



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra železničních staveb

Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží

Improved and stabilised soils in railway substructure

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jan Ludvík

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

Praha, 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Ludvík	Jméno: Jan	Osobní číslo: 458969
Zadávací katedra: Katedra železničních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží	
Název bakalářské práce anglicky: Improved and stabilized soils in railway substructure	
Pokyny pro vypracování: Proveďte analýzu současného stavu poznání v oblasti zlepšování a stabilizace zemín v železničním stavitelství. Reálnou zeminu použijte pro zpracování návrhu jedné směsi do parametrů zlepšené zeminy/stabilizace. Proveďte vybrané laboratorní zkoušky např. se zaměřením na CBR, pevnost v tlaku, odolnost proti mrazu, bobtnání. Pro jednotlivé zkoušky použijte minimálně 3 vzorky. Výsledky zhodnoťte.	
Seznam doporučené literatury: EN 16907-4 – Zemní práce – Část 4: Úprava zemín vápnem a/nebo hydraulickými pojivy ČSN EN 14227-1 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem (eventuálně ostatní normy z této řady) ČSN EN 14227-15 - Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 15: Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy ČSN EN 13286-41 - Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy ČSN 72 1191 - Zkoušení míry namrzavosti zemín Předpis SŽDC S4 - Železniční podek	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Leoš Horníček, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 11.2.2019	Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

PODROBNÉ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jan Ludvík

Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží

I. Zadání

Proveďte analýzu současného stavu poznání v oblasti zlepšování a stabilizace zemin v železničním stavitelství s využitím stávajících norem a předpisů pro oblast železničního, případně též silničního stavitelství. Proveďte odběr zeminy ve vybrané lokalitě v žst. Lysá nad Labem. Použijte tuto zeminu pro zpracování návrhu alespoň jedné směsi do parametrů zlepšené zeminy/stabilizace s preferencí mechanické úpravy. Na odebrané zemině a upravené směsi proveďte vybrané laboratorní zkoušky, např. se zaměřením na zrnitost, CBR, pevnost v tlaku, odolnost proti mrazu, bobtnání. Pro jednotlivé zkoušky použijte minimálně 3 vzorky. Výsledky zhodnoťte.

II. Vypracování

1. Analýza současného stavu poznání v oblasti zlepšování a stabilizace zemin v železničním stavitelství
2. Odběr zeminy, včetně fotodokumentace
3. Návrh směsi do parametrů zlepšené zeminy/stabilizace
4. Provedení laboratorních zkoušek, včetně fotodokumentace
5. Zhodnocení výsledků laboratorních zkoušek
6. Doporučení vhodné úpravy odebraného druhu zeminy pro použití v aktivní zóně pražcového podloží

Upozornění: Podle zákona č. 266/1994 Sb., o drahách, nejsou veřejně přístupná všechna místa na dráze mimo prostor určený veřejnosti!

Ing. Leoš Horníček, Ph.D.
ČVUT, Fakulta stavební, Katedra železničních staveb

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. 5. 2019

.....
Jan Ludvík

Poděkování

Děkuji Ing. Leoši Horníčkoví, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce. Katedře silničních staveb děkuji za poskytnutí laboratoře k provedení zkoušek a Ing. Janu Sudovi, Ph.D. za praktické rady při provádění zkoušek. Dále bych rád bych poděkoval Ing. Petru Břešťovskému, Ph.D. ze Správy železniční dopravní cesty, s.o. za poskytnutí zeminy v ŽST Lysá nad Labem a kamenolomu společnosti Skanska a.s. v Klecanech za kamenivo.

**ZLEPŠENÉ A STABILIZOVANÉ ZEMINY
V PRAŽCOVÉM PODLOŽÍ**

IMPROVED AND STABILIZED SOILS IN
RAILWAY SUBSTRUCTURE

Anotace

Bakalářská práce se zabývá úpravou zemin v pražcovém podloží. První část práce popisuje zlepšení a stabilizaci zemin. Zabývá se návrhem, zkouškami, technologiemi a používanými materiály. S úpravou zemin souvisí téma železničního spodku a vzniku zemin. Praktická část se zaměří na odběr zeminy v ŽST Lysá nad Labem a její úpravu. Zkoušky zahrnují zatřídění odebrané zeminy, návrh variant pro úpravu a výběr vhodné směsi. Vybraná směs je podrobena zkouškám dle zadání bakalářské práce.

Klíčová slova:

Zlepšení, stabilizace, úprava zemin, pražcové podloží, zemní pláň, únosnost, kamenivo, Lysá nad Labem, Proctor Standard, Kalifornský poměr únosnosti, okamžitý index únosnosti

Summary

The bachelor thesis deals with soil treatment of a railway substructure. The first part of the thesis describes soil improvement and stabilization. It deals with design, laboratory tests, technology and used materials. The soil treatment relates to the theme of railway substructure and soil formation. The practical part focuses on soil removal in Lysa nad Labem railway station and its treatment. Tests include identification of removed soil, design of treatment options and selection of appropriate mixture. The selected mixture is subjected to tests according to the the bachelor thesis assignment.

Key words:

Soil improvement, stabilization, treatment, track bed, subsoil, bearing capacity, aggregates, Lysa nad Labem, Proctor Standard, California bearing ratio, Immediate bearing index

OBSAH

1. ÚVOD.....	7
2. ŽELEZNIČNÍ SPODEK	8
2.1. PRAŽCOVÉ PODLOŽÍ	9
2.2. ZEMINY	12
2.2.1. Pevná fáze	12
2.2.2. Kapalná fáze	13
2.2.3. Klasifikace zemin	14
3. ZLEPŠENÉ A STABILIZOVANÉ ZEMINY	17
3.1. ZLEPŠENÉ ZEMINY	18
3.1.1. Návrh	18
3.1.2. Technologie	19
3.2. STABILIZOVANÉ ZEMINY	22
3.2.1. Návrh	22
3.2.2. Technologie	22
3.3. MATERIÁLY	24
3.3.1. Cement	24
3.3.2. Vápno.....	24
3.3.3. Struska.....	25
3.3.4. Popílek.....	25
3.3.5. Zemina.....	26
4. PRAKTICKÁ ČÁST	27
4.1. ODEBRANÁ ZEMINA.....	28
4.2. UPRAVENÁ ZEMINA	30
4.3. ZKOUŠKY	33
4.4. VLHKOST	34
4.5. ZRNITOST	35
4.5.1. Odebraná zemina	35
4.5.2. Směs 0/8.....	40
4.6. KONZISTENCE	41
4.7. PROCTOR STANDARD	44
4.7.1. Odebraná zemina	45
4.7.2. Směs 0,125/4.....	48
4.7.3. Směs 0/8.....	49

4.7.4.	Porovnání	50
4.8.	POMĚR ÚNOSNOSTI CBR A IBI.....	51
4.8.1.	Odebraná zemina	51
4.8.2.	Směs 0,125/4.....	54
4.8.3.	Směs 0/8.....	55
4.8.4.	Porovnání	57
4.9.	LINEÁRNÍ BOBTNÁNÍ.....	60
4.9.1.	Odebraná zemina	60
4.9.2.	Směs 0/8.....	60
4.10.	PEVNOST V TLAKU.....	62
4.11.	ODOLNOST PROTI MRAZU.....	64
4.11.1.	Odebraná zemina	64
4.11.2.	Směs 0/8	64
4.12.	NAMRZAVOST.....	67
5.	ZÁVĚR.....	68
6.	LITERATURA	69
7.	SEZNAM GRAFŮ	71
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
9.	SEZNAM TABULEK	74
	SEZNAM PŘÍLOH	75

SEZNAM ZKRATEK

CBR	Kalifornský poměr únosnosti (California bearing ratio)
CEN	Evropský výbor pro normalizaci
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
IBI	okamžitý index únosnosti (Immediate bearing index)
ISO	mezinárodní norma
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, s.o.
ŽS	železniční spodek
ŽST	železniční stanice

1. ÚVOD

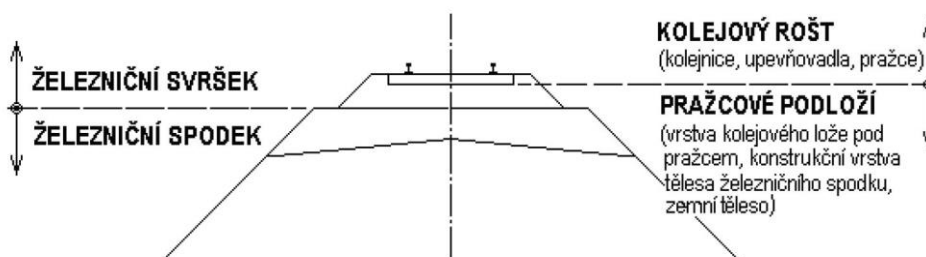
Historie výstavby železničních tratí v České republice sahá do 19. století. S délkou necelých 10 000 km tratí souvisí vysoká hustota železniční sítě a potřebná rekonstrukce, nebo modernizace. Zvýšení traťové rychlosti a dopravního zatížení vede k vyšším nárokům na únosnost zemní pláně. V mnohých případech zemina nevyhovuje a je nutné přistoupit k její úpravě, nebo náhradě. Úprava může být provedena zlepšením, nebo stabilizací.

V rámci své bakalářské práce se v první kapitole zabývám konstrukcí železničního spodku, pražcovým podložím a vznikem zeminy. Navazující kapitola popisuje metody úprav zemin, jejich návrh, technologie a materiály.

Praktická část je zaměřena na návrh úpravy zeminy v ŽST Lysá nad Labem. Současná podoba stanice a přilehlých úseků již nevyhovuje současným požadavkům. Pro Správu železniční dopravní cesty, s.o. byla vypracována projektová dokumentace rekonstrukce s navrženou úpravou pražcového podloží. Předmětem mých laboratorních zkoušek je návrh mechanické úpravy zeminy. Praktická část se skládá z odběru materiálu a ze zkoušek. Odebrali jsme původní zeminu a kamenivo pro úpravu. Zkoušky se zaměří na původní zeminu, výběr vhodné směsi a stanovení požadovaných zkoušek dle zadání bakalářské práce na vybrané směsi.

2. ŽELEZNIČNÍ SPODEK

Konstrukce železniční tratě znázorněné na Obr. 1 se dělí na železniční svršek a spodek. Do železničního svršku patří kolejnice, upevnění, pražce a kolejové lože. Železniční spodek zahrnuje těleso železničního spodku, stavby ŽS, dopravní komunikace a drobné stavby ŽS. Předmětem této bakalářské práce bude těleso železničního spodku, které tvoří zemní těleso, konstrukční vrstvy a odvodnění. [1]



Obr. 1 Konstrukce železničního tělesa [1]

Kromě základního rozdělení lze kolejnice s pražci a upevňovadly, které spolu dohromady tvoří rám, považovat za kolejový rošt a konstrukci zajišťující geometrickou polohu koleje za pražcové podloží.

