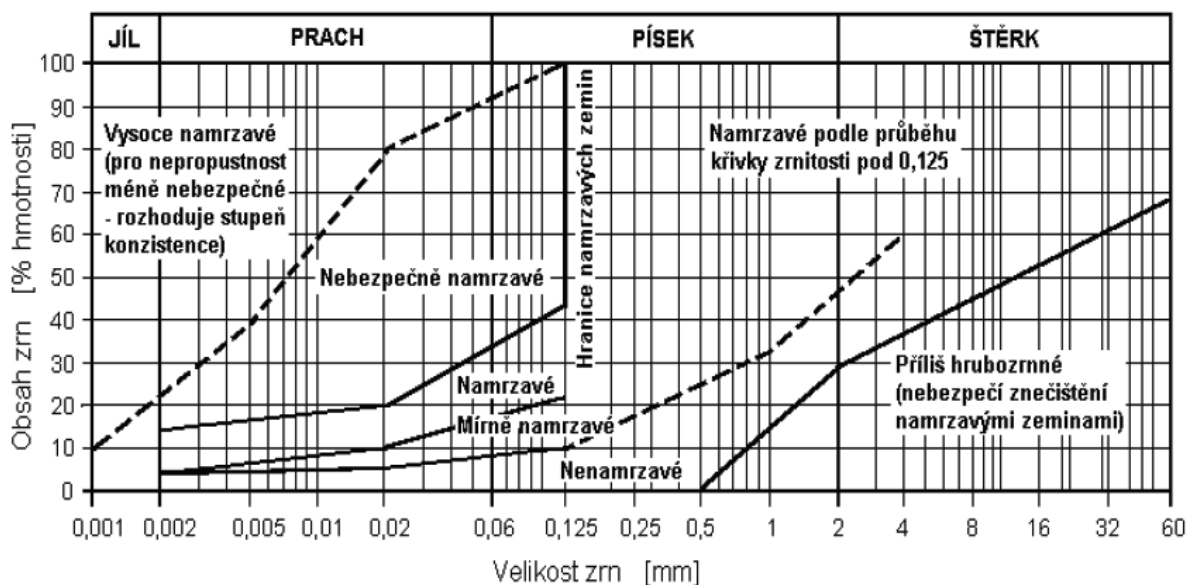
Na Obr. 6 je znázorněná závislost suché objemové hmotnosti na vlhkosti, která je při hutnění. Pokud je ve směsi obsaženo méně vody, tak se tím usnadňuje hutnění, naopak velké množství komplikuje hutnění. Směsi, které obsahují hrubé částice, citlivost na vlhkost snižují. Nejpriznivější vlhkost s rostoucí hutnicí energií klesá. [27]



Obr. 6 – Závislost hutnění [27]

2.2.5.5 NAMRZAVOST ZEMIN

Namrzavost zemin představuje vlastnost zemin, projevující se postupným zvětšováním objemu při teplotách pod bodem mrazu a stálém přísunu vody kapilárním vztlínáním. Na Obr. 7 je možné vidět, jak jsou různé zeminy namrzavé podle jejich zrnitosti.



Obr. 7 – Kritérium namrzavosti podle zrnitosti zeminy [12]

2.2.5.6 PROPUSTNOST ZEMIN

Propustnost zemin znamená schopnost propouštět vodu mezi dutinami a póry. Pomocí účinku hydraulického sklonu jsme schopni vyjádřit součinitele filtrace k dle ČSN CEN ISO 17892-11[28]. Díky tomuto součiniteli rozdělujeme zeminy dle jejich propustnosti, která je uvedena v Tab. 7.

Zkouška propustnosti vodou se stanoví nalitím vody do jamky, která se vytvoří v zemní pláni. Podle výsledků se určí, zda se jedná o zeminu, která je:

- propustná, pokud se voda okamžitě vsákne,
- málo propustná, pokud se voda vsakuje pomaleji,
- nepropustná, pokud se voda nevsákne vůbec. [28]

Tab. 7 – Propustnost zemin podle filtračního součinitele [28]

Propustnost zeminy	Filtrační součinitel k (m/s)	Třída zeminy dle ČSN 73 1001	Příklad druhu zeminy
Velmi nepropustná	$< 10^{-10}$	F6	Jíly s nízkou a střední plasticitou (CL, CI)
		F7, F8	Jíly a hlíny s vysokou, velmi vysokou a extrémně vysokou plasticitou (MH, MV, ME, CH, CV, CE)
Nepropustná	10^{-8} až 10^{-10}	F1	Hlíny štěrkovité (MG)
		F2	Jíly štěrkovité (CG)
		F4	Jíly písčité (CS)
		F5	Hlíny s nízkou a střední plasticitou (ML, MI)
Málo propustná	10^{-6} až 10^{-8}	F3	Hlíny písčité (MS)
		S4	Písky hlinité (SM)
		S5	Písky jílovité (SC)
		G4	Štěrk hlinité (GM)
		G5	Štěrk jílovité (GC)
Propustná	10^{-4} až 10^{-6}	S3	Písky s příměsí jemnozrnné zeminy (S-F)
		G3	Štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy (G-F)
Velmi propustná	$> 10^{-4}$	S1	Písky dobře zrněné (SW)
		G1	Štěrk dobře zrněné (GW)
		S2	Písky špatně zrněné (SP)
		G2	Štěrk špatně zrněné (GP)

2.2.6 ZATŘÍDĚNÍ ZEMIN PODLE VHODNOSTI POUŽITÍ

Je důležité si zeminy zatřídit podle jejich vhodnosti použití do tělesa železničního spodku, abychom věděli, zda je možné dané zeminy použít pro výstavbu tělesa nebo ne. Dle normy ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací [12], se zeminy dělí do čtyř skupin. Rozdělení a podrobnější informace jsou uvedeny v následující Tab. 8. [12]

Tab. 8 – Rozdělení zemin z hlediska jejich vhodnosti použití [12]

	NEPOUŽITELNÉ ^{a)} k jakémukoli použití	NEVHODNÉ k přímému použití bez úpravy	PODMÍNEČNĚ VHODNÉ k přímému použití bez úpravy	VHODNÉ k přímému použití bez úpravy
Podmínky použití	Nelze upravit běžnými technologemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit ^{c)}	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické zeminy s obsahem větším než 6 % ^{b)} , bahna, rašelina, humus, ornice, CE, ME	ML, MI, CL, CI MH, MV, CH, CV	S-F MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW, G-F
Násyp		MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F S-F
a) Netýká se podloží násypu a svahů zářezu b) Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2 c) Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu				

Pokud chceme, aby došlo k opětovnému použití zeminy, je potřeba provést posouzení na základě skutečných vlastností a určit, zda je nutno provést úpravu nebo ne. Zeminu je potřeba upravit pokud je hodnota meze tekutosti w_L vyšší než 50 %, stupeň konzistence $I_c \leq 0,5$ nebo objemová hmotnost zeminy pro aktivní zónu $\rho_{d,max,PS} < 1\,600\text{ kg/m}^3$ a pro násyp $\rho_{d,max,PS} < 1500\text{ kg/m}^3$. Další zeminy, u kterých je vyžadována úprava, jsou objemově nestálé. Obzvlášť se jedná o bobtnavé jíly nebo jílovité břidlice. Pokud se hodnota přirozené vlhkosti w_n nepohybuje v přípustném intervalu vlhkosti, a k tomu ji nelze ovlivnit, nebo pokud jde o stejnozrnnou zeminu jako je např. vátý písek je nutné zeminy upravit. Dalším způsobem, dle kterého se rozhoduje o úpravě, je z hlediska účelu použití. Pokud je zemina použita do násypu je posuzována podle indexu únosnosti IBI. Když je tato hodnota rovna 10 % pro násyp a 5 % pro podloží není potřeba úprava. Při využití zeminy pro aktivní zónu je posuzována podle CBR. Jakmile je hodnota CBR min. 15 % může být zemina použita bez úprav. [12]

V následujících tabulkách (Tab. 9 a Tab. 10) jsou zobrazeny orientační hodnoty geotechnických vlastností, dle kterých je potom stanovena vhodnost dané zeminy do tělesa železničního spodku.

Tab. 9 – Orientační hodnoty geotechnický vlastností a vhodnost zemin do zemního tělesa [3]

Název zeminy	Symbol	Jemné částice f [%]	Mez tekutosti wL [%]	Zkouška zhuštitelnosti Proctor Standard		Propustnost Namrzavost	Vhodnost do zemního tělesa
				Max. objemová hmotnost [kg/m ³]	Optimální vlhkost [%]		
1	2	3	4	5	6	7	8
Organické zeminy (organické bahno, bahnitě náplavy, hniloby, humus, rašelina)	0	-	-	-	-	-	Nevhodné
Jíl s extrémně vysokou plasticitou	F8 CE	Nad 65	Nad 90	1330–1500	20–40	Nepropustné, vysoce až nebezpečně namrzavé	Nevhodné
Jíl s velmi vysokou plasticitou	F8 CV	Nad 65	70–90	1360–1650	19–39		
Hlína s extrémně vysokou plasticitou	F7 ME	Nad 65	Nad 90	1350–1550	2–38		
Hlína s velmi vysokou plasticitou	F7 MV	Nad 65	70–90	1380–1650	20–35		
Jíl s vysokou plasticitou	F8 CH	Nad 65	50–70	1380–1700	17–37	Nepropustné až velmi málo propustné, nebezpečné Namrzavé	Málo vhodné – při použití vyžadují opatření podle čl. 17 této přílohy
Hlína s vysokou plasticitou	F7 MH	Nad 65	50–70	1400–1700	15–33		
Jíl se střední plasticitou	F6 CI	Nad 65	35–50	1550–1900	15–35		
Hlína se střední plasticitou	F5 MI	Nad 65	35–50	1500–1750	15–25		
Jíl s nízkou plasticitou	F6 CL	Nad 65	Do 35	1600–1950	10–30		
Hlína s nízkou plasticitou	F5 ML	Nad 65	Do 30	1600–1800	12–20		
Jíl písčítý	F4 CS	50–65	Nad 60	1550–1850	15–35		
	F4 CS	35–50	Do 60	1650–2000	12–30		
Hlína písčítá	F3 MS	50–65	Nad 60	1600–1950	12–30		
	F3 MS	35–50	Do 60	1750–2000	10–25		
Jíl šterkovitý	F2 CG	35–65	Do 60	1550–2000	12–30		
Hlína šterkovitá	F1 MG	35–65	Do 60	1550–1900	10–25		

Tab. 10 – Orientační hodnoty geotechnický vlastností a vhodnost zemin do zemního tělesa (pokračování) [3]

1	2	3	4	5	6	7	8
Jíl s vysokou plasticitou	F8 CH	Nad 65	0–70	1380–1700	17–37	Nepropustné až velmi málo propustné, nebezpečné	Málo vhodné – při použití vyžadují opatření podle čl. 17 této přílohy
Hlína s vysokou plasticitou	F7 MH	Nad 65	50–70	1400–1700	15–33		
Jíl se střední plasticitou	F6 CI	Nad 65	35–50	1550–1900	15–35		
Hlína se střední plasticitou	F5 MI	Nad 65	35–50	1500–1750	15–25		
Jíl s nízkou plasticitou	F6 CL	Nad 65	Do 35	1600–1950	10–30		
Hlína s nízkou plasticitou	F5 ML	Nad 65	Do 30	1600–1800	12–20		
Jíl písčítý	F4 CS	50–65	Nad 60	1550–1850	15–35		
	F4 CS	35–50	Do 60	1650–2000	12–30		
Hlína písčítá	F3 MS	50–65	Nad 60	1600–1950	12–30		
	F3 MS	35–50	Do 60	1750–2000	10–25		
Jíl šterkovitý	F2 CG	35–65	Do 60	1550–2000	12–30	Namrzavé	
Hlína šterkovitá	F1 MG	35–65	Do 60	1550–1900	10–25		
Písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S3 S-F	5–15	-	1700–2100	8–16	Málo propustné	Vhodné
Písek hlinitý	S4 SM	14–35	-	1730–2050	8–16	Namrzavé, mírně namrzavé až nenamrzavé	
Písek jílovitý	S5 SC	15–35	-	1760–2000	8–20		
Šterk s příměsí jemnozrnné zeminy	G3 G-F	5–15	-	1800–2150	6–16		
Šterk hlinitý	G4 GM	15–35	-	1750–2100	8–19		
Šterk jílovitý	G5 GC	15–35	-	1700–2000	10–23		
Písek dobře zrněný	S1 SW	Do 5	-	-	-	Propustné	Vhodné
Písek špatně zrněný	S2 SP	Do 5	-	-	-	Nenamrzavé	
Šterk dobře zrněný	G1 GW	Do 5	-	-	-		
Šterk špatně zrněný	G2 GP	Do 5	-	-	-		

2.3 POJIVA A STABILIZACE ZEMIN

Posledním typem primárních surovin jsou pojiva, jejichž vhodnost použití, podle druhu zeminy, je dána normou ČSN 72 1002 [15]. Tato kapitola bude složena ze dvou pojmů, které budou následně podrobněji popsány. První část bude zaměřena na samotnou stabilizaci zemin. Bude zde vysvětlen pojem stabilizace, čím se provádí, jaké známe druhy a z jakého důvodu je prováděna. Druhá část se bude zabývat charakterem poživ, která jsou zde zmíněna z toho důvodu, že jsou využívána ke stabilizaci zemin a to proto, že během procesu dochází k bezprostřední změně chování zemin. Jedná se například o snížení přirozené vlhkosti, zvýšení únosnosti zemin a snížení jejich plasticity. Pojiva jsou využívána pro stabilizaci zemin za účelem zlepšení zpracovatelnosti, zlepšení možnosti hutnění po vrstvách nebo zvýšení zpracovatelnosti místních materiálů. Právě při použití tohoto materiálu dochází ke stabilizaci podloží na požadovanou pevnost a odolnost. [31] U každého druhu pojiva jsou vždy uvedeny i jejich účinky, kterými působí na upravovanou zeminu.

2.3.1 STABILIZACE

Jedná se o způsob úpravy zejména jemnozrnných zemin či směsi zemin pomocí přídavku pojiva (cement, vápno atd.) nebo chemického stabilizátoru díky čemuž se stabilizuje podklad na požadovanou pevnost a odolnost. Tento postup je výhodný z ekonomického i ekologického hlediska, a to z důvodu úspory zeminy, jelikož umožňuje využít méně vhodné nebo neúnosné zeminy nacházející se v konstrukčních vrstvách tělesa železničního spodku a v zeminách zemní pláně, které by musely být jinak odvezeny a nahrazeny jinou vhodnou zeminou. Díky stabilizaci se provede úprava zeminy, tak aby výsledkem bylo zlepšení vlastností nevhodné zeminy, ze které se stává následně zemina vhodná. Stabilizace je prováděna z důvodu zvýšení trvanlivosti, poměru únosnosti půdy (CBR_{SAT}) a smykové pevnosti. Díky tomu následně dochází naopak ke snížení indexu plasticity (I_P), namrzavosti či vlhkosti zeminy. [5] Při provádění stabilizace by číslo indexu plasticity I_P nemělo přesáhnout hodnotu 27. Typ pojiva, které bude použito pro stabilizaci, a jeho množství, se odvíjí podle druhu zeminy spíše tedy jejich vlastností, jelikož jak uvádí Tab. 11, tak každé pojivo není vhodné pro každou zeminu. Jedná se zejména o vlhkost, zrnitost, objemovou hmotnost a index plasticity. Nemělo by být opomenuta ani dostupnost použitého pojiva a jeho cena. [32]

Podle Bella [33] jsou pro stabilizaci nejvíce využívána tyto pojiva:

- vápno (CaO), vápenná kaše (Ca (OH)₂),
- vápno nehašené – hydroxid vápenatý (Ca (OH)₂),
- cement,
- ostatní pojiva – živičné pojivo, enzymy. [33]

Tab. 11 – Vhodnost použití pojiva dle druhu zeminy [34]

Pojivo pro úpravu zeminy	Druhy zemín dle ČSN 72 1002								
	Štěrkovité (hrubozrnné) zeminy			Písčité (smíšené) zeminy			Jemnozrnné zeminy		
	GC	GM	G-F	SC	SM	SP	F1-F8	CG+CS	MG+MS
Cement	•	•	•	-	-	•	-	•	•
Vápno	•	-	-	•	-	-	•	•	•
Vápno s cementem	•	•	-	•	•	-	•	•	•
Popílek	•	-	•	-	-	-	•	•	•
Struska	-	-	•	•	•	•	-	-	-
Chemické	-	-	-	-	-	-	•	•	•
Odprašky	-	-	•	•	•	•	-	-	-
Mechanické	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Při výběru typu pojiva je nezbytné provést vyzkoušení každého druhu pojiva se zemínou, která bude upravována. Je potřeba provést laboratorní zkoušky a na základě jejich výsledků bude rozhodnuto o vhodném typu pojiva. I když je ve většině literatur uvedeno doporučení k provádění laboratorních testů, existuje i možnost řídit se normovanými a technickými požadavky, mezi které patří např. TP 94 [31] a norma ČSN 73 6133 [12]. Při určování druhu pojiva vhodného pro úpravu zeminy je nutné brát zřetel na obsah jemných částic v zemině (f), vlhkost a index plasticity (I_p), což vyplývá z již zmiňovaných předpisů. [32] Podle těchto kritérií a dle Bella [33] je možnost použít:

- 3 – 9 % vápna k zemině, pokud I_p > 10 a obsah jílovitých částic f > 10 %,
- 3 – 10 % cementu k zemině, pokud I_p ≤ 10 a f < 20 %,
- kombinace vápno, cement (3 – 10 %), pokud 10 < I_p < 20 a f < 10 %. [33]

Mimo sledování vlastností zeminy je důležité, jako u každého stavebního procesu, potřeba věnovat pozornost klimatickým podmínkám. Za optimální teplotu, při které je vhodné stabilizovat zeminy, je považováno 5 °C až 25 °C. Naopak pokud teplota klesne pod 5 °C nebo je vyšší jak 30 °C je potřeba provést jistá opatření, jako je například přidání

zpomalovačů nebo urychlovačů tuhnutí. Pokud během procesu nastanou vydatné a dlouhotrvající deště není možné provádění stabilizace. [35]

Z obecného hlediska lze úpravu zemin rozdělit na mechanickou a chemickou. **Mechanická stabilizace** představuje zejména změnu fyzikálních vlastností zeminy, čehož je možné dosáhnout pomocí vibrací, hutnění, přibíjení atd. (viz Obr. 8). Z hlediska **chemické úpravy** se jedná o smísení zeminy s vhodným pojivem (viz Obr. 9). Pokud se zemina upravuje za pomoci jednoho druhu pojiva – cementu, vápna, strusky, popílku či směsného pojiva, tak se jedná o jednofázovou úpravu, a při použití kombinaci dvou různých druhů pojiva, která jsou mísená ve dvou fázích, mluvíme o dvofázové úpravě. [6] Chemická stabilizace spočívá především v chemické reakci mezi minerálními látkami obsažených v zemině a stabilizátorem či pojivem. Má práce je zaměřena pouze na chemickou stabilizaci. [36]



Obr. 8 – Mechanická úprava zeminy [36]



Obr. 9 – Stabilizace zeminy [36]

Při stabilizaci jílových zemin se nejčastěji používá vápno, díky němuž je dosaženo dlouhodobých změn vlastností této zeminy, Dochází zde ke kationtové výměně mezi volnými ionty vápníku Ca^{2+} a ionty sodíku Na^+ a draslíku K^+ . Díky tomuto procesu, který nastává v jílové struktuře, následuje přeměna vrstevnaté struktury na strukturu zrnitou. Po přidání vápna za účelem stabilizace dochází ke zlepšení zpracovatelnosti zemin nikoliv ke zvýšení pevnosti. Vápno svým účinkem ovlivňuje množství vody v zemině nebo její viskozitu. Jelikož je vápno schopno reagovat pouze s jílovými minerály, není vyhovující pro reakci s písčítými zeminami. Pro tento druh zeminy je výhodnější použití cementu. Jedním z hlavních důvodů použití cementu pro stabilizaci je kvůli zpevnění vazeb ve struktuře, které vznikají mezi zeminou a cementem. Oproti stabilizaci vápnem zde dochází k získání vyšší pevnosti zeminy. Podle toho, jakou zeminu je potřeba stabilizovat se volí množství cementu, které se pohybuje od 2 % až do 15 % z celkové hmotnosti zeminy. [36] V následující Tab. 12 je možné vidět jakým způsobem ovlivňuje i malé množství pojiva vlastnosti zeminy.

Tab. 12 – Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1% příměsi pojiva [31]

Vlastnost zemin	Působení	Příměs páleného vápna	Příměs cementu
Vlhkost	Snižuje	1–2 %	0,2–0,4 %
Max. objemová hmotnost	Snižuje	5–100 kg/m ³	6–20 kg/m ³
Optimální vlhkost	Zvyšuje	0,5–2 %	Beze změny
Poměr únosnosti CBR na vzorku zhutněném při zkušební vlhkosti	Zvyšuje	5–50 % CBR	5–15 % CBR
Na vzorku po zrání a následné saturaci	Zvyšuje	5–50 % CBR	10–50 % CBR

Stabilizaci jsme schopni rozdělit na několik druhů, a to podle toho jaké pojivo bylo použito. V Tab. 13 jsou vypsány pojiva, kterými lze stabilizaci provádět a následně k tomu přiřadit i název či druh stabilizace a její označení.