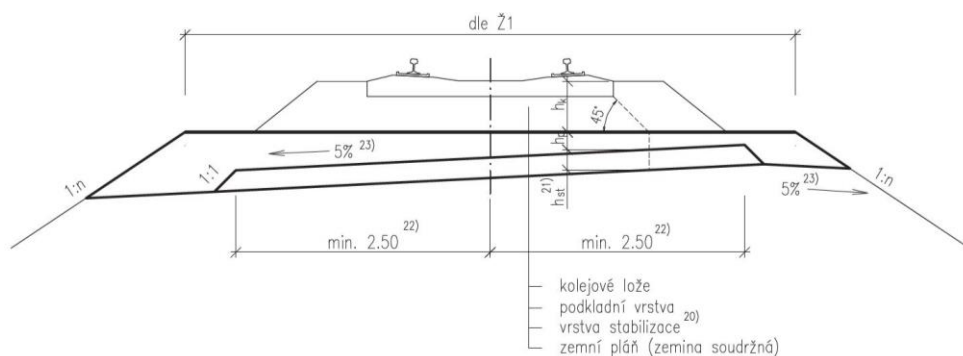
Zemní těleso může být tvořeno zeminami soudržnými i nesoudržnými nebo horninami. U soudržných zemin musí být zemní pláň vždy skloněná, v případě propustné, nenamrzavé a nesoudržné zeminy může být vodorovná. Svrchní plocha se nazývá zemní pláň. Pro srovnání základová spára v pozemním stavitelství odpovídá zemní pláni v dopravních stavbách. [1]

Na zemní pláň navazují konstrukční vrstvy, které tvoří například štěrkokodř, vysokopeční struska, recyklát aj. Konstrukční vrstva může být pouze jedna, nebo tvořit vrstevnatý systém. Nedílnou součástí pražcového podloží jsou geosyntetika, která mohou zvyšovat únosnost nebo plnit filtrační funkci. Svrchní vrstvou pražcového podloží je kolejové lože. [1]

2.1. Pražcové podloží

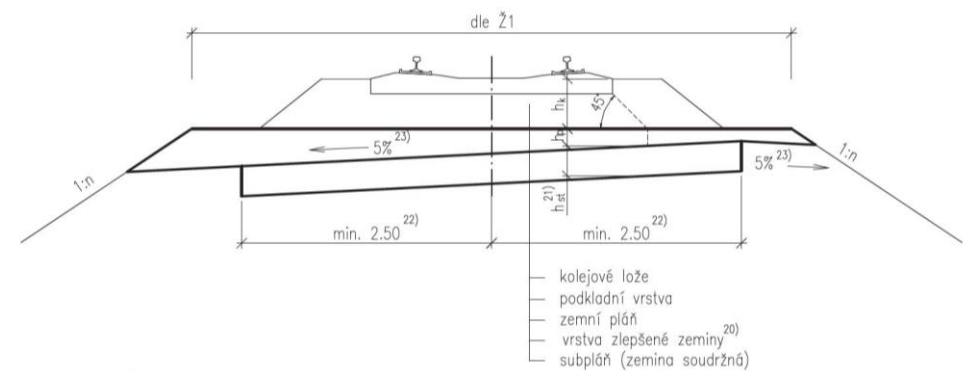
V železničních stavbách se setkáváme se šesti odlišnými typy pražcových podloží. Typ 1 se skládá z kolejového lože a zemní pláň tvořené nesoudržnou zeminou. Zemní pláň typu 2 může být ze soudržné i nesoudržné zeminou a konstrukci navíc tvoří konstrukční vrstva z nesoudržného materiálu, například štěrkodrt'. U typu 3 je snižená únosnost zemní pláň a musí být vyztužena geosyntetiky. Konstrukční vrstva je stejná jako u typu 2. Typ 4 se vyznačuje užitím železobetonové, nebo předpjaté desky, která je uložena na vrstvu podkladního písku na zemní pláni. Pro zabránění zvětrávání hornin se navrhuje typ 5, kde zvětrání zamezuje vrstva asfaltového betonu, který je také rozprostřen na vyrovnávací vrstvě písku. Výše zmíněné typy pražcových podloží jsou znázorněny na Obr. 4. Pražcové podloží typu 6 se vyznačuje zlepšením, nebo stabilizací zeminou a je předmětem této bakalářské práce. [1]

Konstrukce pražcového podloží typu 6 se skládá z kolejového lože, konstrukčních vrstev, resp. vrstvy a stabilizované, nebo zlepšené zeminou. Navrhuje se v případě, kdy redukovaný modul přetvárnosti zemní pláň nedosahuje požadované hodnoty dle kategorie tratě.

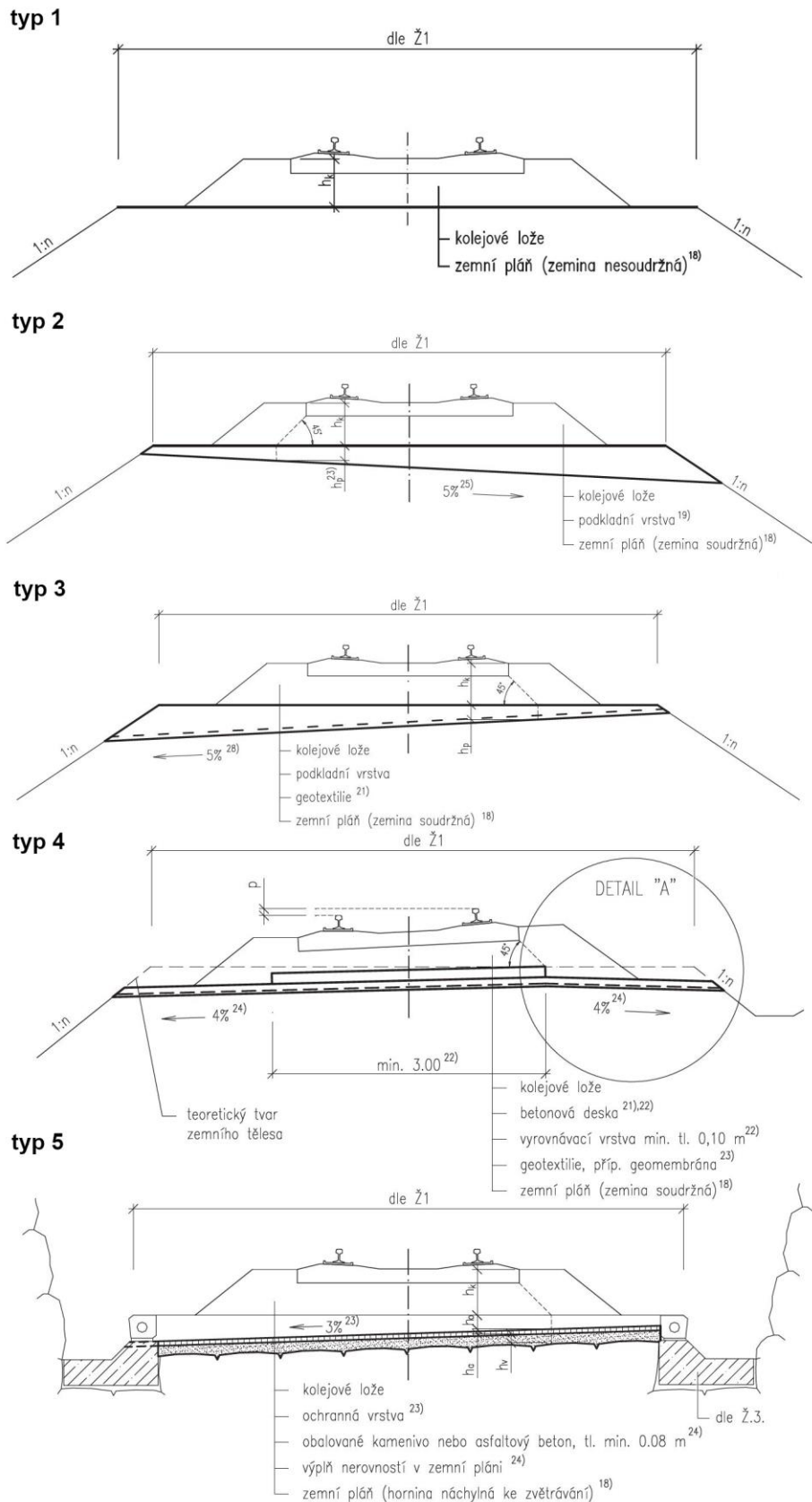


Obr. 2 Pražcové podloží typu 6 [2]

Do konstrukčních vrstev lze navrhovat pouze stabilizaci, která je zobrazena na Obr. 2. U zemní pláň na Obr. 3 lze použít stabilizaci a zlepšení. Podrobnému popisu obou metod se věnuje kapitola zlepšených a stabilizovaných zemin. [1]

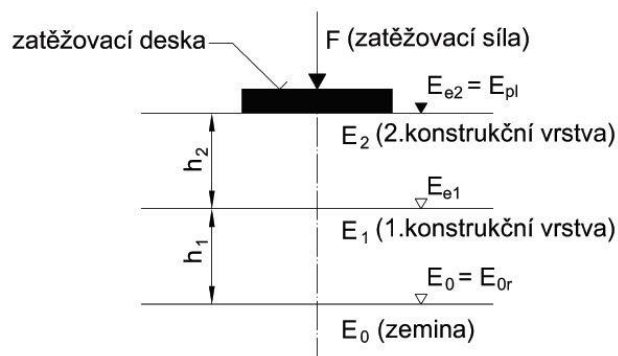


Obr. 3 Pražcové podloží typu 6 [2]



Obr. 4 Pražcová podloží typu 1; 2; 3; 4; 5 [2]

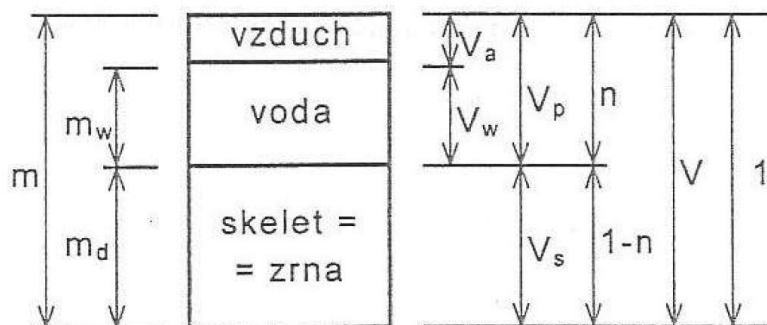
Návrh konstrukčních vrstev a úpravy zemní pláně vychází z geotechnického průzkumu a druhu tratě. Při návrhu postupujeme v souladu s přílohou 6 předpisu SŽDC S4. V případě neúnosné zemní pláně lze přikročit k vyztužení geosyntetiky, úplnou náhradou, nebo stabilizací, resp. zlepšením. Cílem návrhu konstrukčních vrstev je dosažení požadovaného modulu přetvárnosti na pláni tělesa ŽS, která je svrchní částí ŽS. Schematicky je princip zobrazen na Obr. 5. Na základě modulu deformace materiálů a tloušťky jednotlivých vrstev se vypočte výsledný ekvivalentní modul přetvárnosti.