Tab. 13 – Druhy stabilizací a jejich označení [3]

Pojivo / příměs	Druh stabilizace	Označení stabilizace
Cement	Cementová	SC
Vápno	Vápenná	SV
Vápno s cementem	Vápenocementová	SVC
Popílkový stabilizát	-	SP
Struska	-	SS
Chemický stabilizátor	Chemická	SCh
Odprašky	-	SO
Zeminy s vhodnějšími geotechnickými vlastnostmi	Mechanická	SM

2.3.1.1 TECHNOLOGICKÝ POSTUP ÚPRAVY ZEMIN

Existují dva způsoby, kterým lze zlepšovat vlastnosti zemin s přídavkem pojiv. Jedná se o technologii na místě, která je častější, nebo v míchacím centru. Spojením zeminy, pojiva a vody dochází díky úpravě k přeměně z homogenního materiálu na materiál s vlastnostmi, díky kterým je schopný odolávat větším zatížením. [37]

- Technologie na místě

Varianta provádění úpravy zeminy na místě, je velmi často známá pod názvem **technologie in situ**. Tato metoda je spíše využívanější zejména z toho důvodu, že dokáže pracovat s místními materiály, které maximálně využije. Díky tomu odpadá těžení a odvážení nevhodné zeminy na skládku. Jedná se tedy o efektivnější variantu, která snižuje náklady a urychluje dobu výstavby. Pro každou lokalitu, kde je prováděna úprava zeminy je potřeba provést geotechnický průzkum, na základě něhož se provedou průkazní zkoušky, díky kterým se bude moci určit druh pojiva, tloušťka vrstvy a provést návrh směsi. [37]

Jako první krok je potřeba si připravit pracovní plochu, na které bude prováděna stabilizace. Nejprve se rozryje zemina do požadované hloubky, následně dojde k odstranění nepotřebného materiálu, který by mohl mít na stabilizaci neblahé účinky, a nakonec se zemina urovná. Jakmile je povrch připraven, přichází další krok, kterým je rovnoměrné nanášení pojiva po celém úseku s přesností $\pm 10\%$ pomocí dávkovačů. Důležitým krokem, zejména v letních měsících je přídavek vody. Tento krok nastává buď před, nebo po dávkování pojiva. Voda je nezbytná z důvodu zajištění optimální vlhkosti potřebné pro hutnění zeminy. Pomocí zemní frézy dochází k promísení zeminy s pojivem. Takto upravené zeminy se zhutňují hutnicími válci a konečná úprava plochy se provádí vhodnými pneumatickými válci. [37]

Pokud jsou nevhodné zeminy stabilizovány cementem je důležité po dávkování začít ihned s hutněním, jelikož nastává hydratace cementu, čímž zemina tvrdne. [31][37]

- Technologie v míchacím centru

Tato technologie vzniká smícháním zeminy s pojivem v míchacím centru a na stavbu je dovezena hotová výsledná směs, která je následně rozprostřena po celém úseku a nakonec zhutněna. Tento způsob je využíván, pokud je pro mísení používána dovezená zemina a ne místní. [37]

2.3.2 DRUHY POJIV

Pro zpevnění a stabilizování písčitých zemin, kameniv a jemnozrnných zemin s nízkou plasticitou se využívají cementy nebo také hydraulické silniční pojivo. Naopak ke stabilizování a vylepšení jemných soudržných zemin střední a vysoké plasticity, spraší a sprašových hlín použijeme vápno dle normy ČSN EN 14 227 – 11 [38]. Při zlepšování zemin vnikne do reakce jemná frakce, což mohou být například jíly, a tím pádem se stávají součástí pojiva. Díky tomu se zeminy, které se nemohly zpracovat pro vysokou vlhkost, stávají použitelnými v zemních objektech. [21][31] Do skupiny pojiv patří vápno, cement, které jsou nejčastěji používána a dále vedlejší produkty průmyslové výroby jako je popílek, struska či směsná silniční hydraulická pojiva. Tito zástupci budou následně podrobněji popsány. Přestože vápno a cement jsou nejvíce využívanými pojivy pro úpravu zemin, tak sebou nesou i řadu nevýhod. Jednou z nich je dopad na životní prostředí, což je způsobeno emisí CO₂. Mezi další nevýhody patří vysoké náklady nebo vysoká spotřeba energie. Výskyt síranu v pojivu představuje poměrně velké nebezpečí při použití pojiv. Při vysokém obsahu síranů může dojít k expanzi upravené zeminy. [6]

2.3.2.1 VÁPNO

Vápno je nejčastěji používáno pro úpravu jemnozrnných zemin se střední a vysokou plasticitou, spraší a sprašových hlín. Pro úpravu zeminy lze použít hašené vápno, nehašené vápno či vápenné mléko. Na našem území je, ale nejvíce využíváno právě nehašené vápno. Změny, které díky použití vápna v jemnozrnné zemině nastanou, lze rozdělit na změny s okamžitými účinky anebo s dlouhodobými účinky. [6] Ke stabilizaci zemin je možné využít nehašené či hašené vápno nebo i vápenný hydrát Ca (OH)₂. Za velmi nevhodného zástupce se považuje vápenec, a to z důvodu že je inertní vůči stabilizaci zemin. Při použití vápna na stabilizaci není potřeba využívat extra kvalitní vápno. Dávkování vápna se pohybuje v rozmezí od 1 % do 3 %, ale dávka je závislá na druhu zeminy, která je upravována. Dle teoretických poznatků bylo zjištěno, že i malé množství vápna je schopno zvýšit počáteční pevnost zeminy. Naopak pokud dojde náhodou k přidání vysokého množství, tak účinek je opačný a dochází ke snížení pevnosti. [33]

2.3.2.1.1 OKAMŽITÉ ÚČINKY VÁPNA NA ZEMINU

1. Vysoušení zeminy

K vysoušení zeminy neboli snížení okamžité vlhkosti zeminy dochází za kombinace několika procesů. Zejména díky vzniku hydratace páleného vápna. Jedná se o exotermickou reakci, při které dochází působením tepla k vypařování vody ze směsi. Tento účinek je zapříčiněn i díky samotnému přidání pojiva – vápna, čímž se snižuje poměr hmotnosti vody k hmotnosti pevné části směsi. [6][31]

Rovnice hydratace páleného vápna (3)



2. Zvýšení meze plasticity

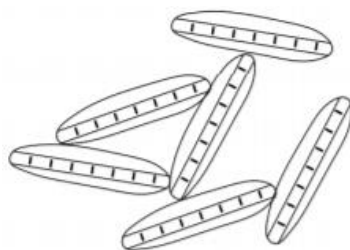
Po smísení zeminy s vápnem dochází k okamžitému zvýšení meze plasticity w_p , ale bez změn meze tekutosti w_L . Z toho tedy plyne, že musí dojít ke snížení indexu plasticity I_p . Působením tohoto účinku dojdeme k tomu, že výsledná konzistence již upravené zeminy je nižší než té původní. Dochází k ovlivnění chování zeminy, což má za následek, že plastická zemina, resp. lepkavá se přeměňuje v pevnou a křehkou zeminu. Je zde dosaženo lepší zpracovatelnosti. [6][31]

3. Zvýšení optimální vlhkosti

Když dojde k přidání vápna do jemnozrné zeminy, tak nastane zvýšení optimální vlhkosti, čímž se Proctorova křivka stává plošší a následuje snížení maximální objemové hmotnosti suché směsi. Jelikož v zemině dojde k reakci jílových minerálů společně s vápnem, tak najednou nastává kationtová výměna, při které dochází k tomu, že volné ionty vápníku Ca^{2+} jsou nahrazovány v krystalové struktuře jílu ionty sodíku Na^+ a draslíku K^+ . Vlivem kationtové výměny iontů nastává tzv. flokulace, což je vločkování jílovitých částic. Proces flokulace je možné vidět na Obr. 10 a na Obr. 11 kde je už do zeminy přidáno vápno. Díky tomuto průběhu vzniká přeměna vrstevnaté struktury výsledného materiálu na strukturu zrnitou, čímž dojde ke zvětšení prázdného prostoru, který je mezi částicemi. [6][31]



Obr. 10 – Proces flokulace – neupravená zemina [6]



Obr. 11 – Proces flokulace – zemina upravená vápnem [6]

4. Zvýšení pevnosti zeminy, CBR a snížení namrzavosti

2.3.2.1.2 DLOUHODOBÉ ÚČINKY VÁPNA NA ZEMINU

1. Pucolánové reakce

Jedná se o dlouhodobý proces, při kterém nastává krystalizace gelu vzniklého reakcí vápna a jílových minerálů. Díky postupné krystalizaci vznikne pevný stmelený materiál. Vlivem účinku vápna se uvolňují hydroxylové ionty OH^- , které jsou schopny vytvořit zásadité prostředí (pH vyšší než 12), což umožní rozpuštění Al_2O_3 a SiO_2 z jílových minerálů. Tyto oxidy reagují s vodou a tím pádem vytvářejí hydrogely, které následně krystalizují a tím dokážou navzájem spojit strukturu. Výsledkem procesu je zpevnění stmeleného materiálu. Je zde ještě potřeba uvést vliv teploty na pucolánovou reakci. Při zvyšující se teplotě dochází k jejímu urychlení. Naopak pokud teplota klesne pod $5\text{ }^\circ\text{C}$ je proces zastaven. [6][33]

2. Růst kalifornského poměru únosnosti CBR

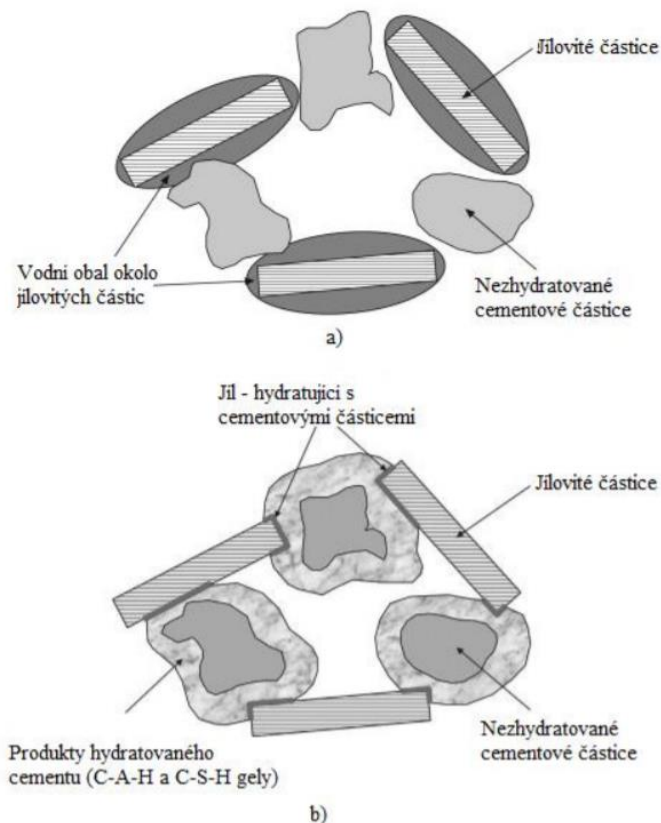
K dlouhodobým účinkům patří i růst kalifornského poměru únosnosti CBR, ke kterému dochází až během několika let. [31]

2.3.2.2 CEMENT

Cement jako pojivo je vhodné použít k úpravě vlastností jemnozrnných zemin s nízkou plasticitou. Není doporučeno ho používat pro úpravu zemin s indexem plasticity I_p vyšším než 30. Jestliže je nezbytná korekce půdy s takto vysokým indexem plasticity I_p pomocí cementu, je potřeba provést nejdříve úpravu vápnem, které dokáže snížit hodnotu indexu plasticity I_p na nižší hodnotu než 30. [6][31] Oproti vápnu, u kterého se vše odvíjelo podle reakce s půdními minerály, je tomu u cementu jinak. Zde probíhá reakce mezi cementem a vodou přímo v půdě, čemuž se říká hydratační proces, díky kterému dochází k cementové reakci. Dále následuje společná reakce s ostatními složkami a tím pádem nastává proces tuhnutí. Cement je možné použít ke stabilizaci více

druhů zemin, než tomu bylo u vápna, což může být způsobeno zřejmě tím, že když dochází k tuhnutí cementu, tak dochází i k uzavření půdy, ale neproběhne změna struktury zeminy. Podle toho, jaká zemina je upravována a jaké jsou požadovány vlastnosti upravované zeminy, je volen druh cementu pro stabilizaci. Stabilizované zeminy pomocí cementu většinou vykazují sníženou objemovou roztažnost, plasticitu a stlačitelnost. [39]

Nejvíce používaným cementem bývá portlandský CEM I a portlandský cement směsný CEM II. Tento typ cementu je složen z křemičitanu vápenatého a hlinitanu vápenatého. Je potřeba říci, že na proces hydratace, který nastává u cementu, mají vliv čtyři základní cementové sloučeniny, z čehož dvě jsou na bázi hlinitanů – C_3A , C_4AF a druhé dvě na bázi křemičitanů – C_2S , C_3S . Mezi první hydratovanou cementovou složku patří trikalciurní silikát neboli alit (C_3S), který během 3 hod–14 dní (po smíchání zeminy s cementem) je schopný hydratace a vytvrzování. Jeho přítomností dochází k počátečnímu nárůstu pevnosti. Jako další hydratuje dikalciurní silikát (belit, C_2S), jehož proces hydratace a vytvrzování je naopak oproti alitu velmi pomalý. Také přispívá k nárůstu pevnosti, ale spíše až k těm pozdějším, během 7–14 dnů. U tetraalkaliumaluminát ferrit (brownmillerit, C_4AF) dochází k hydrataci velmi rychle, ale neslouží ke zvyšování pevnosti. Poslední hydratující složkou je trikalciurní aluminát (C_3A), která je zároveň i tou nejučinnější složkou. Během hydratace nastává uvolňování většího množství tepla a taktéž jako u C_3S přispívá k značnému nárůstu počátečních pevností, a to už během 2 dnů. Tyto čtyři slínkové minerály, které jsou nedílnou součástí cementu, jsou velmi podstatné při úpravě zemin. Z výše uvedeného textu je patrné, že přispívají k nárůstu pevnosti zeminy, což je jedním z hlavních účelů stabilizace. Při procesu vytvrzování dochází k tomu, že částice cementu vytvářejí vazby mezi sousedními zrny cementu a zeminy. Vzniklé vazby se postupně vytvrzují, čímž dochází ke vzniku pevnější struktury (Obr. 12). Jelikož tato skutečnost je založena na složení cementu, je podstatné právě množství cementu a jeho typ. Množství zvoleného cementu je důležitým faktorem pro získání nejlepších výsledků dané stabilizace. Nejnižším možným voleným množstvím cementu jsou 2 %. Doporučená dávka při stabilizaci zemin se pohybuje v rozmezí 2–8 %. Pokud je nutné provedení zatížení ještě před dozráním je voleno množství nad 8 %. Je také možné použití kombinace vápna a cementu, což je vhodné především pro prachovité zeminy. [32][33]



Obr. 12 – Příklad stavu zeminy smíchané s cementem a) před hydratací, b) po několika týdnech zrání [32]

Jak u vápna, tak i zde díky úpravě zemin vznikají změny s okamžitými a dlouhodobými účinky, a navíc zde přibýly změny se střednědobými účinky. [31]

Okamžité účinky

1. Vysoušení zeminy

Jak u vápna, tak i u cementu dochází vlivem přidání pojiva k vysoušení zeminy neboli ke snížení optimální vlhkosti zeminy. Snížení vlhkosti je závislé na množství přidaného pojiva, Zpravidla se jedná o pokles kolem 0,3–0,5 % po přidání 1 % hydraulického pojiva. [31]

2. Modifikace vlastností jílovité frakce zeminy

Jestliže v hydraulických silničních pojivech je vysoký obsah vápna, tak nastává flokulace jílových minerálů. Vysvětlení tohoto procesu je možné vidět na Obr. 10 a Obr. 11. [31]

Střednědobé a dlouhodobé účinky

Tyto účinky úpravy jsou výsledkem zpevňujících reakcí, které probíhají v následujících třech etapách.

1. Etapa

První etapa je označována jako latentní fáze. Tato fáze představuje dobu, po kterou je možné se směsí pracovat. Většinou trvá 2–24 hod, maximálně však 48 hod. V této etapě dochází k rozpuštění a vysrážení gelu. [31]

2. Etapa

Zde nastává krystalizace gelu a následné zpevňování směsi. Průběh etapy se pohybuje v rádech několika týdnů. [31]

3. Etapa

Tato etapa se označuje za zpevňující. Tím, že zde dochází k tvorbě všech Fe – Si aluminátů, tak se pevnost zeminy zvyšuje. Doba trvání fáze záleží dle druhu pojiva, ale pohybuje se v rozmezí několika týdnů až měsíců. [31]

2.3.3 SMĚSNÁ POJIVA

Ke zlepšování vlastností zemin je velmi vhodné a účinné použití metody úpravy pomocí vápna nebo cementu. I když se jedná o využívanou metodu, nelze vyloučit, že úprava vlastností jedním druhem pojiva nemá své nevýhody. Využití těchto pojiv není bohužel univerzální a každé z nich je vhodné pro specifickou zeminu. Pro písčité zeminy není dostačující použití vápna, a naopak u vysoce plastické zeminy není vhodný cement. Pakliže v upravovaném úseku zeminy nastane nehomogenita podloží, tj. podloží, které není složeno z jednoho druhu zeminy, ale z více různých druhů zemin, pak je vhodné v některé části úseku použít cement a v jiném vápno. [27] Pokud je při úpravě použit cement je třeba brát zřetel na rychlý nárůst pevnosti, což způsobuje vznik trhlin v zemině. Vápno není zcela vhodné použít pro expanzivně plastické zeminy, z toho důvodu že účinek vápna v zemině je pouze dočasný. Díky tomu nemusí dojít k výslednému efektu, který požadujeme, což je trvalá pevnost. [40]

Za účelem najít ideální řešení byla objevena směsná pojiva. Jedná se víceméně o spojení vápna a/nebo cementu a příměsí. [6]

Cílem úprav zemin směsným pojivem je:

- pomalejší nárůst pevnosti,
- vyloučení trhlin,
- trvanlivost vůči síranům, na které je vápno velmi citlivé,
- cenová výhodnost,
- úprava nehomogenních úseků podloží. [6]

3 DRUHOTNÉ SUROVINY

Ve své práci se z části věnuji i druhotným surovinám. Použití těchto surovin je zvoleno záměrně, jelikož dle teoretických podkladů jsou právě druhotné suroviny velmi využívané pro použití stabilizace podloží. Tento druh surovin byl vybrán i z ekologického hlediska. V dnešní době je jak naším, tak celosvětovým problémem likvidace velkého množství odpadu, a to zejména stavebního. Hospodaření s odpady neboli recyklace stavebních odpadů spadá legislativně pod ochranu životního prostředí a je tedy řešena zákonem č. 185/2001 Sb. o odpadech [41]. Bohužel se stále na stavební recyklát pohlíží nedůvěryhodně, a proto je potřeba vytvářet kvalitní recyklát, což je ovlivněno několika faktory. Kvalita záleží na třídění návozu materiálů, které jsou určeny k recyklaci (kamenivo, čisté betony z demolic), na pečlivé separaci nerecyklovatelných složek (dřevo, lepenka, plast) a pravidelném sledování a ověřování fyzikálně – mechanických vlastností vyprodukovaných recyklátů. [42]

Z názvu mé práce je patrné, že budu provádět stabilizaci, a to za pomoci právě druhotných surovin. Je zapotřebí tedy provést vhodný výběr, díky kterému pak bude možné vytvořit novou směs pro stabilizaci s použitím druhotných surovin.

Tato kapitola bude o seznámení se s druhotnými surovinami a představením zástupců této kategorie. Před začátkem je potřeba si definovat základní pojmy této problematiky:

Druhotná surovina představuje vedlejší produkt z výrobního procesu nebo recyklát, který vznikl pomocí rozdělení stavebního materiálu tělesnou likvidací stavebních konstrukcí. Druhotná surovina je využívána buď jako surovina v původním stavu, anebo jako upravená. Použití druhotných surovin má spoustu výhod. Představuje například snížení dopadu na životní prostředí, spotřebu materiálu, energie a nízké výrobní náklady. Pod pojmem druhotná surovina si můžeme představit například popílek, strusku, materiály z vozovek, nebo při opravách konstrukcí atd. [41]

Recyklace odpadů představuje libovolný způsob využití odpadů, jímž je opětovně použit na výrobky, látky či materiály pro prvotní nebo různé potřeby jejich použití. Recyklace odpadů neznamena energetické využití a zpracování materiálů nebo výrobků, které by mohli být použity na palivo či zásypový materiál. [41]

3.1 OBECNÝ PŘEHLED VYBRANÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN

Tato kapitola pojednává o souhrnném přehledu druhotných surovin, které mohou být využity pro stabilizaci. Jednotlivé druhy budou představeny a následně budou popsány jejich základní vlastnosti, jako je například zrnitost, sypná hmotnost či nasákavost atd. Na základě těchto vlastností lze dále vybrat užší výběr pro návrh do konstrukcí železničního spodku.