Obr. 5 Schéma výpočtu ekvivalentního modulu přetvárnosti [1]

2.2. Zeminy

Zemina se skládá ze tří fází: pevné, kapalné a plynné (Obr. 6). Pevnou fázi tvoří částice od velikosti viditelné pouze mikroskopem až po balvany. Kapalnou fázi tvoří voda a plynnou vzduch nebo organické plyny.



Obr. 6 Fáze zeminy [22]

Vztahy mezi jednotlivými fázemi lze vyjádřit popisnými vlastnostmi. Příkladem je pórovitost, která definuje podíl pórů vůči celkovému objemu zeminy. Jíly mají vyšší pórovitost než písky, avšak velikost pórů je u písků větší. Číslo pórovitosti určuje poměr vůči pevné fázi. Indexy neznámých ve vzorcích odpovídají Obr. 6. Hmotnostně je obsah pevné fáze vyjádřen pomocí suché objemové hmotnosti a je popsán v kapitole 4.7.

Pórovitost [22]

$$n = \frac{V_p}{V}$$

Číslo pórovitosti [22]

$$e = \frac{V_p}{V_s}$$

2.2.1. Pevná fáze

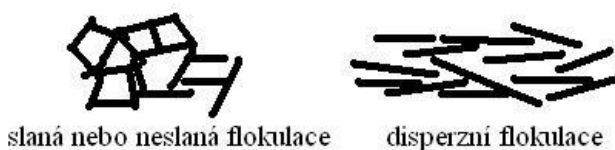
Zeminy vznikají zvětráváním, při kterém dochází k rozrušení původní horniny a změně jejích fyzikálních, chemických a biologických vlastností. Erozi zemin způsobuje síla vody nebo větru. Sedimenty můžeme rozdělit na aluviální (naplavené), deluviální (svahované, způsobené tíhovou silou), eolické (váté), glaciální (ledovcové) a sedimenty (usazeniny) z moře. Z hlediska transportu dělíme zeminy na reziduální a sedimentární. Reziduální zeminy zůstaly na místě svého zvětrání a nazýváme je eluvia. Sedimentární zeminy byly po erozi transportovány na jiné místo. [22]

Z hlediska velikosti částic rozlišujeme velmi hrubé, hrubé a jemné částice. Základní rozdělení zemin je na štěrkovitou a písčitou frakci, která zahrnuje hrubé

částice, a na prachovou a jílovou frakci, která odpovídá jemným částicím. Podíl jednotlivých částic zjišťujeme síťovým rozbořem a hustoměrnou zkouškou, které jsem provedl a popsal v kapitole 4.5. Výstupem je křivka zrnitosti.

Z mineralogického hlediska dělíme minerály obsažené v zeminách na prvotní a druhotné. Nenarušené horniny obsahují nejvíce minerálů živce, dále pyroxenu, amfibolu, křemene, slídy a ostatních minerálů. Tyto minerály můžeme označit za prvotní. Mezi druhotné minerály patří minerály jílové, které mohou vlastnosti zemin změnit podstatně větším podílem. Složení prvotních minerálů v zemině, která vznikla erozí původní horniny, je převážně křemen a v menším zastoupení živce se slídou. [22]

Jílové minerály se dělí dle vazby na kaolinit, montmorillonit a illit. Projevují se plastickým chováním, vázáním vody a následným smršťováním, nebo bobtnáním. Tvar minerálů je šupinkový. U jílových minerálů převažují vzájemné síly mezi částicemi nad silami tíhovými. Tyto částice nazýváme koloidními. Šupinky jílu se mohou navzájem přitahovat, v tomto případě mluvíme o slané nebo neslané flokulaci. Při vzájemných odpuzivých silách jsou šupinky uspořádány rovnoběžně a jedná se o disperzní strukturu (Obr. 7). [23]



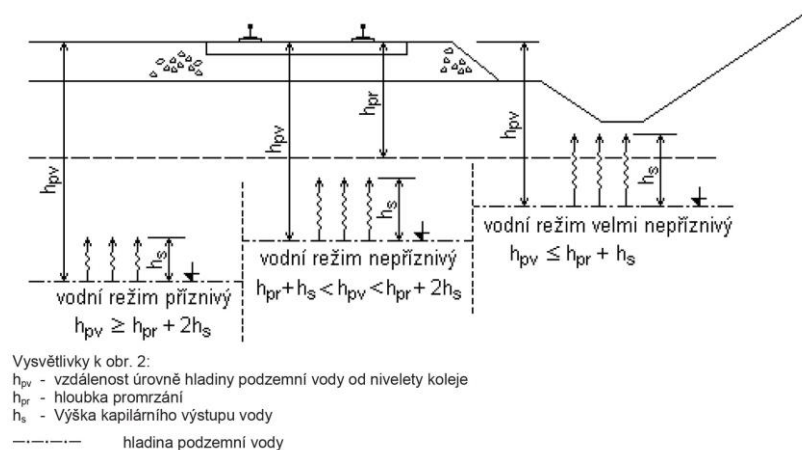
Obr. 7 Flokulace jílových minerálů [23]

Při hustoměrné zkoušce, kterou jsem provedl a popsal v kapitole 4.5.1, se uměle navozuje disperzní stav. Dosažením se povede separovat od sebe jednotlivá zrna a částice se neshlukují. [22]

2.2.2. Kapalná fáze

Voda se v zeminách může naskytnout ve všech skupenstvích. Voda může být součástí minerálů, vázaná, nebo volná. Vázaná voda se elektrochemickými vazbami pojí k pevným částicím. Voda volná se dělí na kapilární a gravitační. V železničních stavbách se zabýváme vlivem kapilární vody. [22]

Kapilární voda vzlíná v nenasycených pórech nad hladinu podzemní vody. U štěrku a písků v řádech centimetrů, ale u jílu až metrů. Při návrhu pražcového podloží se musí návrh provést na základě hloubky promrzání, namrzavosti zemin, hladině podzemní vody a kapilárním výstupu dle Obr. 8. Při nevhodném návrhu dochází k namrzání zemin a vzniku ledových čoček. Namrzavost zemin je součástí kapitoly 4.12. [22]



Obr. 8 Vodní režim zemní pláně [1]

2.2.3. Klasifikace zemin

Pro návrh stabilizované nebo zlepšené zeminy se musí zemina zatřídit dle její zrnitosti a plasticity. Dle velikosti částic dělíme zeminy do třech hlavních skupin dle Tab. 1. Jednotlivý poměr velikostí zrn kameniva se znázorní křivkou zrnitosti a je detailně popsán v kapitole 4.5. Zatřídění do příslušné skupiny je na základě procentuálního podílu a je uveden v Tab. 2.

Tab. 1 Rozdělení zemin dle zrnitosti [1]

Název	Značka	Velikost zrn [mm]
velmi hrubé částice		
balvanitá složka	B	200 <
kamenitá složka	CB	60 - 200
hrubé částice		
šterkovitá složka	G	2 - 60
písčítá složka	S	0,063 - 2
jemné částice		
prachová složka	M	0,002 - 0,063
jílovitá složka	C	< 0,002

Tab. 2 Skupiny zemin dle zrnitosti [1]

Skupina	Značka	Podíl částic [%]
šterkovité	F	f < 35; g > s
písčité	S	f < 35; g < s
jemnozrnné	G	f > 35

Zeminy se dle své zrnitosti a plasticity dělí na soudržné a nesoudržné. Nesoudržné jsou šterkovitého a písčitého charakteru. Soudržné zeminy zastupují jemnozrnné zeminy, u kterých převládají vzájemné síly mezi částicemi nad silami tíhovými. [22]

Jemnozrné zeminy se blíže specifikují svojí plasticitou. Rozsah, kdy se zemina chová plasticky, definují Atterbergovy konzistenční meze. Mez plasticity a tekutosti budou určeny a pospány v kapitole 4.6. Z meze tekutosti určíme plasticitu zeminy podle Tab. 3 a konzistenci dle Tab. 4. [22]

Tab. 3 Plasticita zemin [1]

Plasticita	Značka	Mez tekutosti w_L [%]
nízká	L	< 35
střední	I	35 - 50
vysoká	H	50 - 70
velmi vysoká	V	70 - 90
extrémně vysoká	E	90 <

Tab. 4 Konzistence zemin [1]

Konzistence	Stupeň konzistence I_c
kašovitá	< 0,05
měkká	0,05 - 0,5
tuhá	0,5 - 1
pevná	1 <
tvrdá	

U štěrků a písků se naopak při stanovení křivky zrnitosti určuje i číslo nestejnozrnnosti a křivosti. Obě čísla vycházejí z poměru určitých propadů na sítích. Dalším sledovaným faktorem je stupeň ulehlosti, který určí nakypření, resp. ulehlost zeminy. [22]

Na základě zjištěných hodnot se zemina zatřídí. Rozlišujeme celkem 5 štěrkovitých, 5 písčitých a 8 jemnozrných zemin. Každá zemina se pojmenovává dle následujícího pravidla. První písmeno ve zkratce označuje základní zeminu a druhé její přívlastek.

Štěrkovité zeminy

GW	G1	štěrk dobře zrněný
GP	G2	štěrk špatně zrněný
G-F	G3	štěrk s příměsí jemnozrné zeminy
GM	G4	štěrk hlinitý
GC	G5	štěrk jílovitý

Písčité zeminy

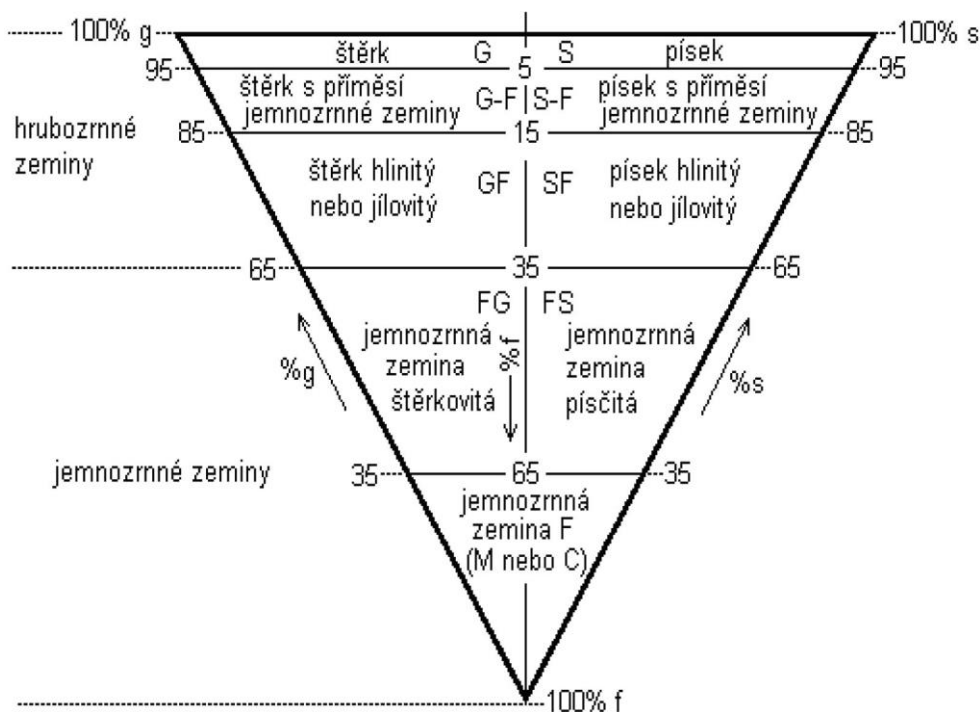
SW	S1	písek dobře zrněný
SP	S2	písek špatně zrněný
S-F	S3	písek s příměsí jemnozrné zeminy
SM	S4	písek hlinitý
SC	S5	písek jílovitý