3.1.1 STAVEBNÍ RECYKLÁTY

V České republice využíváme recyklované stavební odpady jako zásypový materiál. Tento materiál je možno využít k povrchovým úpravám lesních komunikací nebo dále právě k úpravám plání dopravních a železničních staveb. Pokud chceme stavební recyklát využít k dalšímu použití, je potřeba se věnovat jejich kvalitě. U jakosti těchto materiálů je důležité brát v potaz typické dopady, které se objevují již při výrobě. Může se jednat například o druhotnou různorodost, znečištění nebo odlišnou granulometrii. Tyto vlastnosti se vyznačují vysokou proměnlivostí jejich vlastností. Po těchto poznátcích jsme schopni dále upřesnit speciální požadavky na přípravu receptury, výrobu a ošetření prvků. Základní podmínkou je, aby vlastnosti recyklátů žádným způsobem neohrozily procesy nabývání pevnosti pojiva z toho důvodu, aby mohla vzniknout pevná hmota o požadovaných fyzikálně mechanických vlastnostech. [42]

3.1.1.1 CIHELNÝ RECYKLÁT

Už v poválečných světových konfliktech bylo získáno nejvíce zkušeností s asanačním cihelným zdivem. V dnešní době pozorujeme záměrné využívání sutí cihelného zdiva, a to hlavně z důvodu eliminace skládek odpadů a úspore přírodních zdrojů. Jelikož nechceme, aby byly narušeny procesy hydratace, tak je zapotřebí provést selektivní výběr z cihelné drti. Nevhodnou součástí cihelného recyklátu mohou být například materiály napadené houbami, plísněmi nebo části zdiva komínového tělesa. [42] Cihelný recyklát, které je možné vidět na Obr. 13, má ve většině případů zrnitost kolem 80 mm a vzniká v nejméně třech frakcích 0 – 16 mm, 13 – 32 mm a 32 – 80 mm. [43] Konečné vlastnosti cihelného recyklátu jsou založeny na kvalitě a druhu vstupních surovin, které vcházejí do výroby a také na způsobu či kvalitě výrobního procesu. Velký vliv na použití cihelného recyklátu má tzv. zkouška odolnosti proti otlukovosti. Průměrné

výsledky se pohybují kolem 70–80 %, z čehož plyne, že tento typ recyklátu není vhodný do konstrukčních vrstev. Další z jeho negativních vlastností je nízká pevnost v tlaku a vysoká nasákavost, která se udává v hodnotách až kolem 10 %. Díky vysoké nasákavosti je cihelný recyklát nevhodný zejména kvůli namrzavosti. Tato vlastnost by mohla způsobit roztrhání povrchu mrazem. Naopak je možné ho využít pro zlepšení zemin v podloží především kvůli zlepšení zrnitosti. [44] Pro použití do násypů zemních těles komunikací je nejvhodnější menší frakce cihelného recyklátu. [42]



Obr. 13 – Cihelný recyklát [44]

3.1.1.2 BETONOVÝ RECYKLÁT

V posledních letech je betonový recyklát velmi oblíbený, a to hlavně z důvodu, že lze použít jako náhrada přírodního kameniva pro výrobu konstrukčních betonů. Je potřeba speciálně věnovat pozornost přípravě, třídění, a použití drobné frakce do 4 mm. Betonový recyklát se dá využít i v úseku silnic a dálnic. [42] Používá se například pro výstavbu a opravy živičných vozovek. Aplikování a zkušenosti v betonových recyklátech jsou obsaženy v normě ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutnění asfaltové vrstvy [45].

Tento typ recyklátu má výrazně lepší fyzikální vlastnosti než již zmíněný cihelný recyklát. I z toho důvodu má větší využití, zejména v rámci materiálů nosné konstrukce. Dle jeho vlastností ho lze z pohledu konstrukcí použít do podkladních vrstev vozovek nebo je vhodný i do pražcového podloží železničních svršků, kde je využívám jako mechanicky zpevněná zemina. Opět může, jako cihelný recyklát, dosahovat zrnitosti až 80 mm a je rozdělen do několika frakcí, což je zobrazeno na Obr. 14. [46] Mezi jeho záporné vlastnosti patří heterogenost. Jak u cihelného recyklátu, tak i zde je vyšší nasákavost a to kolem 5 – 10 %. U drobné frakce může hodnota přesáhnout i 10 %. Dalším nedostatkem je trvanlivost drobné frakce. Využití do aktivních zón násypů těles najde frakce 0 – 16 mm obdobně jako směsný recyklát. Nicméně betonový recyklát má lepší výsledky únosnosti, mrazuvzdornosti či nasákavosti. Recyklát této frakce je dobře zhutnitelný. [43][47]

Pomocí laboratorních zkoušek byly zjištěny poznatky, dle kterých víme, jaký betonový recyklát můžeme použít. Po vytrídění na vyšší frakce jak 0 – 16 mm bylo

zjištěno, že tyto frakce jsou pro dopravní stavby nevhodné. Je zapotřebí podrobnější třídění dle ČSN 73 6121 [45] na menší frakce, které jsou použitelné do podkladních ložných a obrusných vrstev. [42]



Obr. 14 – Betonový recyklát různých frakcí [48]

3.1.1.3 ASFALTOVÝ RECYKLÁT

Jedná se o materiál, který jsme schopni získat odfrézováním asfaltových vrstev nebo z velkých kusů asfaltové směsi či drcením desek vybouraných z asfaltových krytů vozovek. [47] Je dáno, že asfaltové recykláty jsou vyhovující především v technologii za studena za využití emulzí či kombinací s cementem. Díky tomu dochází k tomu, že závadné částice jsou obalena stmelěným dehtem, čímž je snižováno riziko znečištění odpadních vod či blízkého okolí. U starých živичných úprav se objevují dehtová pojiva, která nejdou připravovat za horka z toho důvodu, že jsou problémy s jejich deponováním a před znovupoužitím je potřeba je upravit. Prováděly se různé zkoušky asfaltového recyklátu, které poté dokázaly alternativní úpravy materiálu a možnost použít recyklovaný asfalt za studena. [42] U tohoto druhu recyklátu je požadována informace o obsahu dehtu, jelikož se jedná o látku, která je karcinogenní. V silničním stavitelství je především využíván k výrobě směsi stmelěných hydraulickými pojivy, pro nestmelené podkladní vrstvy nebo k hutnění asfaltových vrstev. [49] Asfaltový recyklát různých frakcí je zobrazen na Obr. 15. [48]



Obr. 15 – Asfaltový recyklát různých frakcí [48]

3.1.2 VEDLEJŠÍ ENERGETICKÉ PRODUKTY

Vedlejší energetické produkty jsou označovány zkratkou VEP. Jedná se o odpady, které vznikají zejména technologií výroby elektrické energie, tepla v tepelných elektrárnách nebo jiných výrobních provozech, kde dochází ke spalování pevných paliv, jako je např. uhlí či biomasa. VEP jsou označovány jako produkty, které dále nelze využít, a tím pádem jsou odloženy na skládku. Do této skupiny řadíme:

- popílek (fluidní, klasický)
- strusku,
- škváru,
- energosádrovec. [50]

Odpady vznikající v energetice jsou pro životní prostředí nebezpečné, a to hned z několika důvodů. Jsou označovány za škodlivé proto, že mohou obsahovat karcinogenní i toxické prvky. Dalším nebezpečím, které mohou představovat, je jejich radioaktivita. Nejčastějším zdrojem těchto odpadů bývají spalovací zařízení nebo topeniště. V České republice dochází ke vzniku výše uvedených produktů zejména v elektrárnách, teplárnách nebo hutních podnicích. [51]

Důvodem výběru tohoto typu odpadu je primárně jimi nahradit přírodní suroviny (vápenec, slínek, kámen atd.), čímž dojde ke snížení emisí CO₂. Díky použití VEP dosáhneme snížení dopadu na životní prostředí. [49] Ve stavebním průmyslu mají VEP široké využití. Dají se použít při výrobě cementu, betonu, pórobetonu, cihlářských a keramických výrobků atd. Pro mou práci je, ale stěžejní, že je možné VEP uplatnit v oblasti pozemního stavitelství (silnice, železnice), zejména tedy jako materiál vhodný pro stabilizaci. [52]

3.1.2.1 POPÍLEK

Popílek je označován jako nerostný houževnatý zbytek, který vzniká při vysokoteplotním spalováním tuhých paliv v roštových kotlích a je zachycován v odlučovačích. Jedná se o heterogenní materiál, jehož vlastnosti závisí na kvalitě spalovacího uhlí a dále na technologii spalovacího procesu. Z chemického složení se popílek skládá z 50 % oxidu křemičitého, 25 – 30 % oxidu hlinitého a 3 – 8 % FeO a v drobné četnosti se mohou objevovat oxidy Ti, Ca, Na, SO₃. Tyto oxidy mohou ovlivňovat vlastnosti popílků, což je uvedeno v Tab. 14. Podle způsobu spalování uhlí dělíme popílek na klasický a fluidní. [53]

Tab. 14 – Vliv oxidů na vlastnosti popílků [51]

Oxid	Vliv oxidu na vlastnosti popílků
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 zapříčinit objemovou nestálost
SO ₃	Kontrolovaný parametr, nemá být vyšší než 3 hm. %

Klasický vysokoteplotní popílek vzniká spalováním paliva při vysokých teplotách, kolem 1200 – 1600 °C. Jde o jemnozrný prach tvořený z kulovitých zrn, jejichž podíl je vyšší než 50 % a díky tomu je ovlivněna reaktivita popílků s vápnem či cementem s vodou. Kvůli jeho velké jemnosti a reaktivitě se tento popílek využívá do stavebních materiálů, které jsou spojovány cementem z důvodu vylepšení technických vlastností, a dále k nahrazení pojiva. Klasické popílků musejí splňovat určité technické parametry. Mezi základní parametry patří minimální obsah SiO₂ 40 %, obsah síry do 3 % a chloridů do 0,1 %, ztráta sušením pod 1 % a ztráta žiháním do 4 %. [53][54]

Fluidní popílek je z ekonomického hlediska pro většinu tepelných elektráren výhodnější. Největším rozdílem mezi fluidním a klasickým popílkem je právě teplota výpalu. U fluidní technologie výpalu se teplota pohybuje relativně nízkou a to kolem 850 °C oproti klasické technologii. Konečným výsledkem je směs popela, odsiřovacího činidla, síranu vápenatého a nespáleného paliva. Právě nízká teplota dokáže potlačit produkci oxidů dusíku. Při výpalu je přítomen vápenec, který pohlcuje právě vznikající oxid siřičitý. Ze zbytků sorbentu vzniká volné vápno, které potom vytvoří tuhý odpad. Fluidní popílků pojmají vysoký obsah SO₃ (7 – 18 %), jehož přítomnost může zapříčinit v pojivu vznik ettringitu. [53][54]

3.1.2.1 STABILIZACE POPÍLKEM

V kapitole 2.3.2 byla zmíněna stabilizace, a to za pomoci cementu a vápna, která jsou označována podle Makusy [39] za tzv. primární pojiva. V praxi jde dále využít i další stabilizační materiály, která jsou označována za tzv. sekundární pojiva a podle TP 93 [55] jsem zejména patří popílek a popel (PP – nestabilizovaný), fluidní popel a popílek (FPP), struska/škvára z granulačních/ roštových kotlů, popílkový stabilizát (PSt– stabilizovaný popílek). [55] Již zmiňovaný **popílek** je nejvíce používaný z této skupiny materiálů pro stabilizaci zemin z důvodu, že se jedná o surovinu, která je dostupná, šetrná k životnímu prostředí a levná. [32]

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.1.2.1, tak popílky obecně dělíme na klasický a fluidní. Pokud hovoříme o klasickém popílku je nutné říct, že není schopný reagovat společně s vodou. Z toho důvodu je potřeba při stabilizaci zemin tímto popílkem přidat aktivátor, čímž může být cement nebo vápno. Ve fluidním popílku na rozdíl od klasického, se CaO objevuje v nezreagované formě neboli jako měkce pálené vápno. Výskyt tzv. reaktivního CaO v popílku je značnou výhodou pro použití při stabilizaci zemin. [32]

Dle Makusy [39] nastává během procesu stabilizace zemin pomocí popílku více k mechanickému spojování, než k iontové výměně mezi popílkem a jílovými minerály. Ale pokud je ke směsi přidáno malé množství aktivátoru, je poté popílek schopen reagovat za vzniku podobných reakcí, které jsou vytvořeny při hydrataci cementu. Stabilizací popílkem je získáno lepších technických vlastností upravovaných zemin. Jedná se především o zlepšení zpracovatelnosti, pevnosti v tlaku či snížení objemových změn. [32][39]

Jako cement či vápno, tak i popílek má své nevýhody či omezení, která mohou nastat v průběhu stabilizace. Jedná se o:

- přítomnost síry ve směsi zeminy a popílku, může vést ke vzniku expanzivních reakcí, které vedou ke snížení dlouhodobé pevnosti a trvanlivosti,
- zemina, která má být stabilizována, musí mít menší obsah vlhkosti, díky čemuž může být vyžadováno její odvodnění,
- směs zeminy stabilizované popílkem, vytvrzované pod bodem mrazu a následným stykem s vodou, je vysoce náchylná k popraskání a ztrátě pevnosti. [32]

3.1.2.2 STRUSKA

Jedná se o pevný, nekovový doprovodný prvek hutní výroby, který vzniká při roztavení hlušiny rudy a dále se k němu přidávají struskotvorné látky a podíly z tuhých paliv. Představuje vedlejší produkt spalovacích procesů kovů – oceli, uhlí. Ve stavebnictví je nejvíce využíván právě granulát vysokopecní strusky, která se využívá do násypů zemních těles dopravních komunikací jako sypanina, pouze za předpokladu, že neobsahuje minerální látky. Při návrhu je zapotřebí uvažovat její zrnitost, rozpadavost a případný vznik sedání. Dalším typem strusky je mletá granulovaná struska, která se využívá pro stmelené podkladové vrstvy ve formě pomalu tuhnoucího pojiva. Při výrobě oceli vzniká nekvalitní odpad, který označujeme jako ocelářskou strusku. Jelikož je tento

odpad objemově nestálý a tím pádem způsobuje poměrně velké deformace stavebních konstrukcí, tak je považován za nevhodný. [56]

3.1.2.3 ŠKVÁRA

Je označována za vedlejší produkt, který vzniká během spalovacích procesů při spalování pevných paliv a také spalování odpadů. Jedná se o materiál, který má skelný a porézní charakter. Představuje jiný druh strusky a díky vzhledu a svým vlastnostem velmi často připomíná špatně zrněné písky. Škvára má určité požadavky, které musí splňovat: $\text{CaO} + \text{MgO} = 0$, minimum nevyhořelých látek, obsah $\text{SO}_4^{2-} < 4 \%$, a zároveň žádné rozpustné sírany. Může se vyskytovat jako drcená nebo tříděná. Dále je také možnost úpravy aktivací, která slouží ke zlepšení kvality a pevnosti. Využívá se nejvíce pro výrobu škvárobetonů a dále jako zásyp pro zemní vrstvy stavebních konstrukcí. Co se týče silničního stavitelství, tak škvára je nejčastěji používána do podkladních vrstev vozovek především jako náhrada přírodního kameniva. [56]

CÍL PRÁCE

Cílem práce je navrhnout možný způsob využití druhotných surovin při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb.

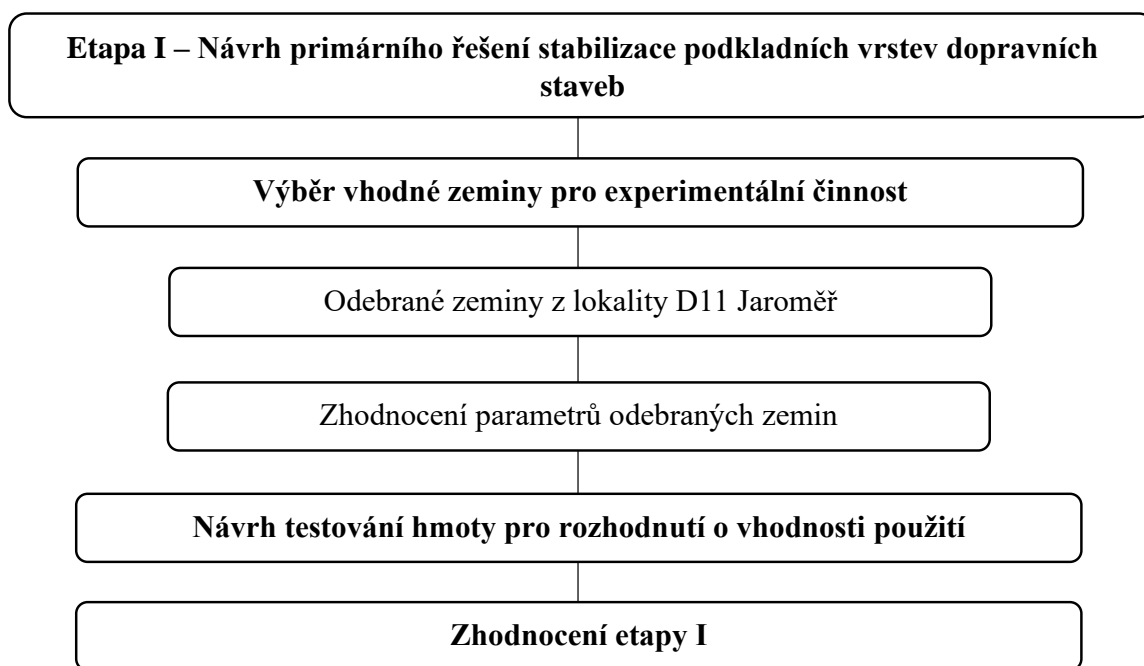
Pro dosažení hlavního cíle je práce rozdělena na několik cílů dílčích. Jedním z nich je vybrat vhodnou zeminu a navrhnout základní soubor surovinových směsí, který bude následně ověřen a podle výsledků bude vybrána optimální varianta pro ověření vlivu druhotných surovin na parametry výsledné směsi. Pro objasnění, na jakém principu je založena stabilizace, je nezbytné, aby se práce věnovala i poживům díky nimž se především provádí stabilizace podkladních vrstev. Kromě volby vyhovující zeminy pro experimentální ověření, je dalším dílčím cílem výběr vhodné druhotné suroviny. Pomocí optimalizačního výběru z několika druhů druhotných surovin bude vybrána ta nejvhodnější pro použití úpravy vlastností nevhodných zemin. Poté pomocí metodického postupu bude navržen průběh experimentálního zkoušení včetně návrhu zkušebních receptur. Posledním dílčím cílem je zvolení optimální surovinové směsi. Na základě provedených laboratorních zkoušek a výsledků bude provedeno srovnání odlišných receptur, a nakonec se stanoví výsledná varianta směsi. Hlavní myšlenkou práce je, aby bylo vše směřováno na maximální využití druhotných surovin, a to zejména z hlediska ekologie a také ekonomiky.

PRAKTICKÁ ČÁST

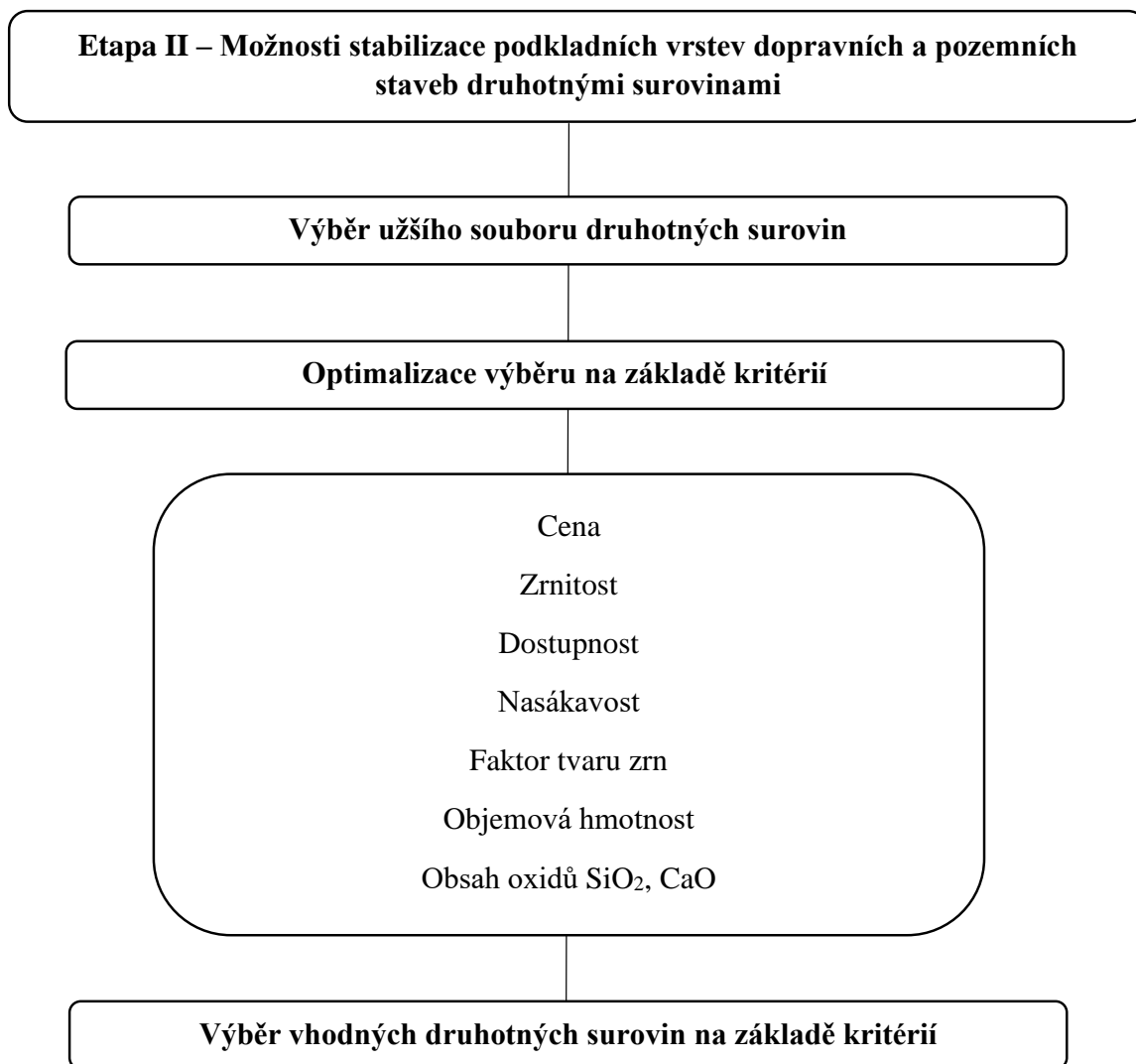
Praktická část bakalářské práce je rozdělena na čtyři dílčí etapy. V úvodu je představena přehledná metodika jejich řešení, kde je každá z etap podrobněji popsána. Experimenty budou prováděny na jednom vzorku zeminy za účelem stabilizace pomocí pojiva a zejména druhotných surovin. Stanovené výsledky jednotlivých etap budou přehledně uvedeny v tabulkách a grafech. Všechny zkoušky budou prováděny dle předpisů a platných norem. Na konec bude provedeno zhodnocení všech výsledků, z čehož vyplyne závěr práce.

4 METODIKA ŘEŠENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

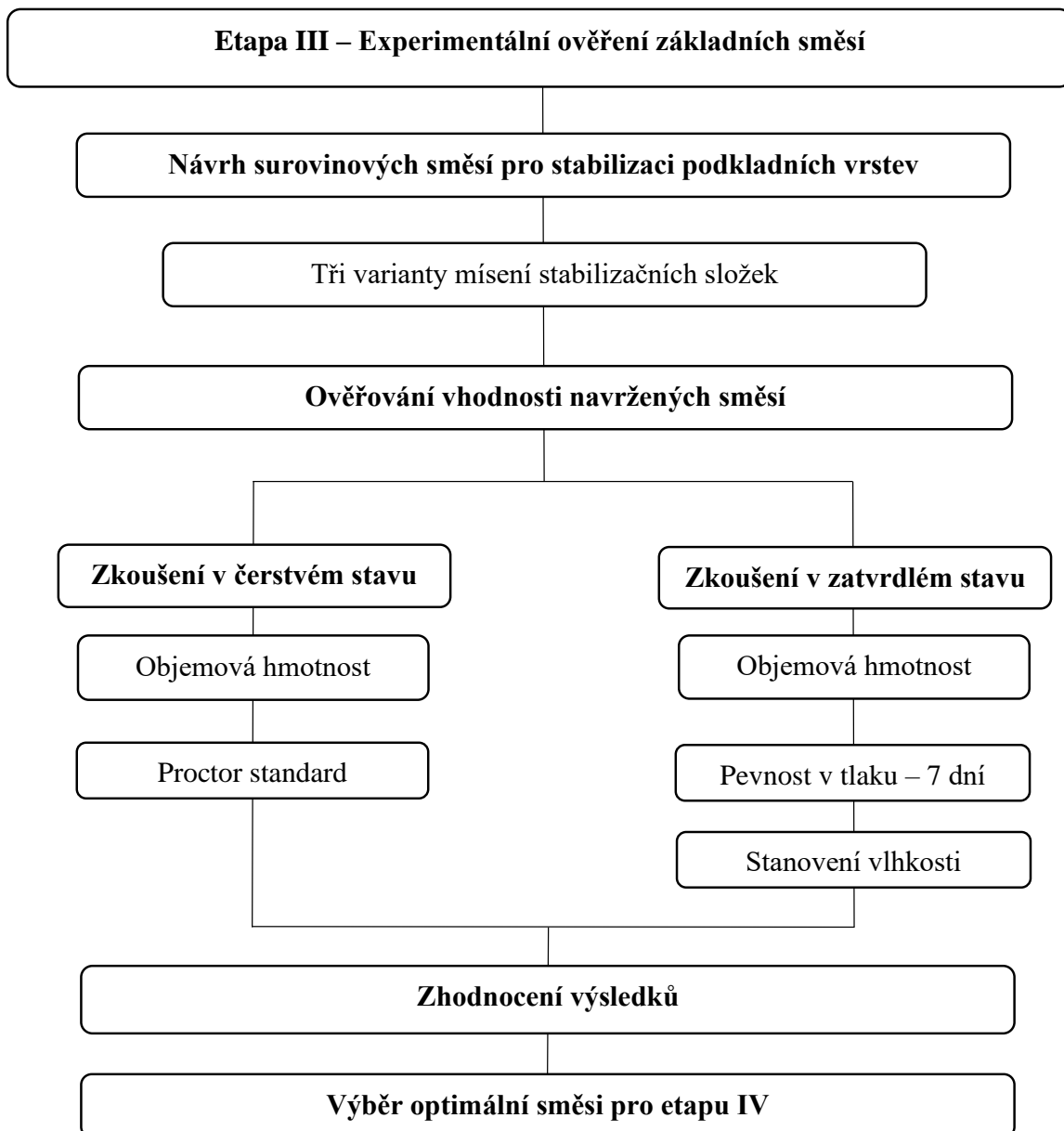
Praktická část je rozdělena do čtyř na sebe navazujících etap, které budou následně v dalších odstavcích důkladněji rozepsány.



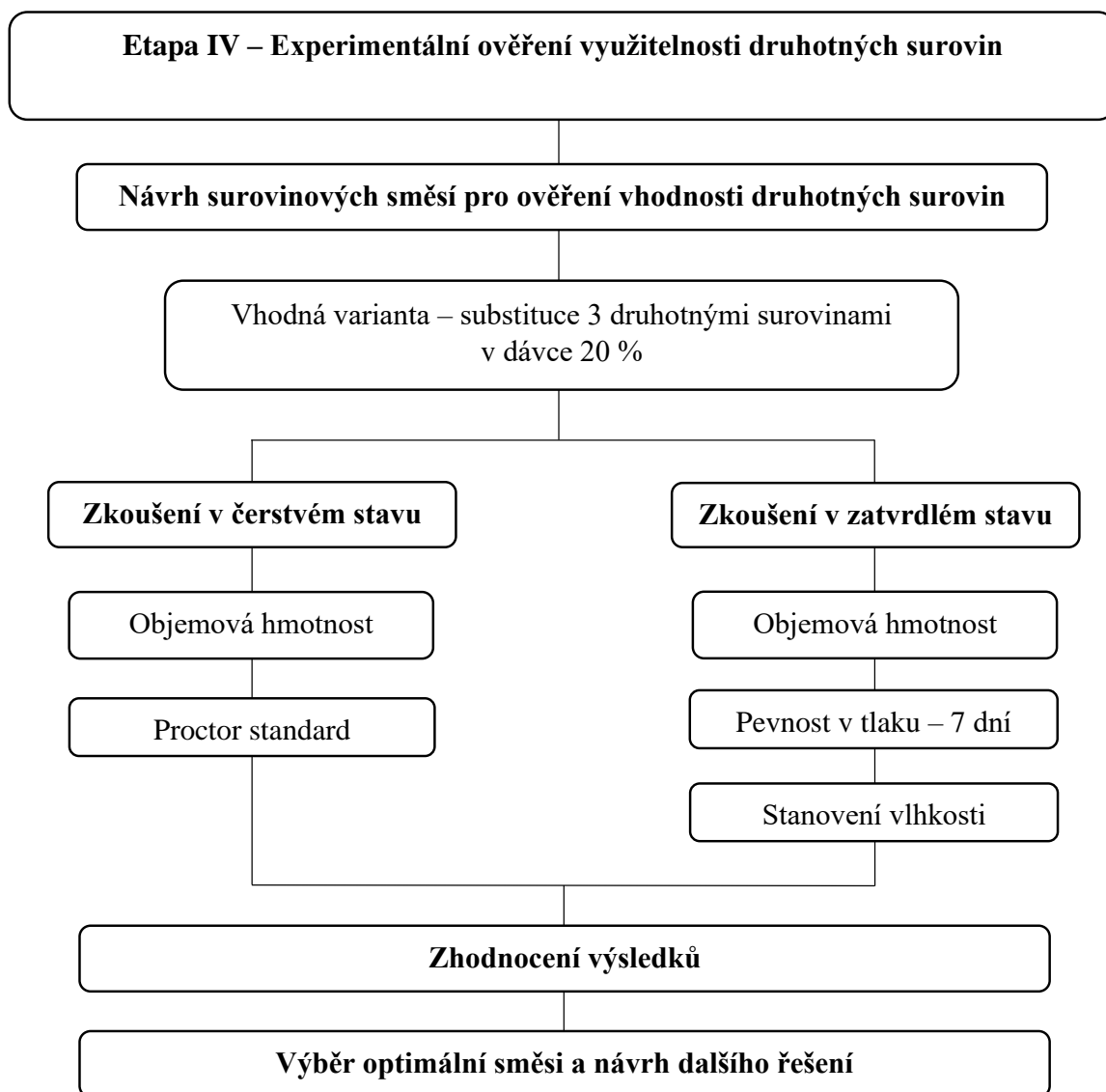
V první etapě praktické části budou zhodnoceny získané poznatky a navrženo primární řešení stabilizace podkladních vrstev. Navrhne se, jaké by směs měla mít parametry a vlastnosti, když budu mít k dispozici odebrané zeminy ze stavby D11 z lokality Jaroměř, které byly poskytnuty v rámci řešení projektu s firmou INFRAM a. s. Pro rozhodnutí vhodnosti se provede testování vytvořené hmoty. Na konci této etapy vyjde vhodná primární surovina, která bude použita v etapě III na návrh směsi pro experimentální ověření.



Na základě poznatků z teoretické části budou stanoveny ve druhé etapě možnosti vhodné stabilizace podkladních vrstev dopravních a pozemních staveb druhotnými surovinami. Bude vytvořen výběr užšího souboru druhotných surovin a provedena optimalizace výběru. Na základě daných kritérií budou vybrány vhodné druhotné suroviny, ze kterých se následně navrhnou směsi pro experimentální ověření.



Třetí etapa bude věnována návrhu směsí pro stabilizaci podkladních vrstev. Provede se výběr tři různých variant mísení stabilizačních složek. Následně bude stanoven výběr užšího souboru zkoušek pro bakalářskou práci, vybraných směsí, které budou následně zkoušeny jak v čerstvém stavu, tak v zatvrdlém stavu. Na závěr této části bude provedeno celkové zhodnocení výsledků a vybere se vhodná směs, která bude použita v etapě IV.



Čtvrtá a zároveň poslední etapa se zabývá na experimentální ověření využitelnosti druhotných surovin. Jako v předešlé etapě navrhnu surovinové směsi pro ověření vhodnosti druhotných surovin a následně u vhodné varianty budou provedeny substituce třemi druhotnými surovinami, a to v dávce 20 %. Poté bude realizováno ověření vhodnosti navržených směsí pomocí laboratorních zkoušek. Jako v etapě III se budou směsi zkoušeny jak v čerstvém stavu, tak i v zatvrdlém. Následně bude provedeno celkové zhodnocení výsledků a na závěr práce navržen výběr optimální směsi a popřípadě další postup.

5 ETAPA I - NÁVRH PRIMÁRNÍHO ŘEŠENÍ STABILIZACE PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH A POZEMNÍCH STAVEB

Základním krokem, který je důležitý při technologii stabilizace je především výběr zeminy, která tvoří základ celého procesu. Z názvu etapy vyplývá, že v této etapě bude úkolem navrhnout primární řešení stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb, zejména tedy železnic, z čehož jako výsledek vyjde vhodná zemina pro použití do experimentálního ověření. Obsahem této etapy jsou kritéria vhodnosti zemin na základě, kterých byla vybrána vhodná zemina pro experiment. Dále jsou zde uvedeny hodnoty výkopových sond z oblasti stavby D11 Jaroměř, ze kterých bylo vybíráno za účelem volby vhodné zeminy.

5.1 KRITÉRIA PRO VHODNOST ZEMINY

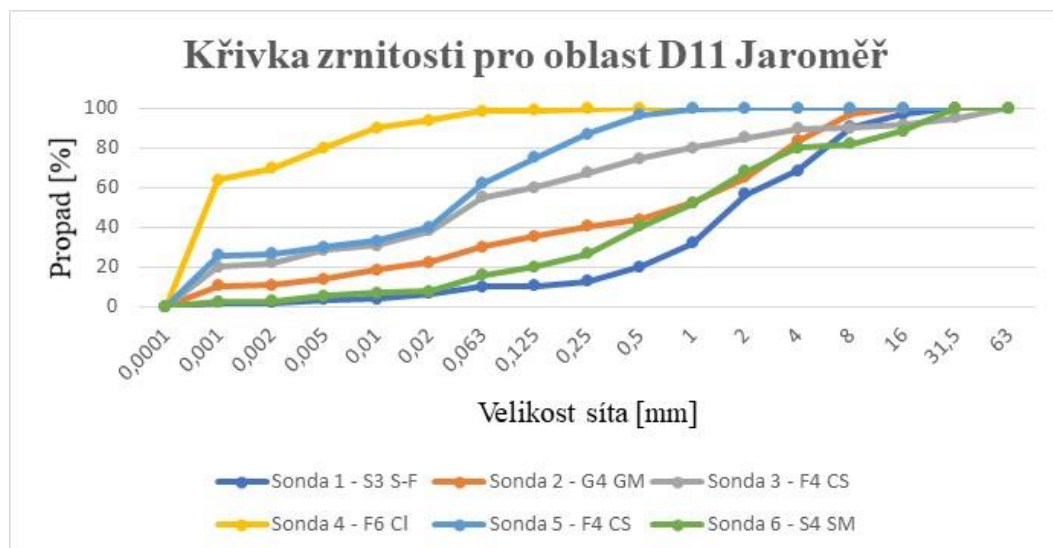
V této kapitole bude popsán souhrnný výčet parametrů a vlastností zemin na základě, kterých může být rozhodnuto, že je zemina nevhodná. Do zemního tělesa nejsou vhodné zvláštní zeminy dle ČSN 1997–1 [14] a jedná se hlavně o prosedavé, organické a jiné zvláštní zeminy – zasolené zeminy s obsahem vodou rozpustných solí více než 10 %. Nevhodnými zeminami jsou dále například antropogenní zeminy nebo ty, které mají vysokou či extrémně vysokou plasticitu. Do zemního tělesa železničního spodku jsou nevhodné zeminy s tekutostí w_c více než 60 %. Pokud je objemová hmotnost suché zeminy, která je stanovena pomocí zkoušky Proctor standard dle ČSN EN 13286–2 [59] menší než 1500 kg/m^3 , je tato zemina taktéž považována za nevhodnou. Dále jsou nevyhovující zeminy, které jsou objemově nestálé (bobtnání), u nichž by docházelo v železničním spodku k objemovým změnám, které by byly větší než 3 %. Jde-li o zeminu s číslem konzistence $I_c < 0,5$ je považována taktéž za nevhodnou.

Následně jsou zde popsány konkrétní zeminy a dle teoretických poznatků je stanovena vhodnost či nevhodnost zeminy. Jedná-li se například o jemnozrnné zeminy s nízkou, střední a vysokou plasticitou, tak ty jsou pro zemní těleso méně vhodnými, ale jejich použití není zcela vyloučeno v případě, že budou splňovat jistá opatření. Jedná se zejména o zlepšení nebo stabilizaci vlastností zemin nebo dále o vyztužení geosyntetikou. Nejvíce vhodnými zeminami do tělesa železničního spodku jsou rozhodně písčité

a štěrkovité. Je možnost použít i kamenité a balvanité zeminy, ale pouze za předpokladu, že budou zachovány zásady dle ČSN 73 6133 [12] a maximální velikost zrna nepřekročí 2/3 tloušťky vytvářející vrstvy. Z tohoto textu je patrné, že do tělesa železničního spodku jsou víceméně vhodné všechny zeminy. Je ale potřeba, aby vyhovovaly požadavkům míry zhutnění nebo modulu přetvárnosti. Pokud nesplňují požadované parametry, je potřeba zeminy nějakým způsobem upravit, jak už bylo zmíněno u jemnozrnných zemin. Tyto zeminy nelze do tělesa použít bez jakékoli úpravy. Za nejvhodnější zeminy jsou považovány písčité a štěrkovité, propustné a nenamrzavé eventuálně mírně namrzavé.

5.1.1 VÝBĚR VHODNÉ ZEMINY Z VÝKOPOVÝCH VRTŮ Z OBLASTI D11 JAROMĚŘ PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST

V kapitole 2.2.6 jsou uvedeny informace, které popisují, jaká zemina je vhodná či nevhodná pro použití do tělesa železničního spodku. V Tab. 9 a 10 jsou zobrazena kritéria, podle kterých je v této kapitole proveden výběr zemin. V rámci řešení projektu s firmou INFRAM a. s. byly získány vzorky potenciálně vhodných zemin pro experimentální činnost zpracovávané bakalářské práce. Konkrétně se jedná o zeminy ze stavby D11 v lokalitě Jaroměř. V dané lokalitě bylo provedeno šest zvolených výkopových vrtů. Na odebraných zeminách bylo potřeba provést stanovení několika parametrů z důvodu jejich zařídění. Jedná se zejména o stanovení zrnitosti, vlhkosti, meze tekutosti, meze plasticity, indexu plasticity, stupně konzistence a objemové hmotnosti. V následujících tabulkách (Tab. 15 a Tab. 16) jsou zobrazeny informace jednotlivých druhů zemin z již uvedené oblasti, které mi byly poskytnuty z výzkumných zpráv THD. Klasifikace všech zemin je stanovena dle normy ČSN EN ISO 14689 [13]. U každé sondy je uvedeno i zařídění zemin, které bylo určeno podle ČSN EN 14688–1 [25] a ČSN EN 14688–2 [26]. V Tab. 15 je uvedeno pro každou sondu procentuální zastoupení jednotlivých frakcí. Kromě toho si můžeme všimnout, že v Tab. 16 je uveden již zmiňovaný základní souhrn parametrů, které byly na každé zemině stanoveny. Na základě těchto technologických vlastností bude proveden výběr. U písčitých zemin nejsou stanoveny parametry, jako je mez tekutosti, mez plasticity apod. z důvodu, že tyto vlastnosti se neuvádějí kvůli typu zeminy. Není opomenuto ani grafické znázornění křivky zrnitosti (Graf 1), která je složena z procentuálních propadů jednotlivými oky.



Graf 1 – Křivka zrnitosti pro oblast D11 Jaroměř

Tab. 15 – Procentuální propady jednotlivými oky

	Sonda 1 S3 S-F	Sonda 2 G4 GM	Sonda 3 F4 CS	Sonda 4 F6 CI	Sonda 5 F4 CS	Sonda 6 S4 SM
průměr oka	propad hm.	propad hm.	propad hm.	propad hm.	propad hm.	propad hm.
d [mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
63	100	100	100	100	100	100
31,5	100,0	100,0	95,0	100,0	100,0	100,0
16,0	97,0	100,0	91,5	100,0	100,0	88,5
8	90,5	97,5	90,0	100,0	100,0	82,0
4	68,5	83,5	89,5	100,0	100,0	80,0
2	56,5	65,0	85,0	100,0	100,0	68,0
1	32,0	52,5	80,0	100,0	99,5	52,0
0,5	20,0	44,0	74,5	100,0	96,5	40,5
0,25	13,0	40,5	67,5	99,5	87,0	26,5
0,125	10,5	35,5	60,0	99,0	75,0	20,0
0,063	10,0	30,0	55,0	98,5	62,0	16,0
0,02	6,5	22,5	38	94	40	8
0,01	4	18,5	31	90	33	7
0,005	3,5	14	28,5	80	30	5,5
0,002	2,1	11	22	69,5	26,5	3
0,001	2	10,5	20	64	26	2,5
0,0001	0	0	0	0	0	0

Tab. 16 – Základní technické vlastnosti jednotlivých druhů zemin

	Jednotka	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5	Sonda 6
Hloubka	m	1,3-1,5	4,4-4,6	0,7-0,9	10,3-10,5	12,0-12,1	0,5-0,8
Třída zeminy		S3 S-F	G4 GM	F4 CS	F6 Cl	F4 CS	S4 SM
Vlhkosti zemin	%	11,00	13,50	14,80	16,10	12,80	6,50
Mez tekutosti	%	-	-	46,00	31,00	27,00	-
Mez plasticity	%	-	-	19,00	13,00	14,00	-
Index plasticity	%	-	-	26,00	17,00	15,00	-
Stupeň konzistence	1	-	-	1,10	0,83	0,97	-

Z těchto šesti vzorků byly vybrány pro potřebu technologie stabilizace, zeminy ze dvou sond, z nichž jedna jako méně vhodná pro využití a druhá jako vhodná zemina bez nějaké potřebné úpravy. Výběr probíhal na základě porovnání získaných dat a dle předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3]. Pro lepší orientaci jsou v obou tabulkách vyznačené vybrané vzorky zemin. Vhodná zemina je označena zelenou barvou a málo vhodná oranžovou. Co se týče vhodné zeminy, tak byla vybrána sonda 1 – S3 S – F. Jedná se o písek s příměsí jemnozrnné zeminy. Při výběru méně vhodné zeminy s potřebou úpravy byla zvolena sonda 4 – F6 Cl, což je jíl se střední plasticitou.

5.2 NÁVRH ZEMINY PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST

Na základě porovnání výsledků jistých parametrů, byla pro experimentální činnost, z důvodu omezeného rozsahu bakalářské práce, vybrána pouze jedna zemina ze dvou navrhovaných, a to **S3 S-F**. Jedná se o **písek s příměsí jemnozrnné zeminy**. Tento typ byl zvolen z důvodu jeho vhodnosti, což ukazuje Tab. 10. V Tab. 8, která se nachází v kapitole 2.2.6 je uvedeno, že se jedná o zeminu, která je podmíněčně vhodná k přímému použití bez úpravy. I když jde víceméně o zeminu, která by nemusela být upravována, byla zvolena především proto, že v železničním spodku se objevuje častěji než druhý možný typ zeminy (jíl). Je tedy vybíráno i na základě využitelnosti v praxi.

5.3 NÁVRH DVOUSTUPŇOVÉHO TESTOVÁNÍ ZEMINY

Budou zde uvedeny dva stupně zkoušek, které budou prováděny na vzorcích daných směsí, a to jak v čerstvém stavu, tak i v zatvrdlém. První stupeň obsahuje pouze základní zkoušky, přičemž druhý stupeň je doplněný o podrobnější zkoušky a zároveň

s kratšími intervaly zkoušení. Dvoustupňové ověřování je navrhováno za účelem získání přesnějších výsledků. Testování bude navrženo, tak aby bylo získáno, co nejvíce parametrů. Jedná se zejména o rozměrové, objemové, pevnostní či trvanlivost, které jsou považovány za nejdůležitější.