Jemnozrné zeminy

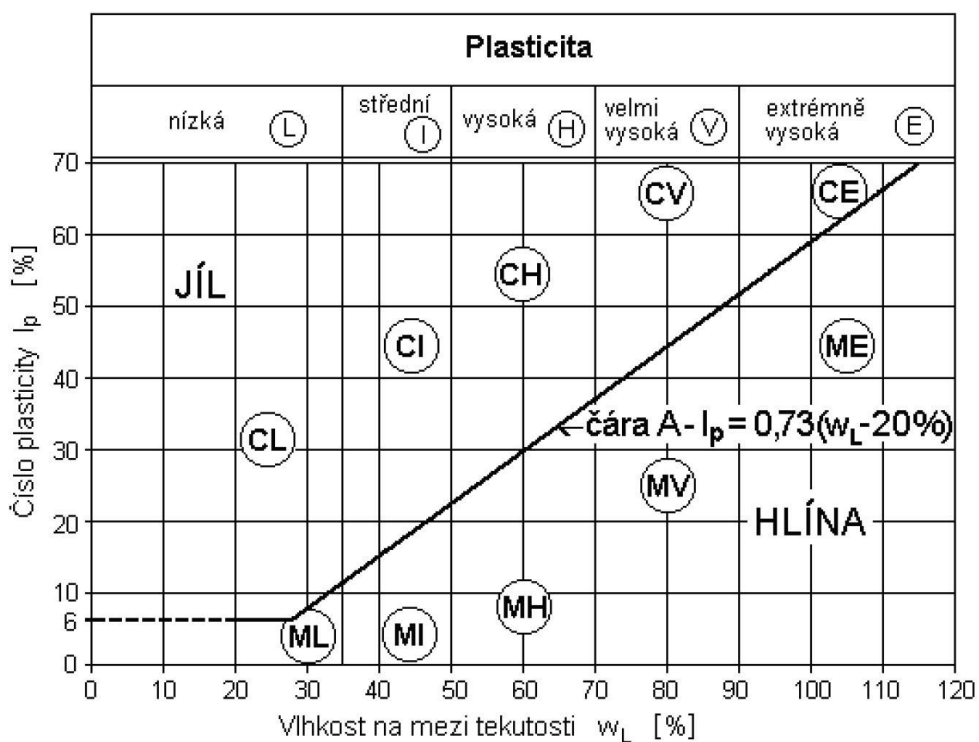
MG	F1	hlína štěrkovitá	MI	F5	hlína s nízkou a střední plasticitou
CG	F2	jíl štěrkovitý	CI	F6	jíl s nízkou a střední plasticitou
MS	F3	hlína písčitá	ME	F7	hlína s vysokou až extr. vysokou pl.
CS	F4	jíl písčitý	CE	F8	jíl s vysokou až extrémně vysokou pl.

[1]

Pomůckou k zatřídění je trojúhelníkový diagram, kdy určením jednotlivých poměrů na úsečkách zatřídím zeminu. U jemnozrnných zemin se využije plasticitního diagramu, kterým se určí, zda se jedná o hlínu, nebo jíl a příslušnou plasticitu. Diagramy jsou znázorněny na Obr. 9 a Obr. 10.



Obr. 9 Trojúhelníkový diagram [1]



Obr. 10 Diagram plasticity zemin [1]

3. ZLEPŠENÉ A STABILIZOVANÉ ZEMINY

Zlepšené a stabilizované zeminy navrhujeme v případě, kdy je zemní pláň neúnosná nebo jinak nevhodná. Cílem úpravy je využití původní zeminy promísením s odlišnou zeminou, pojivem nebo jejich kombinací. Zeminy lze upravit mechanicky, kdy se úprava provede granulometricky odlišnou zeminou s cílem úpravy křivky zrnitosti. Pro úpravy příměsí pojiva, resp. kombinací pojiv, se využívá cementu, vápna, popílku, strusky a dalších příměsí. Materiály vhodné k úpravám se věnuje kapitola 3.3 a jejich seznam je uveden v Tab. 6. Základní kvalitativní požadavky na zlepšené a stabilizované zeminy jsou uvedeny v Tab. 5

Tab. 5 Minimální návrhové parametry upravených zemin [1]

Parametr		Zlepšené zeminy	Stabilizované zeminy
minimální tloušťka vrstvy po zhuštění	[mm]	300	250
Proctor Standard	[%]	100	100
relativní ulehlost I_D	[-]	0,9	0,9
modul přetvárnosti E_p	[MPa]	40	60
hodnota metylénové modři	[-]	0 - 6	0 - 2

Tab. 6 Varianty zlepšených a stabilizovaných zemin [1]

Pojivo/příměs	Druh	Označení zlepšené zeminy	Označení stabilizované zeminy
cement	cementová	ZZC	SC
vápno	vápenná	ZZV	SV
vápno + cement	vápenno - cementová	ZZVC	SVC
popílek		ZZP	SP
struska		ZZS	SS
chemický stabilizátor	chemická	ZZCh	SCh
odprašky		ZZO	SO
zeminy	mechanická	ZZM	SM

3.1. Zlepšené zeminy

Cílem úpravy zlepšením je dosažení lepší zpracovatelnosti a fyzikálních vlastností, kterými je snížení přirozené vlhkosti, snížení meze plasticity, změna reakce s vodou a s tím spojené bobtnání. Zlepšené zeminy navrhujeme u rekonstrukcí stávajících tratí. Pro novostavby a do konstrukčních vrstev využijeme stabilizace. [1]

3.1.1. Návrh

Na základě geotechnického průzkumu, který odpovídá počátečním zkouškám zemin zemní pláň, provedeme návrh stavební směsi. Složení vyjádříme množstvím pojiva v % hmotnosti k suché zemině a množstvím vody v % hmotnosti k suché směsi. V případě mechanické úpravy určíme poměr původní a přidané zeminy, resp. kameniva. Základním rozhodujícím kritériem zlepšených zemin je kalifornský poměr únosnosti CBR. Minimální hodnota CBR je 10 %. Následující seznam znázorňuje zkoušky, které se provádí v laboratoři pro stanovení vhodné směsi. Odkazy na kapitoly uvádí mnou provedené zkoušky popsané v praktické části. Z hlediska pojiv a vody nás zajímají osvědčení o jakosti. [1]

Počáteční zkoušky zemin

- Vlhkost 4.4
- Zrnitost 4.5
- Číslo plasticity 4.6
- Obsah organických látek
- pH faktor
- Proctor Standard 4.7

Počáteční zkoušky stavební směsi

- Složení 4.2
- Zhutnitelnost 4.7
- Poměr únosnosti CBR 4.8 [1]

Předpis SŽDC S4 další zkoušky nepožaduje. Při postupu dle nové normy ČSN EN 16907-4, která v řadě věcí odpovídá ČSN EN 14227-15, bych zmínil další zkoušky. Některé z níže uvedených zkoušek budou popsány v praktické části.

- Index únosnosti IBI 4.8
- Lineární/objemové bobtnání 4.9

Navržené zlepšení musí dosahovat požadovaného modulu přetvárnosti na zemní pláni. Zlepšené zeminy dosahují 40 MPa. Pro vyšší únosnost

navrhne stabilizaci. Zemina zlepšená pojivy nesmí být navrhována v dosahu podzemní vody. Směs z pojiva s únosností CBR 10 % je mírně namrzavá, 47 % je nenamrzavá. [1]

3.1.2. Technologie

Zlepšování zemin se zpravidla provádí na místě, tj. in situ. Před nanesením směsi musí být zemní pláň vyčištěna a urovnána do předepsaného sklonu pro zajištění odvodnění za pomoci grejdrů nebo dozerů. Pro lepší promísení může být rozrušena frézami. Pojivo se dávkuje pomocí dávkovačů (Obr. 11 a Obr. 12), kdy přesnost je přibližně $\pm 10\%$. Při kombinaci pojiv se musí pojiva dávkovat postupně, nebo využít varianty smíšených pojiv. Promísení pojiva se zeminou se provede zemními frézami (Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15) a následně se směs dovlhčuje na optimální vlhkost. [1]



Obr. 11 Dávkovač na podvozku MAN při modernizaci tratě č. 026 [31]

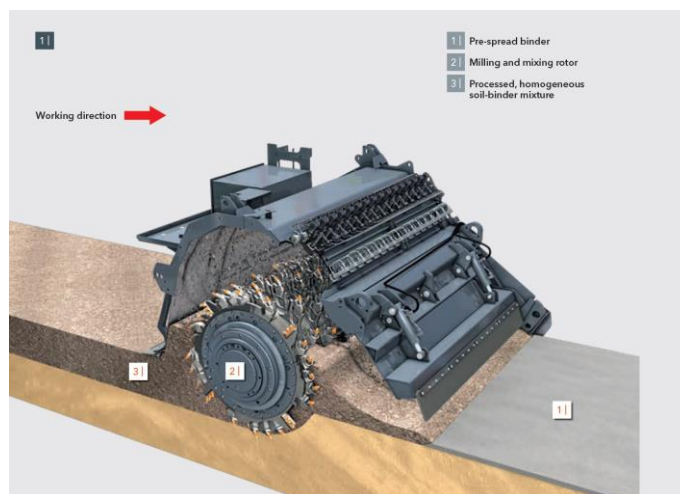


Obr. 12 Dávkovač na podvozku Tatra 815 [28]



Obr. 13 Zemní fréza Wirtgen [30]

Výsledná vrstva se urovná skrejpry nebo grejdry do předepsaného sklonu a zhutní hutnicím válcem na min. 100 % Proctor Standard. Šířka zhutněné vrstvy musí být min. 2 500 mm od osy koleje. [1]



Obr. 14 Mísení zeminy s pojivem zemní frézou [32]

V průběhu provádění stavby se zavádí kontrolní zkoušky, kterými se ověří shoda s počátečními zkouškami. Modul přetvárnosti se zjišťuje statickou zatěžovací zkouškou a je základním kritériem únosnosti. Postupuje se dle přílohy 5 SŽDC S4. Zařízení se skládá ze zatěžovací desky, hydraulického lisu, siloměru, zařízení měřící deformaci a protizávaží, ideálně motorový univerzální vozík (MUV). Během dvou cyklů je postupně vrstva přírůstkově zatěžována a naměřené hodnoty jsou zaznamenány do grafu. Z celkové deformace druhého cyklu je stanoven modul přetvárnosti. [1]



Obr. 15 Zemní fréza při modernizaci tratě č. 026 [31]

Kontrolní zkoušky

- Vlhkost
- Poměr únosnosti CBR
- Zhutnitelnost
- Obsah hrudek
- Dávkování pojiva
- Stejnoseměrnost promísení
- Statická zatěžovací zkouška

[1]

Po dokončení stavebních prací následují převjímací zkoušky. Stavební dozor investora určí, zda provedené vrstvy převezme.