1. stupeň

- Objemová hmotnost v čerstvém stavu
- Stanovení zhutnitelnosti – Proctor Standard
- Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu – 7, 28 dní
- Pevnost v tlaku – 7, 28 dní
- Stanovení vlhkosti

2. stupeň

- Objemová hmotnost v čerstvém stavu
- Stanovení zhutnitelnosti – Proctor Standard
- Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu – 7, 14, 28, 90 dní
- Pevnost v tlaku – 7, 14, 28, 90 dní
- Stanovení vlhkosti
- Stanovení únosnosti dle CBR
- Mrazuvzdornost – 28 dní
- Namrzavost

Dva stupně ověřování byly navrženy proto, aby byl předpřipravený základ pro poctivou laboratorní činnost. Pro širší rozsah testování a také z důvodu rozsahu zpracovávané bakalářské práce bylo rozhodnuto o použití pouze jednostupňového ověřování. Tím pádem v čerstvém stavu bude na směsích zkoušena objemová hmotnost a zkouška zhutnitelnosti, konkrétně Proctor standard. V zatvrdlém stavu bude po 7 a 28 dnech zkoušena objemová hmotnost, následně pevnost v tlaku, a nakonec vlhkost směsí.

5.4 METODIKA ZKOUŠEK PRO JEDNOSTUPŇOVÉ OVĚŘOVÁNÍ

Tato část pojednává o výčtu a popisu jednotlivých zkoušek, které byly navrženy pro jednostupňové ověřování směsí. Následující zkoušky byly prováděny dle uvedených postupů a norem.

5.4.1 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Objemová hmotnost čerstvých směsí určených ke stabilizaci podkladních vrstev se stanoví dle normy ČSN EN 12350–6 [57] a zatvrdlých směsí dle ČSN EN 12390–7 [62]. Z názvu těchto norem vyplývá, že jsou určeny především pro stanovení objemové hmotnosti betonu. Samotný výpočet tohoto parametru se provede dle vzorce (4) v čerstvém stavu a dle vzorce (5) v zatvrdlém stavu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4)$$

D ... objemová hmotnost čerstvé směsi [kg/m³]

m_1 ... hmotnost samotné formy [kg]

m_2 ... hmotnost formy i se směsí [kg]

V ... objem nádoby [m³]

$$D = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (5)$$

D ... objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m³]

m ... hmotnost zkušebního tělesa po určité době zrání [kg]

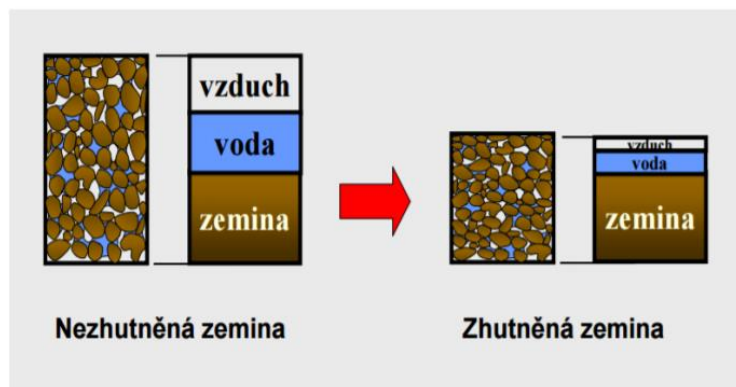
V ... objem tělesa zjištěný z jeho jmenovitých rozměrů [m³]

Výsledné hodnoty objemových hmotností se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³.

5.4.2 STANOVENÍ ZHUTNITELNOSTI

Než bude popsán postup této zkoušky je důležité uvést z jakého důvodu byla tato zkouška prováděna. Zhutnitelnost zeminy je důležitou vlastností všech druhů zemin, které jsou používány do tělesa železničního spodku. Než je zemina zabudována do zemního tělesa je potřeba ji důkladně zhutnit. Zhutnitelnost je závislá na tvaru zrn, granulometrickém složení, pevnosti zrn a obzvlášť vlhkosti. Lze zhutňovat jakýkoliv druh zeminy, a i další materiály jako jsou například druhotné suroviny, hlušina, popílky apod. Pojem zhutnění představuje odstranění vzduchových pórů obsažených v zemině (viz Obr. 16) mechanickým způsobem za pomoci zhutňovacích prostředků. Pro zvýšení pevnosti a únosnosti zeminy je využíváno právě této technologie. Zhutnitelnost dále slouží ke snížení sedání, zlepšení stability zeminy, zabránění působení mrazu a omezuje propustnost vody. [58]

Hlavním účelem této zkoušky bylo zjištění optimální vlhkosti w_{opt} a maximální objemové hmotnosti $\rho_{d,max}$. Z hodnoty optimální vlhkosti, která byla na dané zemině stanovena, se bude vycházet při laboratorním zkoušení navržených zemin v dalších etapách.



Obr. 16 – Nezhutněná a zhutněná zemina [58]

Podle výsledků zhutnitelnosti jsou zeminy rozdělovány do čtyř skupin:

- 1. skupina – výborná zhutnitelnost, rychlý přírůstek hmotnosti,
- 2. skupina – dobrá zhutnitelnost, potřebná je vyšší energie pro zhutnění,
- 3. skupina – vyhovující, potřebná je vyšší energie pro zhutnění,
- 4. skupina – nevhovující. [58]

Zhutnitelnost je možné zkoušet čtyřmi různými metodami laboratorních zkoušek, kterými je stanovena maximální objemová hmotnost zeminy a optimální vlhkost. [58]

- **Proctor standard** – ČSN EN 13286–2, [59]
- Proctor modifikovaný – ČSN EN 13286–2, [59][59]
- Vibrokomprese – ČSN EN 13286–3, [60]
- Vibrační pěch – ČSN EN 13286–4. [61]

Při zkoušce zhutnitelnosti záleží i na vlivu energie. Zvyšování energie má za následek snížení hodnoty vlhkosti w_{opt} a naopak zvýšení objemové hmotnosti ρ_d . Díky tomu je zemina ulehlejší, čímž získává větší smykovou pevnost a menší stlačitelnost. Pro Proctor standard se hutnicí energie pohybuje od $0,56 \text{ MJ/m}^3$ do $0,63 \text{ MJ/m}^3$. [59]

5.4.2.1 PROCTOR STANDARD

Postup této zkoušky je uveden v normě 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 [59], ve které

je možné si vybrat mezi Proctorovou zkouškou standardní nebo modifikovanou. Hlavním cílem je nalezení optimální vlhkosti w_{opt} , při které bude dosaženo maximální objemové hmotnosti ρ_{dmax} zkušební zeminy neboli maximálního zhutnění. Jedná se tedy o zjištění vzájemného vztahu mezi objemovou hmotností a vlhkostí hydraulicky stmelnými nebo nestmelnými směsi po zhutnění. Během hutnění dochází ke zvyšování objemové hmotnosti díky tomu, že mezi většími zrny se nacházejí póry, které jsou vyplňovány menšími zrny. Jelikož je objemová hmotnost spjata s vlhkostí, tak její hodnota neroste až do nekonečna. Jakmile se dostane voda do pórů, které jsou mezi zrny, dochází ke snížení působení hutnění. [37]

V Tab. 17 jsou uvedeny charakteristiky zkoušky, typy forem a jednotlivé rozměry zkušebního zařízení.

Tab. 17 – Přehled Proctorovy standardní zkoušky [59]

Zkouška	Charakteristiky zkoušky	Rozměry	Symbol	Proctorova forma		
				A	B	C
Proctor standard	Hmotnost pěchu	kg	m_R	2,5	2,5	15
	Průměr pěchu	mm	d_2	50	50	125,5
	Výška dopadu	mm	h_2	305	305	600
	Počet vrstev	-	-	3	3	3
	Počet úderů na vrstvu	-	-	25	56	22

Pro mou práci byla vybrána varianta **Proctor standard** s formou typu A, která je využívána pro typy zemin s maximálním zrnem 16 mm. Podle určení, jaký typ formy byl ke zkoušce použit, byly dány dle ČSN EN 13 286 – 2 [59] následující specifikace, které jsou uvedeny v Tab. 18.

Tab. 18 – Specifikace Proctorovy zkoušky dle ČSN EN 13286–2 [59]

Proctor Standard	Forma typu A
Vnitřní průměr formy [mm]	100
Výška formy [mm]	120
Hmotnost pěchu [kg]	2,5
Průměr pěchu [mm]	50
Výška dopadu [mm]	305
Počet vrstev [mm]	3
Počet úderů na vrstvu [mm]	25

5.4.2.2 LABORATORNÍ POSTUP

Celá zkouška se provádí v souladu s normou ČSN EN 13286–2. [59] Jako první proběhne příprava zkušební směsi. Naváží se 2 kg zeminy S3 S-F a k tomu se přidá 9 %

vody (z hmotnosti zeminy). Po smíchání zeminy se naplní zkušební tělesa. Sestavená forma ve tvaru válce, výšky 120 mm, průměru 100 mm a hmotnosti 3 733 g se naplní směsí ve třech vrstvách. Každá vrstva se jednotlivě zhutní pomocí pěchu a to 25 úderů. Po zhutnění poslední vrstvy se odebere nástavec, provede se zarovnání směsi, a nakonec se forma i se vzorkem zvaží. Tento postup se několikrát opakuje, a to až do doby, než se dosáhne maximální objemové hmotnosti $\rho_{d,max}$. Při každém zhutnění, se k zemině přidá určité procentuální množství vody.

Na Obr. 17 je zobrazen Proctorovo hutní zařízení, na kterém se provádí hutnění zeminy a vytváření všech vzorků.



Obr. 17 – Proctorovo hutní zařízení

5.4.3 STANOVENÍ PEVNOSTI V PROSTÉM TLAKU

Pevnost v prostém tlaku zatvrdlých směsí se stanoví dle normy ČSN EN 12390–3 [63]. Vytvořené vzorky ze směsí jsou zkoušeny po 7 dnech jejich zrání. Zkušební těleso se upevní do zkušební lisu a následně je zatěžováno silou až do doby, dokud nenastane jeho porušení. Z lisu se poté odečte maximální hodnota zatížení. Konečná pevnost, které je daný vzorek schopný odolávat se vypočítá dle vzorce (6):

$$f_c = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

f_c ... pevnost v prostém tlaku [MPa]

F ... maximální zatížení při porušení [N]

A ... zatěžovaná plocha vzorku [mm²]

Výsledná hodnota pevnosti se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa.

5.4.4 STANOVENÍ VLHKOSTI

Vlhkost je posledním parametrem, který byl stanoven na směsi v zatvrdlém stavu. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 17892-1 [64], ve které je uveden vzorec (7) podle něhož je vypočítána:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

w vlhkost [%]

m_w ... hmotnost vlhkého vzorku [g]

m_s ... hmotnost suchého vzorku [g]

Pokud hodnota $w \leq 1$ % je výsledek zaokrouhlován na 0,01 %, pokud $w \geq 1$ % výsledek je zaokrouhlován na 0,1 %.

5.5 ZHODNOCENÍ ETAPY I

Hlavním cílem této etapy bylo především navržení primárního řešení stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb. Aby bylo možné tento cíl splnit, tak dle metodiky byla etapa rozdělena na několik cílů dílčích. Jedním z nich byl výběr vhodné zeminy, potřebné k experimentální činnosti. Na základě získaných výsledků či parametrů daných zemin a teoretických poznatků byla po provedeném vyhodnocení nakonec vybrána zemina S3 S-F neboli písek s příměsí jemnozrné zeminy. Tento druh byl vybrán především i z důvodu, že se z daných typů zemin hojně objevuje v podloží železničního spodku, pro který byla prováděna experimentální činnost a splnil požadované parametry.

Další částí, která byla potřeba pro splnění hlavního cíle dané etapy, bylo navržení testování hmoty. Byly navrženy zkoušky pro 1. a 2. stupeň ověřování. Jednostupňové ověřování se týkalo spíše základních zkoušek. Přičemž u dvoustupňového testování jsou doplněny náročnější zkoušky, které slouží zejména k určení parametrů trvanlivosti. Z kapacitních důvodů zpracovávané bakalářské práce bylo ověřování zkráceno pouze na 1. stupeň a tyto základní zkoušky jsou stručně popsány.

Výsledkem této etapy byl tedy výběr vhodné zeminy a návrh jednostupňového ověřování, ze kterého se dále vycházelo v následujících etapách.

6 ETAPA II – MOŽNOSTI STABILIZACE PODKLADNÍCH VRSTEV DOPRAVNÍCH STAVEB DRUHOTNÝMI SUROVINAMI

Obsahem této části bude primárně charakterizace a výběr druhotných surovin pro substituci zemin. Jedná se zejména o nalezení vhodných surovin, které by byly schopny zlepšit vlastnosti zemin a následně provést jejich stabilizaci. Bude provedena optimalizace na popílkách, recyklátech a dalších průmyslových odpadech. Díky optimalizaci bude získán výběr druhotných surovin vhodných jako částečné nahrazení surovin primárních a vylepšení vlastností zemin.

6.1 VÝBĚR UŽŠÍHO SOUBORU DRUHOTNÝCH SUROVIN

V teoretické části v kapitole 3 je detailně popsáno velké množství druhotných surovin, které by eventuálně mohly být použity pro stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb. Díky těmto teoretickým poznatkům je možné stanovit užší soubor surovin, které by následně byly dále použity pro experimentální činnost v etapě IV. Právě za tímto účelem je proveden výběr druhotných surovin, což je i jedním z dílčích cílů etapy II, především tedy této kapitoly. Volba užšího souboru těchto surovin je realizována hned ze dvou důvodů. Jednak proto, že co se týče rozsahu zpracovávané bakalářské práce, není na zpracování tolik druhů surovin kapacita. A druhým důvodem je i dostupnost některých surovin.

Výběr užšího souboru druhotných surovin je založen na principu optimalizace, kterou je potřeba provést. Optimalizační výběr je složen především ze surovin, které jsou dostupné pro experimentální činnost. Na základě získaných reálných výsledků zkoušek některých odpadů, potencionálně vhodných pro optimalizační výběr směsí, bude realizována optimalizace. Z konkrétních výsledků, které mi byly poskytnuty z výzkumných zpráv THD byly stanoveny dva optimalizační výběry. První optimalizace byla vytvořena z hodnot vedlejších energetických produktů (dále jenom VEP) a druhá z hodnot recyklátů. Pro lepší orientaci a pochopení, jak optimalizace probíhala jsou zde uvedeny všechny tabulky s hodnotami, podle kterých vznikla výsledná tabulka, kde je uvedena preference na základě, které proběhl výběr toho nejvhodnějšího VEP a recyklátu.

Zde je uvedený souhrnný výčet VEP a recyklátů, pro které bude vytvořen optimalizační výpočet. Ten je detailněji rozepsán a uveden v následující kapitole v několika tabulkách (Tab. 19 až Tab. 26).

Vedlejší energetické produkty

- Vysokoteplotní popílek Mělník (EMĚ)
- Škvára Mělník
- Ložový popel Ledvice
- Fluidní popílek Ledvice
- Vysokoteplotní popílek Ledvice

Recykláty

- Cihelný recyklát
- Betonový recyklát
- Skelný recyklát
- Asfaltový recyklát
- Směsný recyklát

6.2 OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČET PRO VÝBĚR VEP

Pod následujícím textem se nachází celkový optimalizační výpočet, který je rozdělen do několika tabulek. V Tab. 19 jsou uvedeny vlastnosti či parametry VEP na základě kterých bude určena optimalizace. Tato tabulka představuje stanovení váhy jednotlivých vlastností. Vysvětlení podbarvení dílčích hodnot je popsáno pod Tab. 19. Dalším krokem (Tab. 20) je uvedení druhů VEP a konkrétních hodnot jejich vlastností. V Tab. 20 je potom stanoveno maximum a minimum, které je dále využíváno při výpočtech. Kromě toho je nutné si v další tabulce (Tab. 21) stanovit optimum dané vlastnosti, zda je požadováno, aby byla minimální nebo maximální a podle toho je následně zvolen vzorec, kterým jsou vypočítány hodnoty obsažené v Tab. 21. Posledním krokem je výpočet výsledné preference (Tab. 22) dle, které proběhne výsledné vyhodnocení, který z daných VEP bude nakonec vybrán pro experimentální činnost.

Tab. 19 – Stanovení váhy vlastnosti ku jiné vlastnosti pro VEP

Vlastnost	Cena	Obsah SiO ₂	Obsah CaO	Nasákavost	Zrnitost	Dostupnost surovin	S _i	R _i	F _i
Cena	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	3,00	9,00	1,44	0,21
Obsah SiO ₂	1,00	1,00	2,00	3,00	2,00	3,00	36,00	1,82	0,27
Obsah CaO	1,00	0,50	1,00	3,00	2,00	3,00	9,00	1,44	0,21
Nasákavost	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,11	0,69	0,10
Zrnitost	1,00	0,50	0,50	1,00	1,00	3,00	0,75	0,95	0,14
Dostupnost surovin	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,00	0,40	0,06
							Σ 54,87	Σ 6,75	Σ 1,00

Vysvětlivky pro Tab. 19:

	převrácené hodnoty zrcadlové hodnoty
	vždy 1 (př. váha ceny ku ceně)
	váha vlastnosti ku další vlastnosti (př. jak je důležitější vlastnost nasákavost ku ceně)

Tab. 20 – Hodnoty vybraných vlastností, doplnění maxima a minima pro VEP

Vlastnost	Vysokoteplotní popílek Mělník	Škvára Mělník	Ložový popel Ledvice	Fluidní popílek Ledvice	Vysokoteplotní popílek Ledvice	Max	Min
Cena	100	20	60	50	100	100	20
Obsah SiO ₂	53,71	49,23	42,3	42,7	47,7	53,71	42,3
Obsah CaO	1,4	3,01	10,2	10,1	1,2	10,2	1,2
Nasákavost	46	35	130	190	53	190	35
Zrnitost	1	3	1	1	1	3	1
Dostupnost surovin	3	3	1	2	3	3	1

Tab. 21 – Zvolení optima pro VEP

Vlastnost	Optimum	F _i	Vysokoteplotní popílek Mělník	Škvára Mělník	Ložový popel Ledvice	Fluidní popílek Ledvice	Vysokoteplotní popílek Ledvice
Cena	min	0,21	0,0000	1,0000	0,5000	0,6250	0,0000
Obsah SiO ₂	max	0,27	1,0000	0,6074	0,0000	0,0351	0,4733
Obsah CaO	max	0,21	0,0222	0,2011	1,0000	0,9889	0,0000
Nasákavost	min	0,10	0,9290	1,0000	0,3871	0,0000	0,8839
Zrnitost	min	0,14	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Dostupnost surovin	max	0,06	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	1,0000

Tab. 22 – Výsledná preference jednotlivých VEP

Vlastnost	Vysokoteplotní popílek Mělník	Škvára Mělník	Ložový popel Ledvice	Fluidní popílek Ledvice	Vysokoteplotní popílek Ledvice
Cena	0,00	21,37	10,69	13,36	0,00
Obsah SiO ₂	26,93	16,35	0,00	0,94	12,74
Obsah CaO	0,47	4,30	21,37	21,13	0,00
Nasákavost	9,55	10,27	3,98	0,00	9,08
Zrnitost	14,12	0,00	14,12	14,12	14,12
Dostupnost surovin	5,93	5,93	0,00	2,97	5,93
Preference [%]	57,00	58,23	50,16	52,53	41,88

Jak je možné vidět z poslední tabulky (Tab. 22), tak nejlepší preference podle optimalizačního výpočtu získala škvára a následně vysokoteplotní popílek z elektrárny Mělník. Těmito dvěma VEP bude provedena 20 % substituce zeminy v etapě IV.

6.3 OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČET PRO VÝBĚR STAVEBNÍCH RECYKLÁTŮ

I pro stavební recykláty byl vytvořen stejný optimalizační výpočet (viz Tab. 23 až Tab. 26). Jedině, kde nastává změna je hned v první tabulce (Tab. 23) kde jsou, jak už tomu bylo u VEP, uvedeny vlastnosti na základě, kterých je stanovena výsledná preference. Cena, nasákavost, zrnitost a dostupnost zůstává stejná jako u VEP, navíc je zde uveden faktor tvaru zrn a objemová hmotnost.

Tab. 23 – Stanovení váhy vlastnosti ku jiné vlastnosti pro stavební recykláty

Vlastnost	Cena	Nasákavost	Zrnitost	Faktor tvaru zrn	Dostupnost surovin	Objemová hmotnost	S_i	R_i	F_i
Cena	1,00	2,00	1,00	1,00	3,00	1,00	6,00	1,35	0,22
Nasákavost	0,50	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	3,00	1,20	0,19
Zrnitost	1,00	1,00	1,00	0,50	3,00	1,00	1,50	1,07	0,17
Faktor tvaru zrn	1,00	0,50	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,16
Dostupnost surovin	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,04	0,58	0,09
Objemová hmotnost	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,16
							Σ 12,54	Σ 6,20	Σ 1,00

Vysvětlivky k Tab. 23

	převrácené hodnoty zrcadlové hodnoty
	vždy 1 (př. váha ceny ku ceně)
	váha vlastnosti ku další vlastnosti (př. jak je důležitější vlastnost nasákavost ku ceně)

Tab. 24 – Hodnoty vybraných vlastností, doplnění maxima a minima pro stavební recykláty

Vlastnost	Cihelný recyklát 2	Betonový recyklát 2	Betonový recyklát 4	Skelný recyklát 2	Asfaltový recyklát 2	Směsný recyklát 2	Max	Min
Cena	20	100	100	30	70	40	100	20
Nasákavost	43,7	33,34	6,1	0,1	1,8	13,5	43,7	0,1
Zrnitost	2	1	1	3	1	1	3	1
Faktor tvaru zrn	1	1	1	2	1	1	2	1
Dostupnost surovin	1	3	3	1	3	2	3	1
Objemová hmotnost	1600	2100	2100	2560	1700	1900	2560	1600

Tab. 25 – Zvolení optima pro stavební recykláty

Vlastnost	Optimum	F_i	Cihelný recyklát 2	Betonový recyklát 2	Betonový recyklát 4	Skelný recyklát 2	Asfaltový recyklát 2	Směsný recyklát 2
Cena	min	0,22	1,0000	0,0000	0,0000	0,8750	0,3750	0,7500
Nasákavost	min	0,19	0,0000	0,2376	0,8624	1,0000	0,9610	0,6927
Zrnitost	min	0,17	0,5000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000
Faktor tvaru zrn	min	0,16	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000
Dostupnost surovin	max	0,09	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,5000
Objemová hmotnost	min	0,16	1,0000	0,4792	0,4792	0,0000	0,8958	0,6875

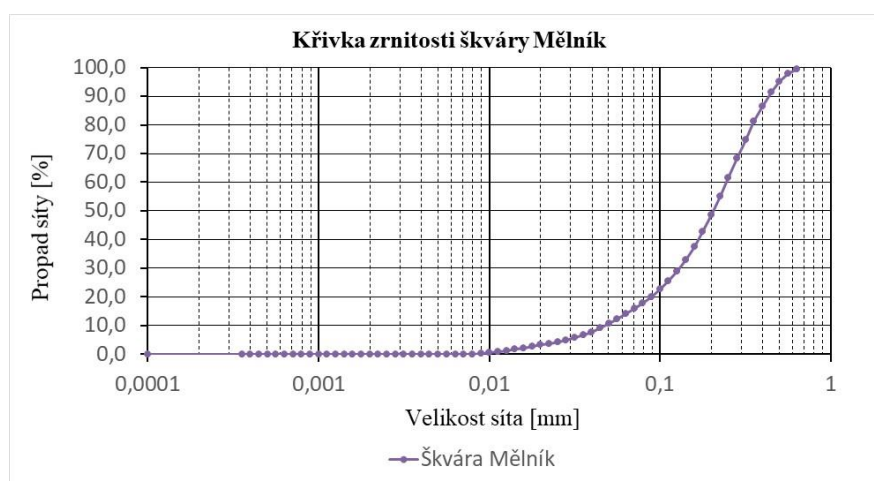
Tab. 26 – Výsledná preference jednotlivých stavebních recyklátů

Vlastnost	Cihelný recyklát 2	Betonový recyklát 2	Betonový recyklát 4	Skelný recyklát 2	Asfaltový recyklát 2	Směsný recyklát 2
Cena	21,76	0,00	0,00	19,04	8,16	16,32
Nasákavost	0,00	4,61	16,71	19,38	18,63	13,43
Zrnitost	8,63	17,27	17,27	0,00	17,27	17,27
Faktor tvaru zrn	16,14	16,14	16,14	0,00	16,14	16,14
Dostupnost surovin	0,00	9,32	9,32	0,00	9,32	4,66
Objemová hmotnost	16,14	7,73	7,73	0,00	14,46	11,10
Preference [%]	62,67	55,06	67,17	38,42	83,97	78,90

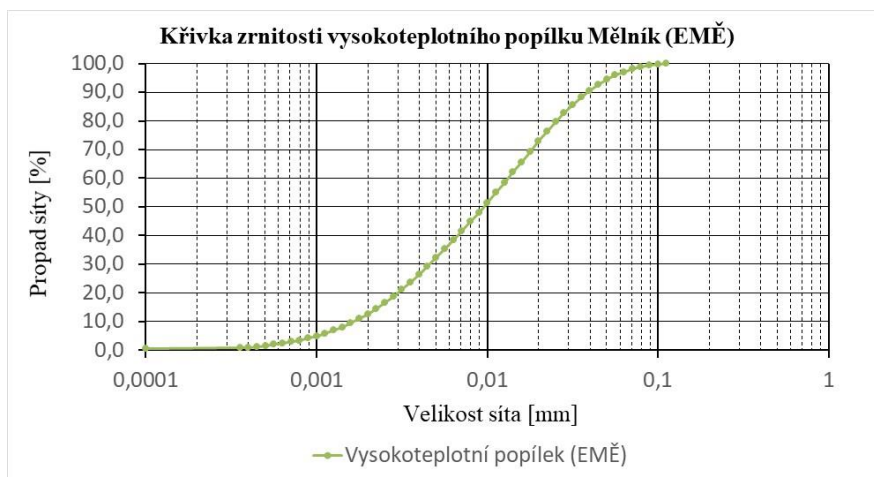
Dle poslední tabulky (Tab. 26) je viditelné, že nejlepším recyklátem z tohoto optimalizačního výpočtu vyšel právě asfaltový, kterým taktéž jako tomu bylo u VEP, bude 20 % substituována zemina.

6.4 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN

Předtím než tyto druhotné suroviny, které byly vybrány díky optimalizačnímu výpočtu, budou přímo použity do zeminy, jsou zde ke každému druhu jednotlivě popsány jeho parametry a krátká charakteristika. Z kategorie VEP byly vybrány dva zástupci, a to vysokoteplotní popílek a škvára. Oba jsou dodány z tepelné elektrárny Mělník společnosti ČEZ. Co se týče stavebních recyklátů byl určen jeden zástupce, kterým je asfaltový recyklát. Pro každou druhotnou surovinu byla stanovena křivka zrnitosti (Graf 2–4).



Graf 2 – Křivka zrnitosti škváry z elektrárny Mělník



Graf 3 – Křivka zrnitosti vysokoteplotního popílku z elektrárny Mělník (EMĚ)



Graf 4 – Křivka zrnitosti asfaltového recyklátu

Krom křivky zrnitosti, byla u asfaltového recyklátu zjišťována jeho vlhkost. Ta byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892–1 [64] na výslednou hodnotu **3 %**.

6.5 ZHODNOCENÍ ETAPY II

Prioritním úkolem byla optimalizace výběru druhotných surovin pomocí optimalizačních výpočtů. Nejprve byl stanoven výpočet pro VEP a poté pro stavební recykláty. Z výsledné preference vždy vyšla jedna surovina s nejvyššími hodnotami. U VEP bylo rozhodnuto, že budou vybrány dvě suroviny, jelikož jejich výsledné preference se od sebe velmi málo lišily a obě bylo možné považovat za vhodné pro použití stabilizace. Ze skupiny VEP byl vybrán vysokoteplotní popílek a škvára z elektrárny Mělník. U stavebních recyklátů byl zvolen pouze asfaltový recyklát. Závěr etapy byl zaměřen na parametry vstupních druhotných surovin z konkrétního odběru, z důvodu získání dostatečných informací pro hodnocení výsledků experimentů.

7 ETAPA III – EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH SMĚSÍ

Hlavním cílem této etapy je pomocí experimentálního ověření, které bylo navrženo v etapě I, stanovit optimální základní směs, která bude dále použita do etapy IV. První část bude zaměřena na primární a stabilizační složky, ze kterých budou navrženy, podle teoretických podkladů, receptury. Budou zde uvedeny konkrétní typy surovin, které byly pro zpracovávanou bakalářskou práci použity. Druhá část etapy se bude týkat experimentálního ověření těchto navržených receptur. Nejprve bude vyrobena směs a následně z ní budou vytvořeny tři zkušební vzorky. Hlavním účelem tohoto zkoušení je zjištění jednotlivých parametrů dané receptury. Jedná se především o objemovou hmotnost v čerstvém a zatvrdlém stavu, zhutnitelnost, pevnost v tlaku a vlhkost.

7.1 NÁVRH ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH SMĚSÍ PRO STABILIZACI PODKLADNÍCH VRSTEV

V předešlé etapě proběhl optimalizační výběr druhotných surovin a aby mohl v etapě IV vzniknout návrh receptur s těmito surovinami je důležité stanovit základní receptury. Z těch následně bude na základě výsledků z experimentálního ověření vybrána optimální receptura, která bude tvořit základ pro další receptury. Směsi, které budou zde navrženy jsou složeny z primární suroviny – zeminy a stabilizačních složek neboli pojiv (cement, vápno).

V Tab. 27 jsou zobrazeny celkem 4 receptury. Prvním typem je receptura sloužící k ověření vlivu vápna na vlastnosti upravované zeminy a je složena ze zeminy S3 S-F a 1,5 % vápna. Druhým typem jsou receptury, které slouží k ověření vlivu kombinace vápna a cementu na vlastnosti upravované zeminy. Nejprve tedy proběhlo ověření, jaký vliv má na zeminu 1,5 % vápna. Tato receptura svými hodnotami obstála proto dalším postupem k ní bylo přidáváno buď 4, 6 nebo 8 %. Z těchto posledních třech receptur nakonec byla jedna zvolena za optimální k použití na experimentální činnost do etapy IV.

Tab. 27 – Návrh základních receptur

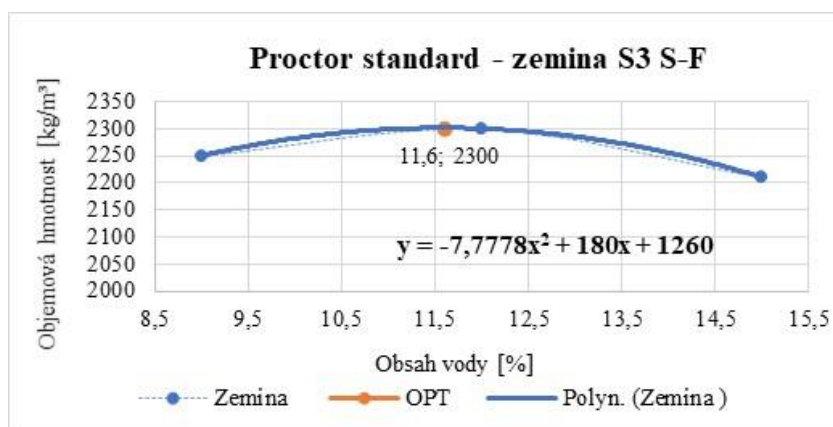
S3 S-F	1. Ověření vlivu vápna na vlastnosti upravované zeminy		
	1,5 % vápna		
	2. Ověření vlivu kombinace vápna a cementu na vlastnosti upravované zeminy		
	1,5 % vápna + 4 % cementu	1,5 % vápna + 6 % cementu	1,5 % vápna + 8 % cementu

7.1.1 PRIMÁRNÍ SUROVINA

Primární surovinou pro navržení jakékoliv směsi pro stabilizaci je rozhodně zemina. Z etapy I je známo, že byla vybrána S3 S-F. V následujících odstavcích je stanoveno několik parametrů této použité zeminy. Jedná se o určení vlhkosti zeminy a stanovení její zhutnitelnosti, čímž bude získána maximální objemová hmotnost a optimální vlhkost, která bude využita při dalším míchání vzorků.

Před provedením samotné zkoušky zhutnitelnosti byla potřeba zjistit přirozená vlhkost zkoušené zeminy, která je dána hmotnostním poměrem volné či pórové vody ze známé hmotnosti vzorku ku hmotnosti vysušené zeminy. Postup probíhal na základě normy ČSN EN ISO 17892-1 [64]. Ze získaných hodnot hmotností vlhké a suché zeminy bylo možné vypočítat její přirozenou vlhkost, která byla stanovena na **0,70 %**.

Po stanovení vlhkosti následuje zkouška zhutnitelnosti. Jak už bylo zmíněno, pro tuto práci bude využíváno konkrétně zkoušky Proctor standard jejíž postup je popsán v etapě I. K zjištění maximální objemové hmotnosti ρ_{dmax} a optimální vlhkosti w_{opt} je potřeba grafické vyjádření, které je zobrazeno v Grafu 5. Silně zvýrazněná modrá plná čára představuje polynomickou spojnicí trendu 2. stupně, na které se nachází právě hledané optimum (OPT). V Grafu 3 je uvedena i rovnice grafu, dle které jsou vypočítány hodnoty $w_{opt}(x)$ a $\rho_{dmax}(y)$. Oranžovou barvou je znázorněný bod, který říká, že výsledná hodnota optimální vlhkosti je **11,6 %** a objemové hmotnosti **2 300 kg/m³**.



Graf 5 – Proctor standard pro zeminu S3 S-F se znázorněním optima

7.1.2 VÁPNO

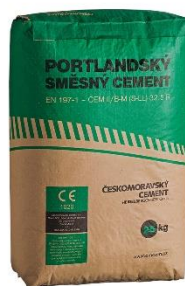
V rámci zpracovávané bakalářské práce byl pro použití stabilizace vybrán vápenný hydrát od společnosti Cemix (Obr. 19) v množství 1,5 %. Jelikož je vápno poměrně ekonomicky nákladné a z teoretických poznatků bylo zjištěno [33], že i malé množství vápna postačí ke zvýšení pevnosti, bylo rozhodnuto, že přidání 1,5 % vápna bude dostačující.



Obr. 18 – Vápenný hydrát od společnosti Cemix [65]

7.1.3 CEMENT

Druhým nejčastěji využívaným pojivem pro stabilizaci zemin je právě cement. Pro případ stabilizace podkladních vrstev byl použit portlandský směsný cement CEM II/B – LL 32,5 R (Obr. 20), dodaný společností Českomoravský cement, a.s. Tento typ byl zvolen, protože není v tomto procesu požadováno extra velkých pevností a také na základě ceny, která je přijatelná. Směsný cement stejně jako portlandský, je složen ze slínku. V tomto případě je určité procento slínku nahrazeno vápencem (LL). Volné vápno, které je v cementu obsaženo má přízniví účinek při procesu stabilizace.



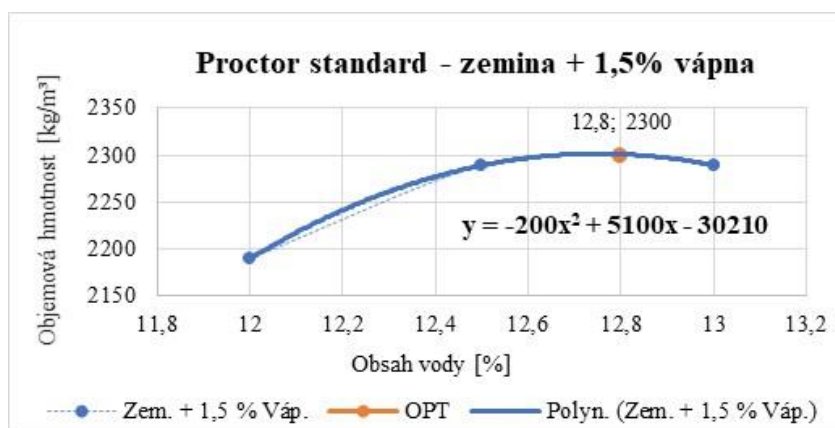
Obr. 19 – Portlandský směsný cement CEM II/B – LL 32,5 R [66]

7.1.4 OVĚŘOVÁNÍ VHODNOSTI SMĚSI

V čerstvém stavu byla stanovena objemová hmotnost vytvořených vzorků a dále jejich zhutnitelnost neboli zkouška Proctor standard, čímž byla zjištěna maximální

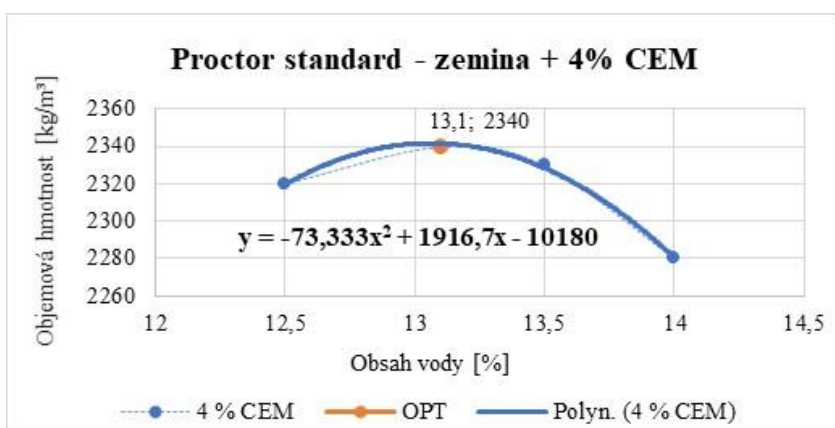
požadovaná objemová hmotnost a optimální vlhkost. Všechny výsledné hodnoty parametrů, jsou uvedeny v Tab. 28.

Vyhodnocení zkoušky Proctor standard je zobrazeno pro každou recepturu na následujících grafech (Graf 6–9). Na každém je pomocí oranžového bodu zobrazena poloha maximální objemové hmotnosti a optimální vlhkosti dané receptury s uvedenými hodnotami. Tento bod neboli optimum znázorňuje výsledek zkoušky.



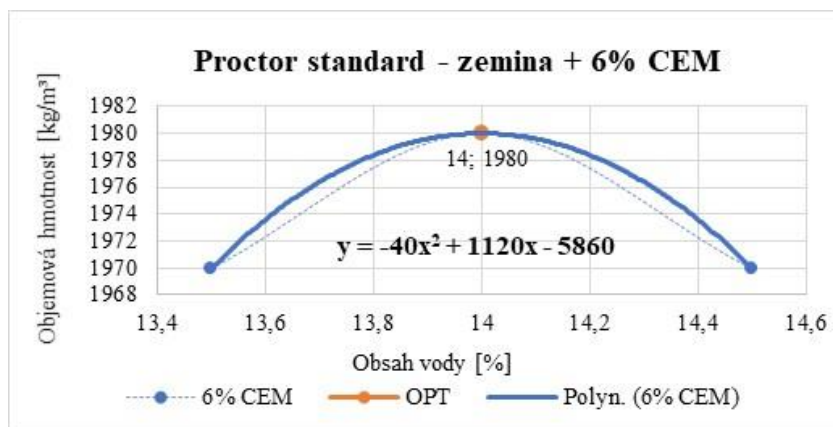
Graf 6 – Proctor standard pro 1,5 % vápna se znázorněním optima

Z Grafu 6 je stanovena maximální objemová hmotnost na 2 300 kg/m³ pro směs zemina + 1,5 % vápenného hydrátu. Optimální vlhkost této směsi je 12,8 %.



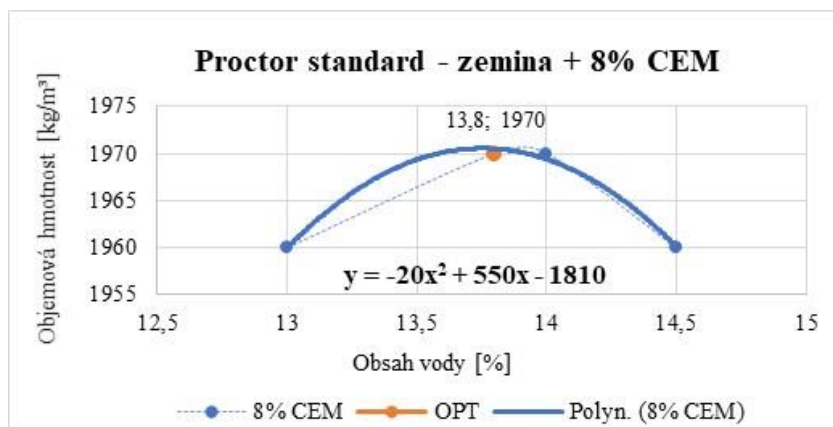
Graf 7 – Proctor standard pro 4 % CEM se znázorněním optima

Graf 7 stanovuje, že když je k základní směsi zemina+1,5 % vápenného hydrátu přidáno 4 % cementu, tak tato směs získá vyšší maximální objemovou hmotnost a to 2 340 kg/m³. Druhým parametrem, který stanovuje tato zkouška je optimální vlhkost, která je zde stanovena na 13,1 %. Stejně jako tomu je u objemové hmotnosti, tak i zde dochází ke vzrůstu oproti předešlé směsi.



Graf 8 – Proctor standard pro 6 % CEM se znázorněním optima

Dle Grafu 8 je možné určit, že s přibývajícím množstvím cementu roste pouze optimální vlhkost. Maximální objemová hmotnost zde klesla o necelých 25 %. U této směsi je optimum určeno na 1 980 kg/m³ a 14 %.



Graf 9 – Proctor standard pro 8 % CEM se znázorněním optima

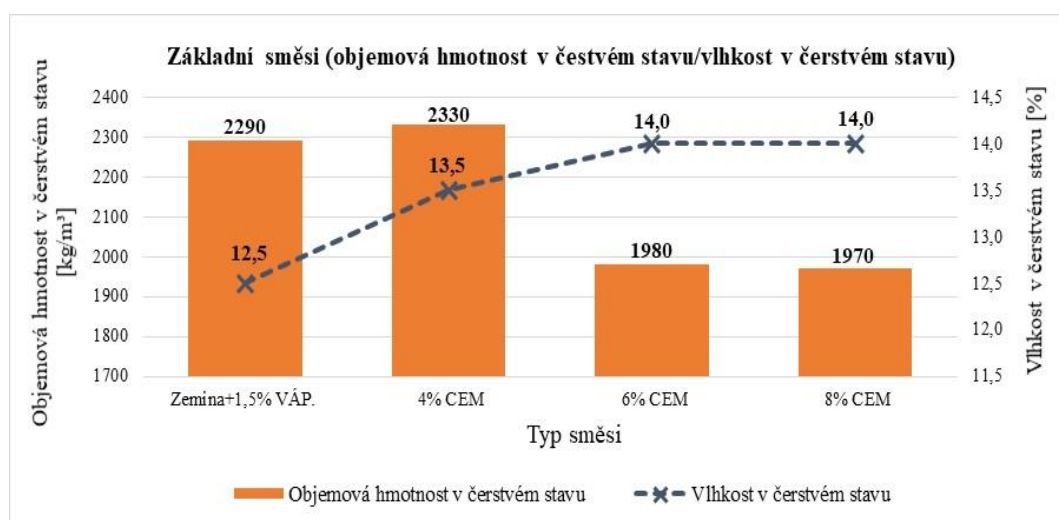
U této směsi s obsahem 8 % cementu došlo najednou ke snížení obou výsledných hodnot. Na Grafu 9 je pomocí oranžového bodu znázorněno optimum s hodnotami 1 970 kg/m³ a 13,8 %.

Dalším postup při ověřování základních směsí je stanovení objemových hmotností v čerstvém i zatvrdlém stavu, poté pevnosti a vlhkosti. Výsledné průměrné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 28. Následně jsou tyto parametry graficky znázorněny na Grafu 10 a Grafu 11. Oba dva jsou doplněny o stručné zhodnocení.