Převjímací zkoušky

- Šířka a tloušťka vrstvy každých 100 m
- Nerovnost povrchu a sklon každých 100 m
- Míra zhutnění každých 100 m
- Statická zatěžovací zkouška každých 100 m

[1]

3.2. Stabilizované zeminy

Stabilizace je úprava zemin, kterou zemina získá požadovanou pevnost. Cílem úpravy je vznik homogenní a stabilní směsi, která je schopná odolávat vlivům mrazu a dopravního zatížení v dlouhodobém horizontu. Požadavky na provádění, únosnost a odolnost proti účinkům mrazu jsou vyšší než u zlepšených zemin. Stabilizované zeminy se navrhují u novostaveb a je možné je používat i do konstrukčních vrstev pražcového podloží. [1]

3.2.1. Návrh

Návrh směsi vychází stejně jako u zlepšení z podrobného geotechnického průzkumu. Minimální modul přetvárnosti stabilizované vrstvy je 60 MPa. Složení směsi se stanoví stejně jako v předešlé kapitole. Provedeme návrh stabilizované směsi, kdy se zaměříme především na pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu. Počáteční zkoušky zemin, pojiv a vody se shodují se zlepšením. U stabilizovaných zemin se zvyšují nároky na stavební směs. [1]

Počáteční zkoušky zemin

- Zrnitost 4.5
- Číslo plasticity 4.6
- Obsah organických látek
- pH faktor
- Proctor Standard 4.7 [1]

Počáteční zkoušky stavební směsi

- Složení 4.2
- Zhutnitelnost 4.7
- Pevnost v tlaku 4.10
- Odolnost proti mrazu 4.11 [1]

Současná SŽDC S4 vychází z normy ČSN 73-6125, kterou nahradily v roce 2008 normy řady ČSN EN 14227, na které navazuje v minulé kapitole zmíněná ČSN EN 16907-4. Doplnil bych ostatní zkoušky.

- Index únosnosti IBI 4.8
- Poměr únosnosti CBR 4.8
- Lineární/objemové bobtnání 4.9
- Pevnost v tahu
- Stupeň rozpadu

3.2.2. Technologie

Stabilizace zemin se provádí převážně v mísícím centru. Díky lepším podmínkám se dosáhne rovnoměrného promísení a přesného dávkování.

Na stavbu se směs dopravuje dávkovači. Během dopravy se musí zamezit vysychání a spojení pojiva s materiálem. Před aplikací musí být původní zemina odtěžena, pláň zhutněna a urovnána do požadovaného sklonu. Na stavbě je směs rozprostírána za pomoci finišeru. Vrstva musí být rozprostřena min. 2 500 mm od osy koleje. [1]

Provádění mísení na místě je možné, ale v praxi nepoužívané. Postup by byl podobný jako u zlepšených zemin. Během provádění je podrobena směs kontrolním zkouškám jejíž výsledky musí odpovídat výsledkům počátečních zkoušek. Závěrečné přijímací zkoušky navíc obsahují základní požadavky stabilizace, tedy pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu.

Kontrolní zkoušky

- Pevnost v tlaku
- Odolnost proti mrazu
- Vlhkost
- Zhutnitelnost
- Obsah hrudek
- Dávkování pojiva
- Stejnoseměrnost promísení
- Statická zatěžovací zkouška

[1]

Po dokončení stavebních prací následují přijímací zkoušky.

Přijímací zkoušky

- Šířka a tloušťka vrstvy každých 100 m
- Nerovnost povrchu a sklon každých 100 m
- Míra zhutnění každých 100 m
- Statická zatěžovací zkouška každých 100 m
- Pevnost v tlaku
- Odolnost proti mrazu

[1]

3.3. Materiály

Materiály používané pro zlepšené a stabilizované zeminy jsou pro obě metody stejné. Varianty jsou uvedeny v Tab. 6 v . Zvolení a množství pojiva je závislé na druhu zemin, vodním režimu, požadovaných pevnostech a jiných aspektech. Z hlediska zatřídění zeminy se orientuje dle Tab. 7.

Tab. 7 Vhodnost materiálů pro zlepšené a stabilizované zeminy [1]

pojivo/příměs	Štěrkovité zeminy						Písčité zeminy						Jemnozrnné zeminy																															
	G3		G-F		G4		GM		G5		GC		S3		S-F		S4		SM		S5		SC		F1		MG		F3		MS		F5		ML		MI		F7		MH		MV	
	G3		G-F		G4		GM		G5		GC		S3		S-F		S4		SM		S5		SC		F2		CG		F4		CS		F6		CL		CI		F8		CH		CV	
cement	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•			
vápno	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
vápno + cement	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
popílek	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
struska	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
chemický stab.	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
odprašky	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	
zeminy	•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•		•	

3.3.1. Cement

Cement je hydraulické pojivo, které po smíchání s vodou začne vlivem hydratace tuhnout a tvrdnout. Pojivo je vhodné především pro nesoudržné zeminy. Při úpravě zemin se používá přibližně 2-4 % k hmotnosti suché směsi. Index plasticity upravované zeminy by měl být menší než 6, v rozmezí 6 až 10 je vhodná kombinace vápna s cementem. [1]

Hydratace cementu začíná smísením vody s pojivem, kdy dojde ke snížení vlhkosti zeminy. V čase přibližně 2-24 hod. nastává latentní fáze. Následně dochází ke krystalizaci gelu a postupnému zpevňování. Upravená zemina během týdnů získává vyšší pevnost. [19]

Pro zlepšení se využívá portlandského, vysokopecního, pucolánového a směsného cementu. [19]

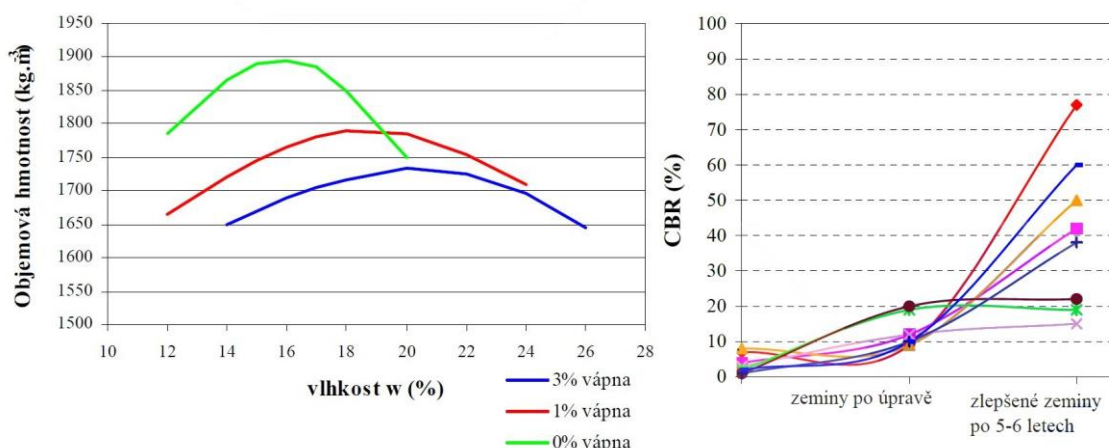
3.3.2. Vápno

Především u jemnozrnných zemin a při potřebě snížení vlhkosti je vhodné využít jako pojivo vápno. Hodnotu indexu plasticity lze uvažovat 10 % a vyšší. Používá se hašené a nehašené vápno nebo vápenné mléko. [1] [14]

Na rozhraní povrchu jílových částic a vody se pohybuje zvýšená koncentrace kladně nabitých iontů. Mezi kationty sodíku Na⁺ a draslíku K⁺ dochází k výměně,

kdy jsou nahrazeny vápenným kationtem Ca^{2+} . Jílové minerály mají strukturu vrstevnatou, která přechází vlivem výměny kationtů na zrnitou. [19]

Po smíchání zeminy s vápnem dochází vlivem hydratace vápna k okamžitému vysoušení zeminy. Zemině se dále zvyšuje mez plasticity za konstantní meze tekutosti, která vede ke snížení plasticity. Posledním okamžitým účinkem je zvýšení optimální vlhkosti a snížení maximální objemové hmotnosti. Výsledná křivka je plošší (Obr. 16), tudíž je méně citlivá na případnou nepřesnost při navlhčení. Výsledkem výše popsaných jevů je zvýšení pevnosti a odolnosti proti mrazu. [19]



Obr. 16 Vliv vápna na upravenou zeminu [19]

Z dlouhodobého hlediska dochází k pucolánové reakci. Uvolněné hydroxylové ionty z cementu OH^- zvyšují pH a způsobují rozpouštění oxidů křemíku a hliníku jílových minerálů. Podstatou reakce je tvorba gelu. Dlouhodobé účinky působí v řádu několika let (Obr. 16). Původní naměřená hodnota CBR se může zvýšit až několikanásobně. [19]

3.3.3. Struska

Struska je vedlejší zplodinou při výrobě surového železa. Pro účely zlepšení zemin se dle ČSN EN 14227-15 využívá granulovaná vysokopecní struska, která vzniká prudkým ochlazením strusky. Vzniklý sklovitý, písčité materiál se vyznačuje vyšším podílem jemné frakce. [3]

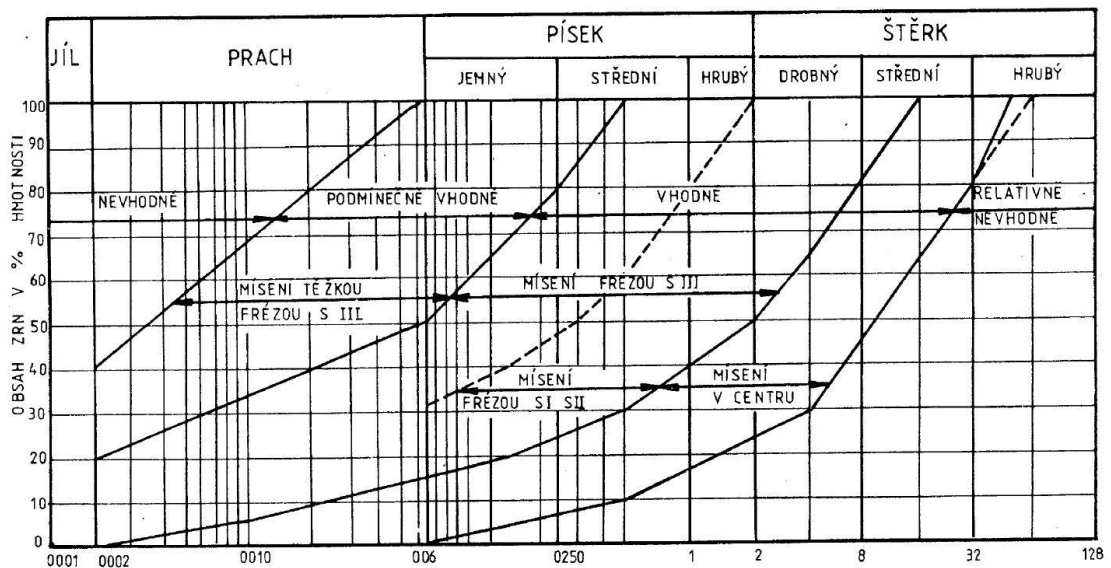
3.3.4. Popílek

Popílek je jemný prášek, který se uvolňuje při spalování tuhých paliv a je zachycován pomocí filtrů. Dělíme je na křemičité a vápenaté. Křemičité popílků jsou pucolánovými materiály, tudíž ke své reakci potřebuje vápno a vodu. Vápenatý má kromě vápenaté i hydraulické vlastnosti. [12]

V průběhu času roste pevnost v tlaku a poměr únosnosti CBR. Oproti vápnu a cementu je nárůst CBR pomalejší. [19]

3.3.5. Zemina

Principem mechanické úpravy je mísení zeminy s odlišně granulometrickou zeminou s cílem úpravy křivky zrnitosti. Dle předpisu SŽDC S4 je vhodná zemina pro stabilizace S I, kterou definuje norma ČSN 73-6125 a je znázorněna na Obr. 17.