Tab. 28 – Průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a vlhkostí pro směsi zemina + 1,5 % VÁP. a 4, 6, 8 % CEM

Vzorek	Objemová hmotnost čerstvé směsi ρ_m [kg/m ³]	Vlhkost v čerstvém stavu [%]	Objemová hmotnost zatvrdlé směsi ρ_d [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Vlhkost w [%]
Zemina+1,5 % VÁP.	2290	12,5	1860	0,1	2,1
Zemina+1,5 % VÁP.+ 4 % CEM	2330	13,5	1960	0,5	3,1
Zemina+1,5 % VÁP.+ 6 % CEM	1980	14,0	1980	0,8	3,3
Zemina+1,5 % VÁP.+ 8 % CEM	1970	14,0	1990	1,2	3,5

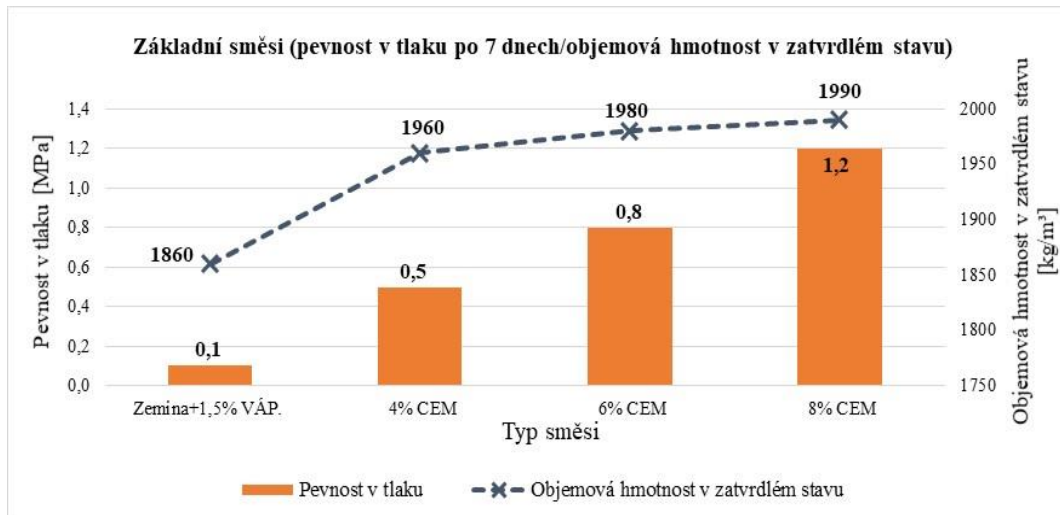
Směs s vápenným hydrátem vykazuje vlhkost 2,1 %, kdežto když jsou k ní přidány 4 % cementu najednou výsledná hodnota stoupne až o 1 %. Je tedy možné říci, že hodnota vlhkosti s přidáním další stabilizační složky roste. S přidavkem vyššího množství cementu sice vlhkost také stoupá, ale pouze v řádu desetin.



Graf 10 – Vliv dávky cementu na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost

Na Grafu 10 je znázorněný vliv dávky cementu na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost, kterou mají směsi při míchání. Jak je možné vidět, tak když se k první receptuře (zemina+1,5 % VÁP) přidá další stabilizační přísada (cement) v množství 4 %, vlhkost směsi stoupne o 1 % a i objemová hmotnost stoupne na hodnotu 2 330 kg/m³, čímž se přiblíží k maximální objemové hmotnosti stanovené Proctor standard. Co se týče

směsi s obsahem 6 % cementu, tak u té se podařilo dosáhnout stejných výsledků v čerstvém stavu jako u zkoušky Proctor standard. Maximální objemová hmotnost se stanovila na $1\,980\text{ kg/m}^3$ a optimální vlhkost na 14,0 %. U směsi, kde se přidá 8 % cementu, dojde k získání stejných výsledků pouze v objemových hmotnostech, které se shodují na hodnotě $1\,970\text{ kg/m}^3$.



Graf 11 – Vliv dávky cementu na pevnost v tlaku po 7 dnech zrání a objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu

Grafem 11 je znázorněn vliv dávky cementu na pevnost v tlaku po 7 dnech zrání a objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu. Při porovnání směsi obsahující pouze 1,5 % vápenného hydrátu se směsí, které navíc obsahují další stabilizační složku – cement, je patrné, že první směs dosáhla objemové hmotnosti $1\,860\text{ kg/m}^3$, kdežto směsi obsahující i cement získají objemovou hmotnost minimálně o 100 kg/m^3 vyšší. Co se týče pevností, tak i zde, s přibývajícím množstvím cementu hodnota roste. Směs s obsahem pouze 1,5 % vápenného hydrátu dosáhla hodnoty 0,1 MPa, se 4 % cementu 0,5 MPa, s 6 % 0,8 MPa a s 8 % dokonce 1,2 MPa. Podle předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3], ve kterém je stanoveno, že podloží musí mít minimální pevnost v tlaku 1,0 MPa, je možné směs s obsahem 8 % použít už po 7 dnech zrání.

7.2 ZHODNOCENÍ ETAPY III

V první fázi etapy byl realizován návrh čtyř základních receptur potencionálně vhodných pro stabilizaci železničního spodku. Následně byly popsány konkrétní suroviny, ze kterých byly vyrobeny pomocí Proctorova hutnicího zařízení zkušební vzorky. Základ tvořila zemina S3 S-F a jako pojivo byl použit vápenný hydrát a portlandský směsný cement CEM II/B – LL 32,5 R. Ve druhé fázi nastalo laboratorní zkoušení. Nejprve v čerstvém stavu a po 7 dnech zrání i v zatvrdlém stavu. Z předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3] bylo zjištěno, že je požadována pevnost v podloží železničního spodku minimálně 1,0 MPa. Jak je možné vidět z Tab. 28, tak směs tvořena zeminou, 1,5 % vápna a 8 % cementu tuto podmínku splnila už po 7 dnech zrání.

Z Tab. 10 bylo možné vyčíst, že maximální objemová hmotnost by se měla pohybovat v rozmezí 1700–2100 kg/m³ a optimální vlhkost by měla být okolo 8–16 %. Jak je z grafů (Graf 7 až Graf 9) patrné, tak tuto podmínku splnili pouze směsi s obsahem 6 a 8 % cementu. Předpokládá se, že po 28 dnech směs s 6 % cementu bezpečně překročí 1,0 MPa a tak pro úsporu cementu byla zvolena pro další činnost. Optimální směsí pro další fázi byla zvolena receptura tvořena ze zeminy, 1,5 % vápna a 6 % cementu.

8 ETAPA IV – EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI DRUHOTNÝCH SUROVIN

Poslední etapa bude zaměřena na experimentální ověření vhodnosti druhotných surovin. Základem pro tuto etapu je především návrh surovinových směsí, které budou dále podrobeny jednostupňovému ověřování jejich vhodnosti. Zkoušení a zjišťování jednotlivých parametrů bude stejné jako tomu bylo v předešlé etapě. Směsi budou zkoušeny jak v čerstvém stavu, tak v zatvrdlém. Opět budou stanoveny parametry, jako je objemová hmotnost, Proctor standard, vlhkost a pevnost v tlaku.

8.1 NÁVRH SUROVINOVÝCH SMĚSÍ PRO OVĚŘENÍ VHODNOSTI DRUHOTNÝCH SUROVIN

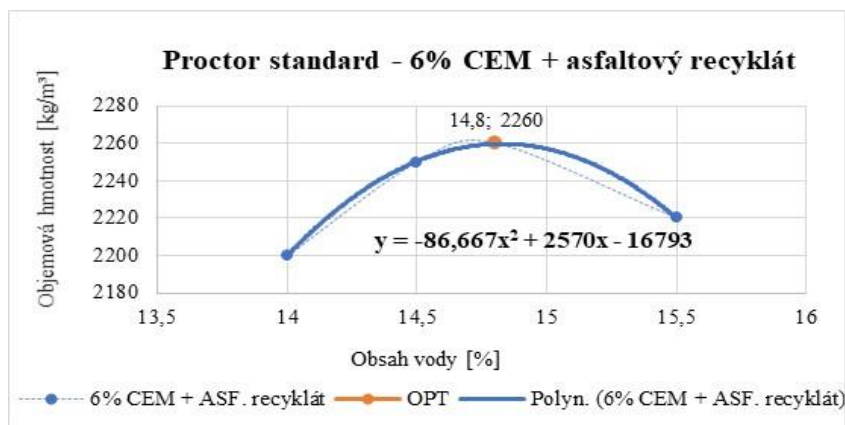
Z předešlé etapě byla za nejvíce vyhovující směs zvolena receptura složená ze zeminy, 1,5 % vápna a 6 % cementu. Ta bude tvořit základ pro následující návrh. V Tab. 29 jsou uvedeny navržené receptury s obsahem druhotných surovin, které budou podrobeny laboratornímu zkoušení, jako tomu bylo v etapě III.

Tab. 29 – Návrh surovinových směsí s využitím druhotných surovin

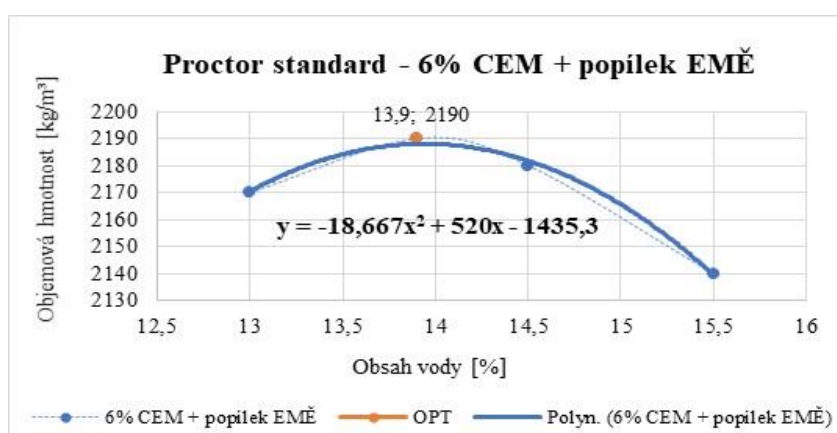
80 % S3 S-F	Ověření vlivu škváry na parametry testovaných zemin
	1,5 % vápna + 6 % cementu + 20 % škváry
	Ověření vlivu popílku na parametry testovaných zemin
	1,5 % vápna + 6 % cementu + 20 % popílku EMĚ
	Ověření vlivu asfaltového recyklátu na parametry testovaných zemin
	1,5 % vápna + 6 % cementu + 20 % asfaltového recyklátu

8.2 OVĚŘENÍ VHODNOSTI SMĚSÍ

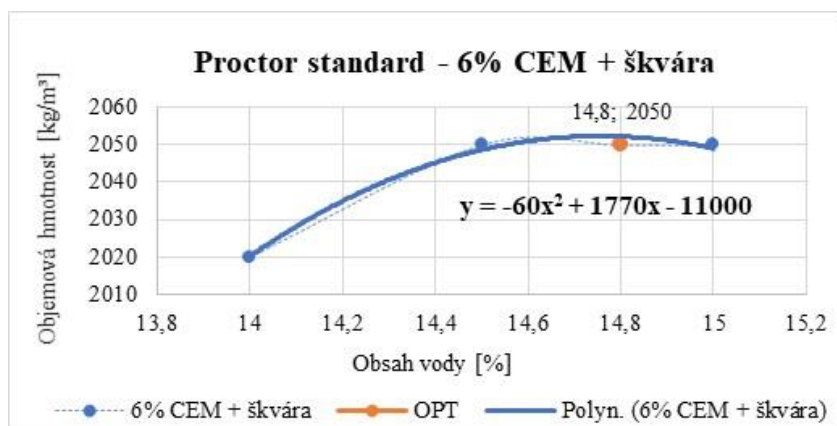
Postup je stejný jako při ověřování v etapě III. V první části probíhalo zkoušení v čerstvém a zatvrdlém stavu. V příslušných grafech (Graf 12 až Graf 14) je znázorněno grafické vyjádření zkoušky Proctor standard, kde jsou opět uvedeny oranžové body, které představují optimum (OPT) dané směsi. Vyhodnocování je doplněno souhrnnou tabulkou (Tab. 30) s hodnotami jednotlivých stanovených parametrů.



Graf 12 – Proctor standard pro 6 % CEM + ASF. recyklát se znázorněním optima



Graf 13 – Proctor standard pro 6 % CEM + popílek EMĚ se znázorněním optima



Graf 14 – Proctor standard pro 6 % CEM + škvára se znázorněním optima

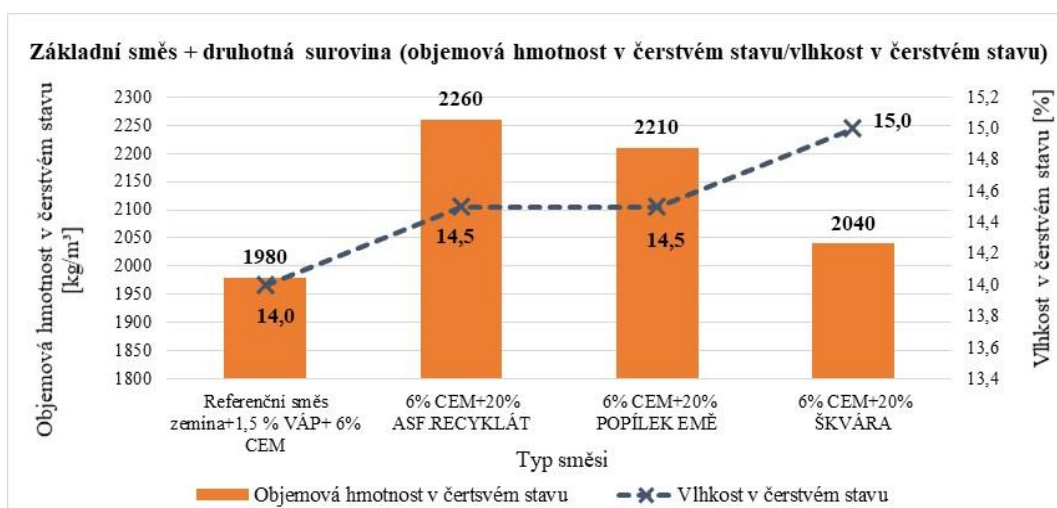
Nejvyšší maximální objemovou hmotnost $2\,260\text{ kg/m}^3$ dosáhla směs s obsahem asfaltového recyklátu s optimální vlhkostí 14,8 % jako receptura se škvárou. Pro směs s popílek EMĚ bylo stanoveno optimum na $2\,190\text{ kg/m}^3$ a 13,9 %.

Tab. 30 zobrazuje průměrné hodnoty jednotlivých parametrů pro danou směs, které jsou dále graficky vyhodnoceny (Graf 15 a Graf 16). Oba dva grafy obsahují i referenční směs (zemina+1,5 % vápenného hydrátu+6 % cementu), která byla zvolena v předešlé etapě za optimální. Je zde uvedena z důvodu, aby bylo zřetelné, jakým způsobem ovlivňují druhotné suroviny referenční směs.

Tab. 30 – Průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a vlhkosti 20 % ASF. recyklátu, popílku EMĚ a škváry

Vzorek	Objemová hmotnost čerstvé směsi ρ_m [kg/m ³]	Vlhkost při mísení [%]	Objemová hmotnost zatvrdlé směsi ρ_d [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Vlhkost w [%]
6% CEM+20% ASF.RECYKLÁT	2260	14,5	2010	0,7	4,5
6% CEM+20% POPÍLEK EMĚ	2210	14,5	2120	1,2	5,6
6% CEM+20% ŠKVÁRA	2040	15	1750	0,6	5,4

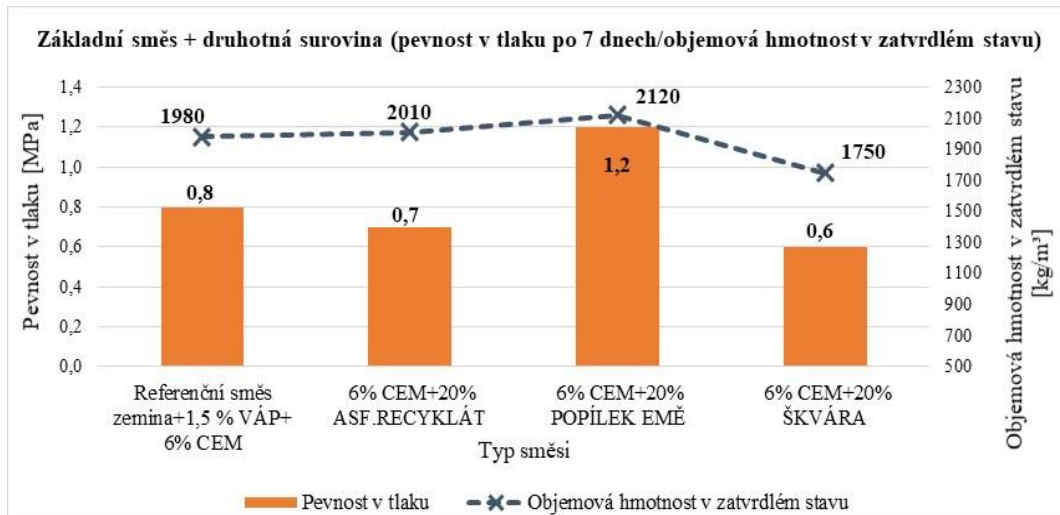
Co se týče vlhkosti, tak nejvyšší hodnotu získala směs s obsahem popílku EMĚ s hodnotou 5,6 %. Oproti referenční směsi, jejíž vlhkost byla stanovena na 3,3 %, jsou všechny zde uvedené výsledné hodnoty vyšší v řádech jednotek.



Graf 15 – Vliv druhotné suroviny na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost

Graf 15 znázorňuje vliv druhotné suroviny na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost směsí. Jak je zde možné vidět, tak nejvyšší objemovou hmotnost získala směs s obsahem asfaltového recyklátu, s hodnotou 2 260 kg/m³. Jedná se zároveň

i o maximální objemovou hmotnost, která byla stanovena zkouškou Proctor standard. Velmi podobné hodnoty, kterých bylo dosaženo v této zkoušce, získala i směs s obsahem škváry, s výsledky 2 040 kg/m³ a 15 % vlhkosti. Směsi s obsahem druhotných surovin, především s asfaltovým recyklátem a popílkem EMĚ, dosáhly mnohem vyšších objemových hmotností než referenční směs.



Graf 16 – Vliv druhotné suroviny na pevnost v tlaku po 7 dnech a objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu

Graf 16 představuje vliv druhotné suroviny na pevnost v tlaku po 7 dnech a objemovou hmotnost v zatvrdlém. V jednom případě nastalo zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku oproti referenční směsi. A to u směsi s obsahem popílku EMĚ, která dosáhla pevnosti až 1,2 MPa a jak už bylo zmíněno, dle předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3], by tato směs mohla být použita už po 7 dnech do podloží. Receptura s obsahem škváry dosáhla nejhorších výsledků, co se týče obou zmiňovaných parametrů. Jedná se o směs s pevností 0,6 MPa a objemovou hmotností 1750 kg/m³. Nejlepších výsledků dosáhla již uvedená receptura s popílkem EMĚ s pevností 1,2 MPa a objemovou hmotností 2 120 kg/m³.

8.3 ZHODNOCENÍ ETAPY IV

K základní surovinové směsi z etapy III byly přidávány jednotlivé druhotné suroviny, které nahradily 20% podíl zeminy. Laboratorním zkoušením byly stanoveny základní parametry, na základě, kterých byla vybrána optimální směs. Jak už bylo zmíněno, tak dle předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3] je požadováno, aby podloží mělo pevnost v prostém tlaku minimálně 1,0 MPa. Po 7denním zrání tuto podmínku splnila pouze směs s obsahem popílku EMĚ s hodnotou 1,2 MPa. Co se týče objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu, tak pro směs s obsahem popílku EMĚ byla stanovena na 2 120 kg/m³, což v porovnání s ostatními směsi se jednalo o nejvyšší hodnotu. Dle zkoušky Proctor standard a jejího grafického znázornění (Graf 11) byla zjištěna maximální objemová hmotnost $\rho_{dmax} = 2\ 190\ \text{kg/m}^3$ a optimální vlhkost $w_{opt} = 13,9\ \%$. Z těchto dvou hodnot je patrné, že i podmínky pro maximální objemovou hmotnost a optimální vlhkost, stanovující Tab. 10 obsažená v teoretické části, byly splněny. V čerstvém stavu tato směs získala objemovou hmotnost 2 210 kg/m³. Na základě těchto konkrétních výsledků byla vybrána směs tvořena **80 % zeminy, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 20 % popílku EMĚ** za optimální.

ZÁVĚR

Předmětem bakalářské práce bylo navrhnout možný způsob využití druhotných surovin při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb, především železnic. Celá práce byla součástí projektu FV40081 „Pokročilé technologie zřízení a obnovy konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku s efektivním využitím materiálů z druhotných surovin“.

V úvodu práce byl popsán současný stav poznání a provádění podkladních vrstev dopravních staveb. Poté byly zpracovány teoretické podklady pro zhodnocení vhodnosti zeminy pro podkladní vrstvy. V další části byla pozornost věnována stabilizaci a pojivům využívaných právě při tomto procesu. Byly zde uvedeny účinky pojiv na zeminu. Dle teoretických informací jsou nejpoužívanější vápno a cement. Na základě rešeršní činnosti byl sestaven široký soubor druhotných surovin pro využití při stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb. Jednalo se hlavně o stavební recykláty a VEP.

Na základě zjištěných teoretických podkladů byla vytvořena metodika praktické části bakalářské práce, která byla rozdělena do čtyř na sebe navazujících etap.

První etapa byla zaměřena na výběr vhodné zeminy a návrh primárního testování stabilizace podkladních vrstev dopravních staveb. V rámci řešení projektu s firmou INFRAM a. s. byly získány vzorky vhodných zemin pro experimentální činnost, konkrétně ze stavby D11 z lokality Jaroměř. Na základě zhodnocení získaných výsledků bylo rozhodnuto, že bude použit typ S3 S-F neboli písek s příměsí jemnozrnné zeminy. Jde o zeminu, která je podmíněčně vhodná k přímému použití bez úpravy. I přes to, že by nemusela být provedena žádná úprava, byla zvolena, a to hlavně z důvodu využitelnosti v praxi. Jedná se totiž o typ zeminy, který se velmi často objevuje v podloží tělesa železničního spodku.

Ve druhé etapě bylo cílem vybrat optimální druhotnou surovinu pomocí optimalizačního výpočtu. Celkem byly provedeny dva výpočty, a to pro VEP a stavební recykláty. Ze skupiny VEP získaly nejvyšší preference dva zástupci. Vysokoteplotní popílek s preferencí 57,00 % a škvára s 58,23 % z elektrárny Mělník. Z kategorie stavebních recyklátů byl vybrán asfaltový recyklát s 83,97 %. Vybrané suroviny získaly nejvyšší výsledné preference především na základě jejich nízké nasákavosti a dobré dostupnosti. Tyto suroviny byly dále využity v etapě IV k nahrazení 20% podílu zeminy.

Třetí etapa pojednávala o návržení základních surovinových směsí a jejich experimentálního ověřování. Cílem bylo vybrat optimální variantu pro etapu IV k ověření

vlivu druhotných surovin na parametry výsledné hmoty. Základní receptury byly složeny ze zeminy S3 S-F a ze stabilizačních složek. První receptura byla tvořena ze zeminy a 1,5 % vápenného hydrátu. Účelem této směsi bylo ověřit vliv pouze jedné z pojivových složek na vlastnosti zeminy. V dalších recepturách tvořila základ zemina, 1,5 % vápenného hydrátu a k tomu bylo přidáno 4 %, 6 % nebo 8 % portlandského směšného cementu CEM II/B – LL 32,5 R.

Surovinové směsi byly zkoušeny v čerstvém a zatvrdlém stavu po 7 dnech zrání v přirozeném prostředí. V předpisu SŽDC S4 – Železniční spodek [3] je uveden 1,0 MPa, jako požadavek na pevnost v tlaku pro podloží. Směs s 8 % příměsí tento požadavek splnila již po 7 dnech. 6 % příměs dosáhla 0,8 MPa a protože je předpoklad dosažení limitu 1,0 MPa po 28 dnech a z důvodu budoucí úspory pojiva, byla tato hodnota příměsi zvolena pro další etapu. Referenční směs pro další fázi byla složena ze zeminy, 1,5 % vápenného hydrátu a 6 % cementu.

Závěrečná etapa byla zaměřena na využití druhotných surovin. Metodika zkoušení byla shodná s metodikou předchozí etapy. Pro náhradu 20 % zeminy byl použit vysokoteplotní popílek a škvára z elektrárny Mělník a asfaltový recyklát. Při vyhodnocení pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání vykazovala nejvyšší hodnotu 1,2 MPa směs s popílkem EMĚ, která byla zároveň jedinou, která překročila hodnotu 0,8 MPa referenční směsi. Ostatní receptury měly nižší výsledky v řádech desetin. Této části bylo ověřeno, že druhotné suroviny mají potenciál a jsou schopny dosáhnout i vyšší užitné hodnoty stavebních hmot. Na základě vyhodnocení výsledků byla vybrána optimální směs, která byla složena z 80 % zeminy, 1,5 % vápenného hydrátu, 6 % cementu a 20 % popílku EMĚ.

Podle celkového zhodnocení a získaných poznatků, je možné konstatovat, že cíl bakalářské práce byl splněn, ale problematika využitelnosti druhotných surovin pro stabilizaci podkladních vrstev dopravních staveb je velmi rozšířená a nabízí další možnosti zkoumání. V rámci navazující diplomové práce by bylo vhodné se zabývat testováním dalších typů zemin včetně zemin odebraných přímo z kolejového spodku. Ověřit ostatní podíly různých druhů pojiv a druhotných surovin. Nakonec by bylo přínosné se ještě zaměřit na optimalizaci křivky zrnitosti zeminy druhotnou surovinou.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Zákon č. 183/2006 Sb. *Zákon o územním plánování a stavebním řádu* (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související předpisy.
- [2] PUCHRÍK, J. a D. JANOŠTÍK. *Konstrukce a dopravní stavby* [online]. Brno, 2005 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BO01-Konstrukce%20a%20dopravni%20stavby/Konstrukce%20a%20dopravni%20stavby%20%20M03-Dopravni%20stavby.pdf>.
- [3] *SŽDC S4 – Železniční spodek*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2008.
- [4] NEJEZCHLEB, M. *Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku modernizovaných tratí* [online]. In:2000 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195402/1007.pdf/2d21f7bf-ee4f-44d2-9c71-63c724a2cb8d>
- [5] KUMAR, J. Kiran a V. Praveen KUMAR. Soil stabilization using E-waste: A retrospective analysis. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2019 [cit. 2019-11-28]. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.145. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785319333887>
- [6] ŠVARCOVÁ, M. *Dvoufázový systém stabilizace podloží vozovek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=185659. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta stavební.
- [7] Když narazíte na pojem dopravní stavby. *České stavby* [online]. České Budějovice: Český internet, 2012 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/kdyz-narazite-na-pojem-dopravni-stavby-21632.html>
- [8] Zákon č. 266/1994 Sb. *Zákon o drahách*, 1994.
- [9] *Kapitola I. Dopravní a liniové stavby (ČÁST 1)* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://projekt150.havel.cz/node/60>
- [10] PLÁŠEK, O. *Úvod do železničních staveb*. Dostupné také z: https://www.fce.vutbr.cz/zel/plasek.o/studium/5_zeleznice_uvod.pdf
- [11] TP 76 – Technické podmínky 76. *Geotechnický průzkum pro pozemní komunikace, Část B – Provádění geotechnického průzkumu*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS – Geotechnika a.s., Praha, 2009.
- [12] ČSN 73 6133 *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*, 2010.

- [13] ČSN EN ISO 14689 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování, popis a klasifikace hornin*, 2019.
- [14] ČSN EN 1997-1 (731000) *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla*, 2006.
- [15] ČSN 72 1002 *Klasifikace zemin pro dopravní stavby*, 2010.
- [16] ČSN 72 1191 *Zkoušení míry namrzavosti zemin*, 2013.
- [17] ČSN 73 6114 *Vozovky pozemních komunikací. Základní ustanovení pro navrhování*, 1993.
- [18] ČSN 72 1016 *Laboratorní stanovení poměru únosnosti zemin (CBR)*, 2008.
- [19] TP 170 – Technické podmínky 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2004.
- [20] *Kamenivo* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>
- [21] KRAJČOVIČ, M. *Stavba pozemních komunikací. Dopravní a hydrotechnické stavby* [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/krajcovic/!kombinovane/!dopravni_a_hydrotechnicke_stavby/index.html
- [22] MACEKOVÁ, V. *Pozemní stavitelství II (S) - zakládání staveb, hydroizolace spodní stavby* [online]. Brno, 2006 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <http://media1.7x.cz/files/media1:50fef0831252b.pdf.upl/M02-Zakl%C3%A1d%C3%A1n%C3%AD%20staveb,%20hydroizolace%20spodn%C3%AD%20stavby.pdf>. Studijní opora. VUT Brno, Fakulta stavební.
- [23] PETRÁNEK, J. *Spraš. Geologická encyklopedie* [online]. Brno: Česká geologická služba, 2007 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>
- [24] VÁVRA, V. *Jíl. Multimediální atlas hornin* [online]. Brno: Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta MU, 2013 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <http://atlas.horniny.sci.muni.cz/sedimentarni/jil.html>
- [25] ČSN EN ISO 14688-1 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis*, 2019.
- [26] ČSN EN ISO 14688-2 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 2: Zásady pro zařídování*, 2019.
- [27] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [28] ČSN EN ISO 17892 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin*, 2005.

- [29] PETRÁNEK, J. Zrnitost. *Geologická encyklopedie* [online]. Brno: Česká geologická služba, 2007 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?zrnitost>
- [30] ČSN 72 1010 *Stanovení objemové hmotnosti zemin. Laboratorní a polní metody*, 1991.
- [31] TP 94 – Technické podmínky 94. *Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, ARCADIS Geotechnika a.s., Praha, 2013.
- [32] MICHALČÍKOVÁ, M. *Výzkum technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191068. Disertační práce. VUT Brno, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [33] BELL, F. G. *Ground engineer's reference book*. Butterworths, London, 1987. ISBN 978-0408011730.
- [34] *Kapitola I. Historie a současnost železničních staveb (ČÁST 4)* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/157>
- [35] KAUN, Miroslav a František LEHOVEC. *Pozemní komunikace 20*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02874-7.
- [36] KOCIÁNOVÁ, M., V. ČERNÝ a R. DROCHYTKA. *Technologie využití vykopaných zemin ve ztekucené formě s přidavkem popílků* [online]. In: 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/16212-technologie-vyuziti-vykopanych-zemin-ve-ztekucene-forme-s-pridavkem-popilku>
- [37] ŠEFRÁNKOVÁ, R. *Úprava zemin v podloží vozovek* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=155908. Bakalářská práce. VUT Brno, Fakulta stavební.
- [38] ČSN EN 14227-11 *Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 11: Zeminy upravené vápnem*.
- [39] MAKUSA, G., P. *Soil stabilization methods and materials: In engineering practice*. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering: Division of Mining and Geotechnical Engineering [online]. Sweden, 2012 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: http://pure.ltu.se/portal/files/42050076/soil_stabilization_methods_and_materials.pdf

- [40] LUCIAN, Ch. Effectiveness Of Mellowing Time On The Properties Of Two-Stage Lime-Cement Stabilized Expansive Soils. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* [online]. 2013, (2(5)), 623-634 [cit. 2020-04-19]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/effectiveness-of-mellowing-time-on-the-properties-of-two-stage-lime-cement-stabilized-expansive-soils-IJERTV2IS50469.pdf>
- [41] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Parlament České republiky, 2001.
- [42] NOVOTNÝ, B. *Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních látek*. Brno, 2001. Teze habilitační práce. VUT Brno.
- [43] Základní druhy recyklátů a možnosti jejich využití. *Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice* [online]. Brno: ARSM, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/recyklaty.php>
- [44] *Cihelný recyklát* [online]. Brno: Recyklace – Procházka s.r.o., 2012 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://cihlovyrecyklat.cz/cihelny_recyklat.html
- [45] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek. Hutněné asfaltové vrstvy*, 2008.
- [46] JUNGA, P. *Technika pro zpracování odpadů (3): Stavební a demoliční odpad* [online]. Brno: Mendelova univerzita, 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/210/17167.pdf
- [47] ŽĎÁRA, Z. *Recykláty do podkladních vrstev vozovek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=194959. Bakalářská práce. VUT Brno, Fakulta stavební.
- [48] *Recykláty* [online]. Recyklační středisko Brno, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.brnorecyklace.cz/externi-vyroba-recyklatu>
- [49] BASLÍKOVÁ, L. *Recyklace stavebního materiálu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-05-30]. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- [50] ROTTENBERG, M. *Certifikované vedlejší energetické produkty a jejich využití* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/103253/ROT032_HGF_N2102_2102T013_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB-TU
- [51] Vlček, Josef a Jiří Fiedor. *Průmyslové odpady: strusky z výroby železa a oceli*. Ostrava: ECOFER, 2015. Tech-link. ISBN 978-80-260-7775-6.
- [52] VÖRÖŠOVÁ, S. *Průmyslové využití vedlejších energetických produktů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30289189.pdf>. Bakalářská práce. VUT, Fakulta stavební.

- [53] Produkce popílků. *Odpady* [online]. Praha: Profi Press s. r. o, 2004 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/produkce-popilku/>
- [54] <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/10-2011-pdf.pdf>
- [55] TP 93 – Technické podmínky 93. *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS – Geotechnika a.s., Praha, 2011.
- [56] ROTOVÁ, P. *Využití stavebního recyklátu v dopravních stavbách*. Praha, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.
- [57] ČSN EN 12350–6 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*, 2009
- [58] GRMELA, J. *Posouzení stanovení zhutnitelnosti jemnozrnné zemin* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30289501.pdf>. Bakalářská práce. VUT Brno, Fakulta stavební.
- [59] 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.
- [60] ČSN EN 13286–3 *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 3: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Vibrační tlak s řízenými parametry*, 2004.
- [61] ČSN EN 13286–4 *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 3: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Vibrační pých*, 2004.
- [62] ČSN EN 12390–7 *Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu*, 2009.
- [63] ČSN EN 12390–3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, 2019.
- [64] ČSN ENE ISO 17892–1 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti*, 2015.
- [65] Bíle vápno (hašené) CL 90-S – vápenný hydrát. In: *Cemix* [online]. LB Cemix, 2019 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.cemix.cz/kotouc/cz/hydrat>
- [66] Portlandský směsný cement Českomoravský cement 32,5 R 25 kg. In: *Stavebniny DEK* [online]. Praha: DEK a.s, 2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.dek.cz/produkty/detail/4480000017-cem-ii-b-m-32-5r-s-ll-cement-pf-25kg-bal?gclid=EAIaIQobChMI5LUufje6QIVxbHtCh1qJAgJEAQYASABEGI9RvD_BwE&tab_id=popis

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

E...	Modul přetvárnosti
b...	Balvanitá složka
cb...	Kamenitá složka
g...	Štěrkovitá složka
s...	Písčitá složka
m...	Hlinitá složka
c...	Jílovitá složka
f...	Jemnozrnná frakce (do 0,063 mm)
F...	Jemnozrnná zemina
C...	Jíl
M...	Hlína
S...	Písek
G...	Štěrk
iBo...	Velký balvan
Bo...	Balvan
Co...	Valoun
Cr...	Štěrk
cGr...	Hrubozrnný štěrk
mGr...	Střednězrnný štěrk
fGr...	Jemnozrnný štěrk
Sa...	Písek
cSa...	Hrubozrnný písek
mSa...	Střednězrnný písek
fSa...	Jemnozrnný písek
Si...	Prach
cSi...	Hrubozrnný prach
mSi...	Střednězrnný prach
fSi...	Jemnozrnný prach
Cl...	Jíl
w _L ...	Mez tekutosti
w _p ...	Mez plasticity
I _p ...	Index plasticity
L...	Plasticita nízká
I...	Plasticita střední
H...	Plasticita vysoká
V...	Plasticita velmi vysoká
E...	Plasticita extrémně vysoká
ρ...	Objemová hmotnost
m...	Hmotnost zeminy
V...	Objem zeminy
I _c ...	Konzistenční index
CaCO ₃ ...	Uhličitan vápenatý
ρ _{dmax} .PS ...	Maximální objemová hmotnost Proctor standard

w_n ...	Přirozená vlhkost
IBI...	Immediate bearing index (okamžitý index účinnosti)
CBR...	California bearing-ratio (kalifornský poměr únosnosti – saturační)
CaO...	Oxid vápenatý
Ca(OH) ₂ ...	Hydroxid vápenatý
CO ₂ ...	Oxid uhličitý
H ₂ O...	Voda
Ca ²⁺ ...	Kationt vápenatý
Na ⁺ ...	Kationt sodný
K ⁺ ...	Kationt draselný
SiO ₂ ...	Oxid křemičitý
Al ₂ O ₃ ...	Oxid hlinitý
OH ⁻ ...	Hydroxylový iont
C ₃ A ...	Trikalcium aluminát
C ₄ AF...	Brownmillerit
C ₂ S...	Belit
C ₃ S...	Alit
OKH...	Obalované kamenivo hrubé
VEP...	Vedlejší energetický produkt
FeO...	Oxid železitý
SO ₃ ...	Oxid sírový
Fe ₂ O ₃ ...	Oxid železitý
Na ₂ O...	Oxid sodný
K ₂ O...	Oxid draselný
FPP...	Fluidní popel a popílek
PP ...	Popílek a popel nestabilizovaný
PSt...	Stabilizovaný popílek
MgO ...	Oxid manganatý
AdMaS...	Výzkumné centrum Advanced Materials, Structures and Technologies
THD...	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
S3 S-F...	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy
F6 Cl...	Jíl se střední plasticitou
D...	Objemová hmotnost v čerstvém stavu [kg/m ³]
m ₁ ...	Hmotnost prázdné formy [g]
m ₂ ...	Hmotnost naplněné formy [g]
V...	Objem formy [m ³]
w _{opt} ...	Optimální vlhkost
f _c ...	Pevnost v tlaku [MPa]
F...	Maximální zatížení při porušení vzorku [N]
A...	Zatěžovací plocha [mm ²]
w...	Vlhkost [%]
m _w ...	Hmotnost vlhkého vzorku [g]
m _s ...	Hmotnost suchého vzorku [g]

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Dovolené tloušťky promrznutí zemin zemní pláně [10].....	14
Tab. 2 – Složky zemin podle velikosti částic [12].....	21
Tab. 3 – Základní členění zemin podle zrnitosti [12].....	21
Tab. 4 – Podrobnější klasifikace zemin podle zrnitosti [25].....	22
Tab. 5 – Rozlišení plasticity zemin podle velikosti meze tekutosti [12].....	23
Tab. 6 – Rozlišení konzistence zeminy [12].....	24
Tab. 7 – Propustnost zemin podle filtračního součinitele [28].....	29
Tab. 8 – Rozdělení zemin z hlediska jejich vhodnosti použití [12].....	30
Tab. 9 – Orientační hodnoty geotechnický vlastností a vhodnost zemin do zemního tělesa [3].....	31
Tab. 10 – Orientační hodnoty geotechnický vlastností a vhodnost zemin do zemního tělesa (pokračování) [3].....	32
Tab. 11 – Vhodnost použití pojiva dle druhu zeminy [34].....	34
Tab. 12 – Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1% příměsi pojiva [31].....	36
Tab. 13 – Druhy stabilizací a jejich označení [3].....	36
Tab. 14 – Vliv oxidů na vlastnosti popílků [51].....	49
Tab. 15 – Procentuální propady jednotlivými oky.....	59
Tab. 16 – Základní technické vlastnosti jednotlivých druhů zemin.....	60
Tab. 17 – Přehled Proctorovy standardní zkoušky [59].....	64
Tab. 18 – Specifikace Proctorovy zkoušky dle ČSN EN 13286–2 [59].....	64
Tab. 19 – Stanovení váhy vlastnosti ku jiné vlastnosti pro VEP.....	69
Tab. 20 – Hodnoty vybraných vlastností, doplnění maxima a minima pro VEP.....	69
Tab. 21 – Zvolení optima pro VEP.....	69
Tab. 22 – Výsledná preference jednotlivých VEP.....	69
Tab. 23 – Stanovení váhy vlastnosti ku jiné vlastnosti pro stavební recykláty.....	70
Tab. 24 – Hodnoty vybraných vlastností, doplnění maxima a minima pro stavební recykláty.....	70
Tab. 25 – Zvolení optima pro stavební recykláty.....	70
Tab. 26 – Výsledná preference jednotlivých stavebních recyklátů.....	71
Tab. 27 – Návrh základních receptur.....	73
Tab. 28 – Průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a vlhkostí pro směsi zemina + 1,5 % VÁP. a 4, 6, 8 % CEM.....	78
Tab. 29 – Návrh surovinových směsí s využitím druhotných surovin.....	81
Tab. 30 – Průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a vlhkosti 20 % ASF. recyklátu, popílku EMĚ a škváry.....	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Hlavní části železničního tělesa [10]	13
Obr. 2 – Diagram plasticity pro částice menší než 0,5 mm [12]	23
Obr. 3 – Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm [14]	24
Obr. 4 – Stejnozrnná a nestejnozrnná zemina [27]	25
Obr. 5 – Konzistence zeminy [27]	27
Obr. 6 – Závislost hutnění [27]	27
Obr. 7 – Kritérium namrzavosti podle zrnitosti zeminy [12]	28
Obr. 8 – Mechanická úprava zeminy [36]	35
Obr. 9 – Stabilizace zeminy [36]	35
Obr. 10 – Proces flokulace – neupravená zemina [6]	39
Obr. 11 – Proces flokulace – zemina upravená vápnem [6]	40
Obr. 12 – Příklad stavu zeminy smíchané s cementem a) před hydratací, b) po několika týdnech zrání [32]	42
Obr. 13 – Cihelný recyklát [44]	46
Obr. 14 – Betonový recyklát různých frakcí [48]	47
Obr. 15 – Asfaltový recyklát různých frakcí [48]	47
Obr. 16 – Nezhutněná a zhutněná zemina [58]	63
Obr. 17 – Proctorovo hutnicí zařízení	65
Obr. 18 – Vápenný hydrát od společnosti Cemix [65]	75
Obr. 19 – Portlandský směsný cement CEM II/B – LL 32,5 R [66]	75

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Křivka zrnitosti pro oblast D11 Jaroměř	59
Graf 2 – Křivka zrnitosti škváry z elektrárny Mělník	71
Graf 3 – Křivka zrnitosti vysokoteplotního popílku z elektrárny Mělník (EMĚ)	72
Graf 4 – Křivka zrnitosti asfaltového recyklátu	72
Graf 5 – Proctor standard pro zeminu S3 S-F se znázorněním optima	74
Graf 6 – Proctor standard pro 1,5 % vápna se znázorněním optima	76
Graf 7 – Proctor standard pro 4 % CEM se znázorněním optima	76
Graf 8 – Proctor standard pro 6 % CEM se znázorněním optima	77
Graf 9 – Proctor standard pro 8 % CEM se znázorněním optima	77
Graf 10 – Vliv dávky cementu na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost	78
Graf 11 – Vliv dávky cementu na pevnost v tlaku po 7 dnech zrání a objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu	79
Graf 12 – Proctor standard pro 6 % CEM + ASF. recyklát se znázorněním optima	82
Graf 13 – Proctor standard pro 6 % CEM + popílek EMĚ se znázorněním optima	82
Graf 14 – Proctor standard pro 6 % CEM + škvára se znázorněním optima	82
Graf 15 – Vliv druhotné suroviny na objemovou hmotnost v čerstvém stavu a vlhkost	83
Graf 16 – Vliv druhotné suroviny na pevnost v tlaku po 7 dnech a objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu	84