Obr. 17 Graf zrnitosti zemín pro stabilizace [10]

4. PRAKTICKÁ ČÁST

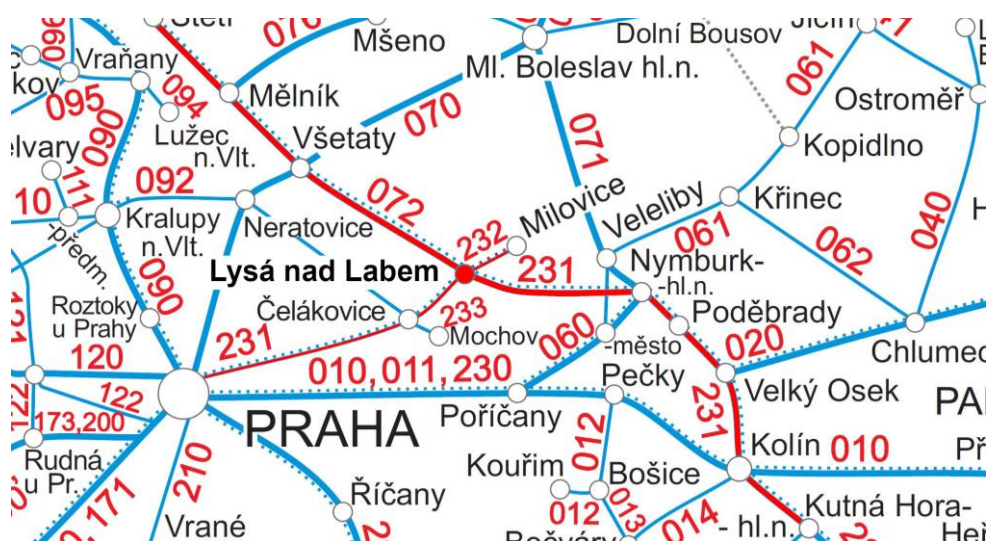
ŽST Lysá nad Labem se nachází na následujících tratích (Obr. 18).

Celostátní tratě

- Kutná Hora hl. n. – Lysá nad Labem (dle TTP č. 502A, dle JŘ č. 231)
- Lysá nad Labem – Ústí nad Labem z. (dle TTP č. 503A, dle JŘ č. 072)
- Lysá nad Labem - Praha-Vysočany (dle TPP č. 524A, dle JŘ č. 231)

Regionální trať

- Lysá nad Labem – Milovice (dle TTP č. 524B, dle JŘ 232) [33]



Obr. 18 Lokality ŽST Lysá nad Labem v mapě KJŘ [24]

Modernizace současné stanice je součástí projektu „Rekonstrukce ŽST Lysá nad Labem“, který byl vypracován společnostmi SUDOP EU a.s. a Mott MacDonald CZ, spol. s r.o. Ve stanici se nacházejí dvě charakteristické zeminy, kterými jsou **F4 (jíl písčité)** a **S3 (písek s příměsí jemnozrné zeminy)**. V projektu byly v rámci pražcového podloží typu 6 navrženy následující opatření.

- SMC – mechanická a cementová stabilizace
- ZVC – vápenno – cementové zlepšení
- SVC – vápenno – cementová stabilizace
- SC – kamenivo stmelené cementem

První varianta byla odmítnuta z důvodu nemožnosti výroby zkušebního vzorku v laboratoři. Vzhledem k vysoké hladině podzemní vody bylo nutné u použití vápna s cementem přistoupit ke stabilizaci místo zlepšení. Díky vyšším požadavkům na pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu lze zaručit trvanlivost navržené vrstvy. Zkoušky nedosáhly požadovaných hodnot a bylo nutné přistoupit k odtěžení původního materiálu a náhradou kamenivem stmelným cementem. [33] [34]

4.1. Odebraná zemina

Metody geotechnického průzkumu dělíme na destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivní metody jsou založeny na fyzikální podstatě, využíváme např. metody gravimetrické, seismické nebo elektrické vodivosti. Výstupem je zjištění tloušťky konstrukčních vrstev, kolejového lože nebo místa poruch a diskontinuit. Druhá skupina destruktivních metod je prováděna kopanými a vrtanými sondami nebo penetračními zkouškami. Výstupem je stanovení geologických a hydrogeologických poměrů, které určí skladbu, klasifikaci zemin, hladinu podzemní vody a únosnost. [1]



Obr. 19 MUV 69 s drapákem v ŽST Lysá nad Labem



Obr. 20 Poloha kopané sondy v ŽST Lysá nad Labem [36]

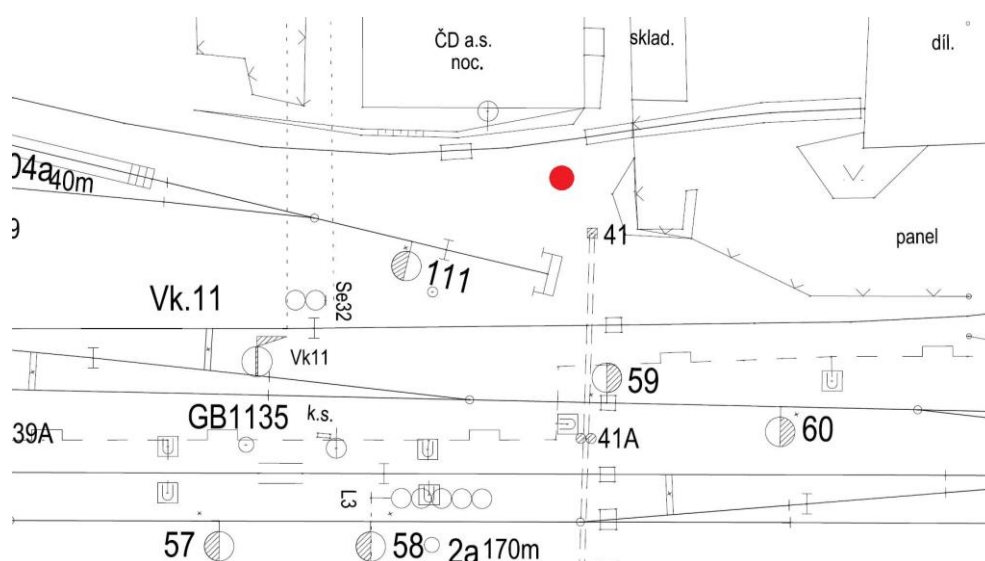
Odběr vzorků byl proveden dne 20.3.2019 v ŽST Lysá nad Labem. Pro odběr byla vedoucím bakalářské práce vybrána kolej č. 104, která spojuje areál SŽDC s železniční stanicí (Obr. 20 a Obr. 22). Poloha sondy byla zvolena v místě, kde

se předpokládá výskyt písku s příměsí jemnozrné zeminy (S3). Předpoklad byl založen na provedených sondách v rámci výše zmíněného projektu. Kopaná sonda se nachází ve vzdálenosti 3,2 m od osy koleje č. 104 ve staničení km 337,818. Pro vykopání sondy byl použit motorový univerzální vozík (MUV 69) s drapákem (Obr. 19), kterým byla odtěžena zemina do hloubky 0,9 m.

Následně jsem odkopal přibližně 200 kg zeminy do předem připravených pytlů, které byly utěsněny pro zamezení vysychání (Obr. 21). Odebraná zemina se nacházela v hloubce 0,9 m až 1,4 m. Zemina byla plastická, měla žlutohnědou barvu a s nárůstem do hloubky se zvyšovala vlhkost.



Obr. 21 Kopaná sonda [26]



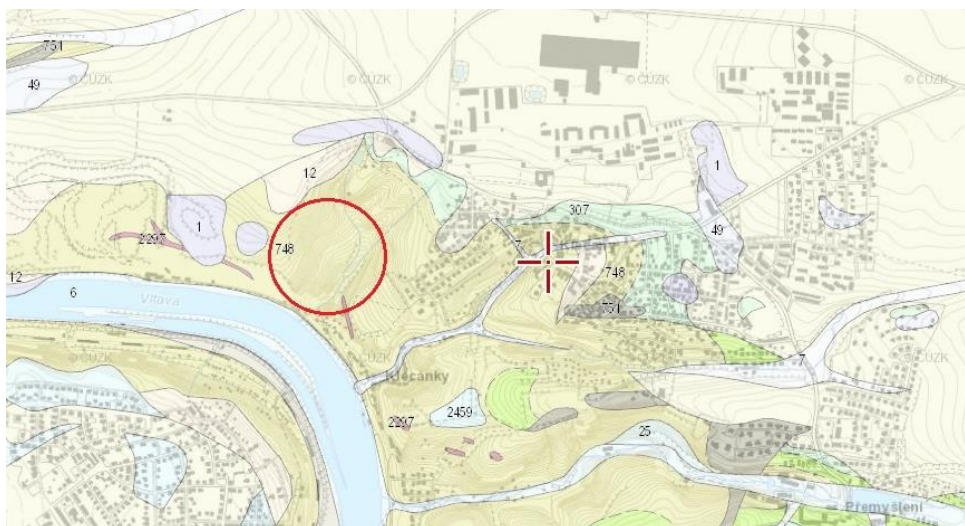
Obr. 22 Poloha kopané sondy u kol. č. 104 v km 337,818 [35]

Pro stanovení přesných parametrů odebrané zeminy byly provedeny akreditovanou laboratoří zkoušky. Výsledky jsou uvedeny v Příloha D.

4.2. Upravená zemina

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce jsem se vydal cestou mechanické úpravy zeminy. První variantu využití odpadu z těžby a odprašků jsem poptal v kamenolomech Zbraslav (Kámen Zbraslav), Klecany (Skanska), Chomutovice a Plaňany (Eurovia). Jediná možnost odběru odprašků byla v Plaňanech. Z původního záměru jsem upustil, protože nebylo jisté, zda bude kamenivo vhodné. Přistoupil jsem k odběru běžného kameniva frakce 0/4 a 4/8 z kamenolomu Klecany.

Lom v Klecanech se nachází severně od Prahy na pravém břehu Vltavy (Obr. 23 a Obr. 24). Dle geologické mapy se v lokalitě nachází droby a prachovce, které se řadí mezi sedimentální horniny. Pocházejí z období starohor (proterozoikum) a z hlediska polohy do oblasti Barrandien, která se rozkládá mezi Prahou a Plzní. Frakce kameniva 0/4 byla odebrána o hmotnosti přibližně 70 kg, u 4/8 přibližně 30 kg (Obr. 25). Na místě jsme získali výsledky laboratorní zkoušky zrnitosti, které jsem využil pro návrh směsí. [25]



Obr. 23 Klecany v geologické mapě [25]



Obr. 24 Kamenolom Klecany

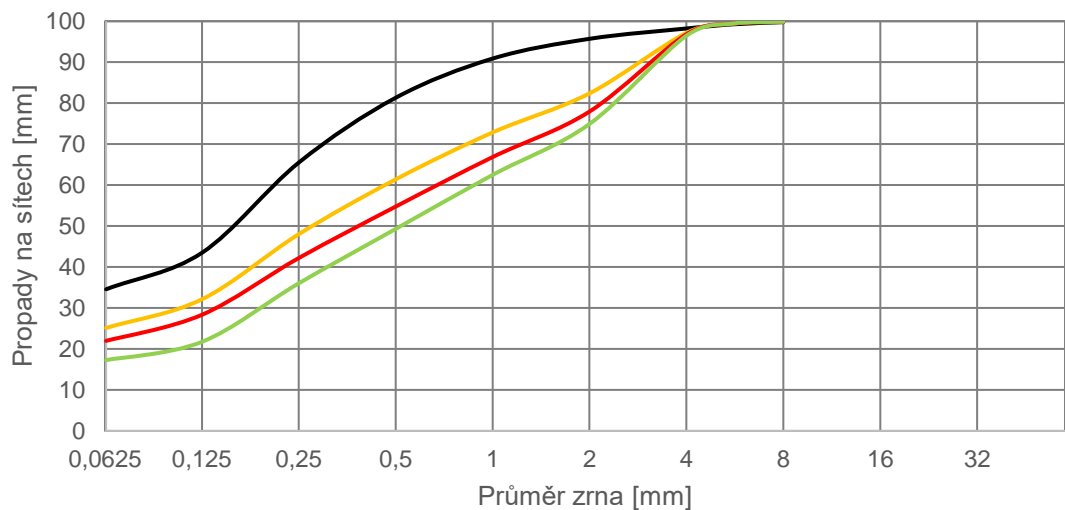


Obr. 25 Odběr kameniva [27]

Pro návrh směsi jsem vycházel z křivky zrnitosti určené v kapitole 4.5.1. Podstatou návrhu je vytvoření plynulé křivky zrnitosti a snížení podílu jemné frakce v zemině. Dle SŽDC S4 by se měla křivka zrnitosti pohybovat v oboru zrnitosti stabilizace třídy SI. Křivky zrnitosti kameniva frakce 0/4 a 4/8 jsou uvedeny v Příloha D.

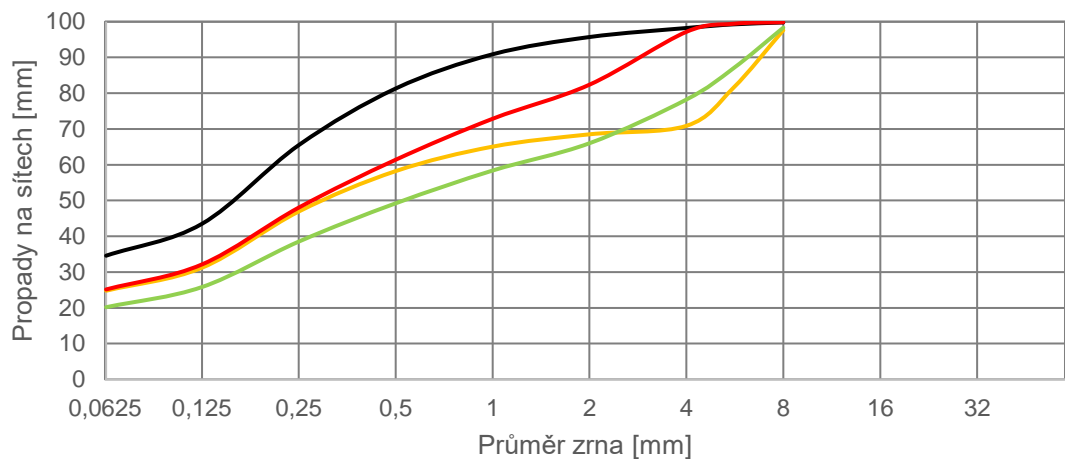
První možná úprava je za užití frakce kameniva 0/4. Dvě varianty jsem navrhl s původní frakcí 0/4 a odlišným poměrem 1:1 a 5:3 (zemina: kamenivo). Třetí varianta se vyznačuje odebráním zrn menších než 0,125 mm a poměrem 1:1 (zemina: kamenivo). Z výše uvedených možností byla vybrána varianta poslední, neboť úpravou dojde k největšímu snížení poměru jemné frakce v zemině. Nevýhodou je, že postup odstranění zrn menších než 0,125 mm je velmi zdoluhavý a nelze zaručit odebrání veškerých jemných částic.

Druhý způsob úpravy s užitím kameniva frakce 4/8 je možný pouze v kombinaci s 0/4. Ve vzájemném poměru 3:2 (0/4:4/8) a poměru 1:1 vůči zemině lze docílit plynulé křivky zrnitosti. Navržené varianty jsou uvedeny v Graf 1 a Graf 2.



— Odebraná zemina — 0/4:zemina (3:5) — 0/4:zemina (1:1) — 0,125/4:zemina (1:1)

Graf 1 Křivka zrnitosti s kamenivem 0/4 (1:1); 0/4 (3:2); 0,125:4 (1:1)



— Odebraná zemina — 0/4:zemina (3:5)
 — 4/8:zemina (2:5) — 0/4:4/8:zemina (3:2:5)

Graf 2 Křivka zrnitosti s kamenivem 0/4 (3:5); 4/8 (2:5); kombinací (1:1)

Výběr vhodné směsi pro finální návrh vychází z následujících zkoušek.

- Proctor Standard 4.7
- Kalifornský poměr únosnosti CBR 4.8
- Okamžitý index únosnosti IBI 4.8

4.3. Zkoušky

Na odebrané zemině z ŽST Lysá nad Labem jsem provedl zkoušky pro zařídění zeminy, určení aktuální a optimální vlhkosti dle Proctor Standard. Pro porovnání byly provedeny zkoušky CBR, IBI a odolnost proti mrazu s lineárním bobtnáním. Klasifikační zkoušky byly zmíněny v kapitole 2.2.3.

Pro zjištění ideální směsi jsem provedl na směsi 0,125/4 a 0/8 zkoušky Proctor Standard, IBI a CBR. Vybraná směs 0/8 byla navíc podrobena zkoušce pevnosti v tlaku, odolnosti proti mrazu a lineárnímu bobtnání. Pro každou zkoušku, kromě lineárního bobtnání, muselo být použito dle zadání tři vzorků. Vzhledem k vyšší únosnosti IBI při nižší, než optimální vlhkosti jsem připravoval vzorky o vlhkostech -4; -2; 0 % oproti optimální vlhkosti.

Odebraná zemina musí být před každou zkouškou vysušena, rozmělněna a následně navlhčena. Rozmělnění jsem prováděl za pomoci hmoždíře, nebo drtiče. Použité nástroje nezměnily křivku zrnitosti, ale oddělily stmelená zrna od sebe. Bez výše zmíněné přípravy by nebylo možné vyrobit vzorky pro zkoušky. Postup neplatí pro zkoušky vlhkosti, zrnitosti a konzistence odebrané zeminy.

Přehled všech zkoušek je znázorněn v Tab. 8. U každé zkoušky jsem popsal její postup a výsledky. Výpis naměřených dat je uveden v přílohách.

Zemina	Odebraná	0,125/4	0/8
Vlhkost	•		
Zrnitost	•		•
Konzistence	•		
Proctor Standard	•	•	•
Poměr únosnosti CBR a IBI	•	•	•
Lineární bobtnání	•		•
Pevnost v tlaku			•
Odolnost proti mrazu	•		•
Příloha	A	B	C

Tab. 8 Provedené zkoušky

4.4. Vlhkost

První zkouškou odebrané zeminy je zjištění aktuální vlhkosti, která se řídí normou ČSN EN ISO 17892-1. Pro stanovení vlhkosti jsem odebral celkem tři vzorky. Po zvážení misek samostatných a s vlhkou zeminou jsem vložil misky do sušárny. Teplota v sušárně je v rozmezí 105 až 110 °C. Pro jemnozrnné zeminy je ideální doba vysoušení kolem 16 hodin, pro srovnání hrubozrnné lze vysušit již za 4 hodiny. Po ustálení hmotnosti vzorků (Obr. 26) a vyjmutí ze sušárny jsem znovu vzorky zvážil a užitím následujícího vzorce vypočítal průměrnou vlhkost. Hmotnosti vzorků jsou uvedeny v Příloha A. [15]

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3}$$

- w vlhkost směsi [%]
- m₁ hmotnost vlhkého vzorku a misky [g]
- m₂ hmotnost vysušeného vzorku a misky [g]
- m₃ hmotnost misky [g] [15]

Vlhkost odebrané zeminy: **21,47 %**

Při dalších zkouškách jsem vždy po provedení zkoušky odebral tři vzorky z každého vzorku pro přesné stanovení vlhkosti. Hmotnost se pohybovala kolem 100 až 300 g.



Obr. 26 Vysušené vzorky

4.5. Zrnitost

Zrnitostní zkouškou se získávají nejdůležitější fyzikální vlastnosti zeminy. Výstupem zkoušky je podíl množství jednotlivých velikostí částic k celkové hmotnosti suché směsi, které lze graficky znázornit křivkou zrnitosti. Z křivky lze nepřímo určit namrzavost a propustnost zeminy. Stanovením podílu základních složek zemin (štěrky, písek, jemné částice) se zemina zatřídí do příslušné třídy. Při zkoušce se postupuje dle normy ČSN EN ISO 17892-4, která je součástí skupiny norem o geotechnickém průzkumu.

Rozeznáváme dva způsoby stanovení zrnitosti. Klasická prosévací metoda je vhodná pro zeminy, kde je méně než 10 % částic menších než 0,063 mm. Sedimentační zkouška se využije u zemin s více než 10 % částic menších než 0,063 mm a zároveň maximální velikostí zrna 2 mm. V ostatních případech se kombinují výše zmíněné metody a zkoušky se provádějí nezávisle na sobě. Pro odebranou zeminu bude vhodná kombinovaná zkouška. [16]

4.5.1. Odebraná zemina

Prosévací metoda

Při první zvolené metodě jsem odebral vzorek zeminy a dal jsem ho vysušit v sušárně. Po vysušení jsem zeminu zvážil a smíchal s vodou a nechal jsem ji hodinu odstát, aby se docílilo oddělení jílových částic od zrn. Následně jsem zeminu postupně promýval přes síta 2 a 0,063 mm (Obr. 27). Příklad pro promývání je založen na podobném principu jako při prosévání. Odplavení všech jílovitých částic se pozná, když odtéká průzračná voda. Po promytí jsem síta a mísu promytého vzorku umístil do sušárny. Po vysušení jsem zbytky ze sít přesypal do misky a pokračoval samotnou zkouškou prosévání. [16]



Obr. 27 Promývací zařízení infraTest

Při prosévání se využije normovaná sada sít, jejíž rozsah musí odpovídat zkoušené zemině. Pro svou zkoušku jsem zvolil síta 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0;

2,0; 4,0 a operativně doplněné 5,6; 8,0 mm. Při využití automatické prosévačky (Obr. 28) by měla být doba promíchávání minimálně 10 minut, při ručním 2 minuty. [16]

Po prosetí jsem postupně zvažil zbytky na všech sítích a kontrolně zvažil i celkovou hmotnost. Výstupem je křivka zrnitosti v rozsahu od 0,063 mm. Hmotnosti a propady na jednotlivých sítích jsou v Příloha A. Určení podílu jednotlivých složek štěrkovité (G), písčité (S) a jemnozrnné frakce (F) je hlavním parametrem pro zařídění zeminy a je znázorněno v Tab. 9.



Obr. 28 Prosévací zařízení Haver EML 200 digital T

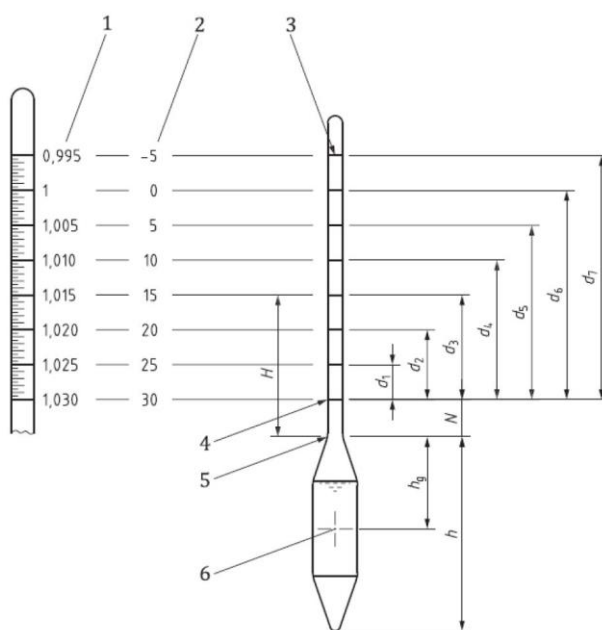
Tab. 9 Podíl jednotlivých frakcí odebrané zeminy

Hmotnost	[g]	0
F	[%]	34,57
S	[%]	61,14
G	[%]	4,29
Zatřídění zeminy	S5	SC

Výsledná zemina se zařídí jako **S5 (písek jílovitý)**. Vzhledem k tomu, že poměr jemných částic je blízký 35 % a výsledky zkoušek z akreditované laboratoře hovoří o vyšším poměru, lze zeminu označit za **F4 (jíl písčitý)**. Určení, zda se jedná o jílovitou, nebo hlinitou zeminu, jsem provedl stanovením konzistenčních mezí v kapitole 4.6.

Hustoměrná metoda

Pro zkoušku je vhodné odebrat 20 až 30 g zeminy v původním stavu. Suchou hmotnost jsem vypočítal ze zjištěné vlhkosti odebrané zeminy. Vzorek jsem smíchal s destilovanou vodou v kuželové baňce a následně nechal převařit po dobu 30 min při teplotě 120 °C (Obr. 30). Po odstátí mohla být zemina promyta přes síto 0,063 mm. Pro promývání jsem použil destilovanou vodu objemu přibližně 800 ml. Zbytky ze síta jsem vložil do sušárny, znovu nechal prosít a zvážil nadsítiné. [16]



Obr. 29 Kalibrace stupnice hustoměru [16]



Obr. 30 Hustoměrná zkouška

Roztok se zeminou jsem přelil do odměrného válce o objemu 1 000 ml (Obr. 30). Vedle odměrného válce se zeminou musí být doplněný druhý s čistou destilovanou vodou pro zjištění referenční hodnoty. Zeminu jsem v odměrném

válci důkladně promíchal, připravil si stopky a zkouška začala. Časy odečtu hodnot byly stanoveny na 0,5; 1; 2; 4; 8; 30 min a 1; 2; 4; 8; 24 hod. Do roztoku jsem vždy vložil hustoměr a odečetl hodnotu na hladině.

Výsledné hodnoty a výpočet jsou uvedeny v Příloha A. Pro stanovení poměru jednotlivých zrn se musí postupovat podle následujícího výpočtu. Původní čtení se upraví dle Obr. 29. Pro získání pravé hodnoty se čtení upraví o teplotu a pro opravené hodnoty o vliv menisku. Poslední potřebnou veličinou pro výpočet je efektivní hloubka, která závisí na použitém hustoměru. Ze získaných hodnot jsem vypočítal náhradní průměr zrn a jejich příslušný poměr. Vzorce pro výpočet hodnot jsou uvedeny v souladu s postupem výpočtu následované potřebnými koeficienty. [16]

Pravé čtení hustoměru

$$R_h = R'_h + C_m$$

- R_h pravé čtení hustoměru
- R'_h odečtené čtení hustoměru
- C_m oprava na meniskus [16]

Efektivní hloubka

$$H_r = -3,5 * R_h + 185,05$$

- H_r efektivní hloubka [mm]
- R_h pravé čtení hustoměru [16]

Náhradní průměr zrna

$$d_i = 0,005\ 531 * \sqrt{\frac{\eta * H_r}{(\rho_s - \rho_w) * t}}$$

- d_i náhradní průměr zrna [mm]
- η dynamická viskozita vody [mPa.s]
- H_r efektivní hloubka [mm]
- ρ_s zdánlivá hustota pevných částic [Mg/m³]
- ρ_w hustota vody v odměrném válci [Mg/m³]
- t čas uplynulý od zahájení sedimentace [min] [16]

Opravené čtení hustoměru

$$R_d = R_h - R_0$$

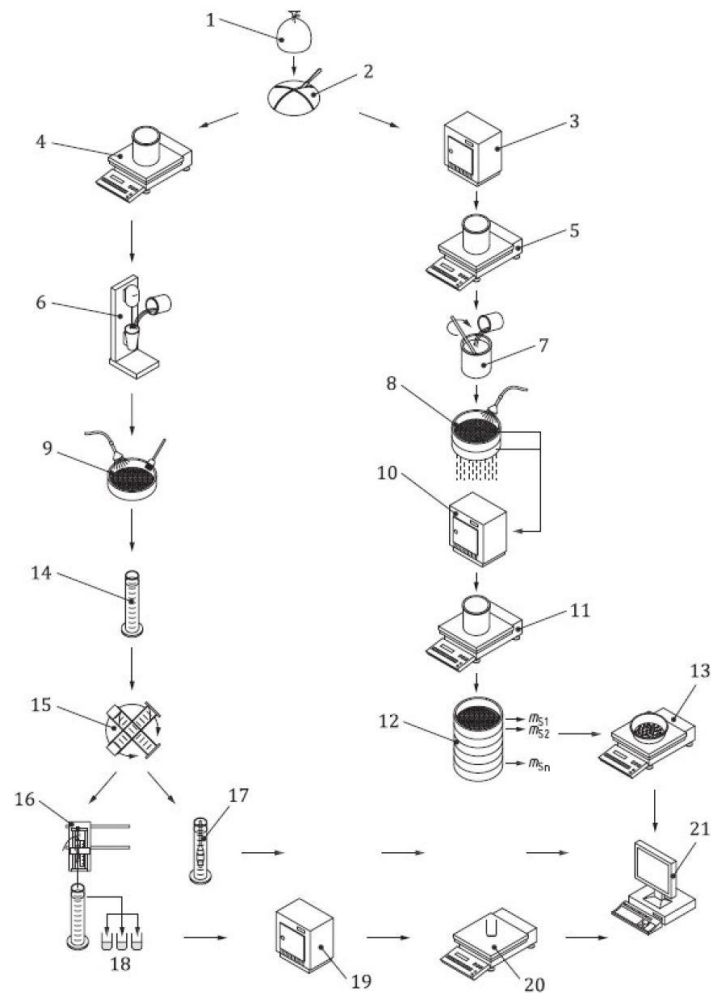
- R_d opravené čtení hustoměru
- R_h pravé čtení hustoměru
- R_0 odečtené čtení v referenčním roztoku [16]

Frakce menší než náhradní průměr zrna

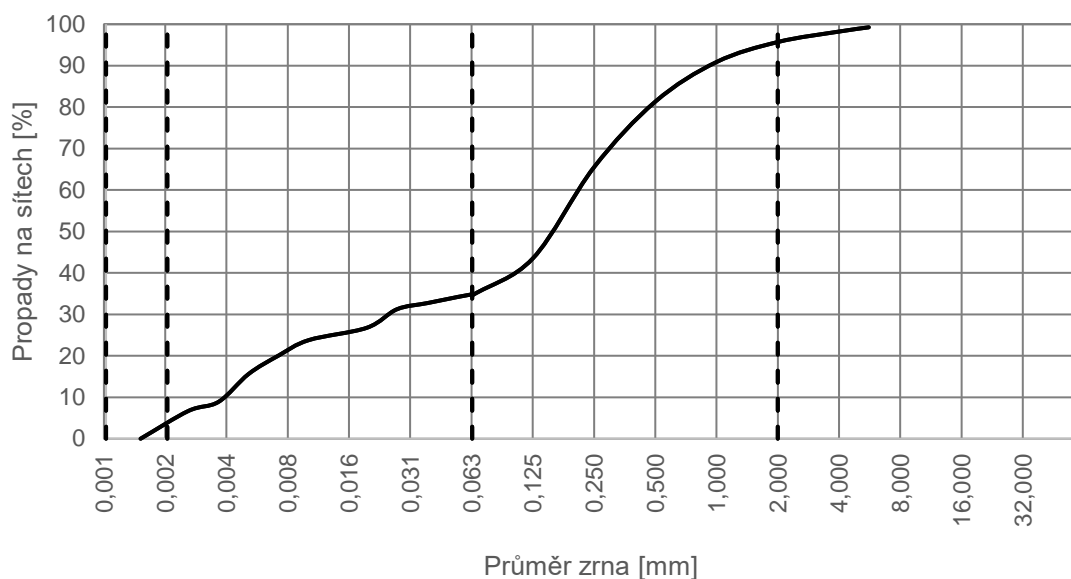
$$K = \frac{100 * \rho_s}{m * (\rho_s - 1)} * R_d$$

- K hmotnostní podíl frakce [%]
- ρ_s zdánlivá hustota pevných částic [Mg/m³]
- m hmotnost suchého vzorku [g]
- R_d opravené čtení hustoměru [mm] [16]

Hodnoty byly vyneseny do Graf 3 společně s výsledky z prosévací zkoušky. Pro sedimentační zkoušku lze použít místo hustoměrné metody i pipetovací metodu. Pro zkoušku navržené zeminy byla využita pouze prosévací metoda. Postup prosévací a hustoměrné zkoušky je znázorněn na Obr. 31.



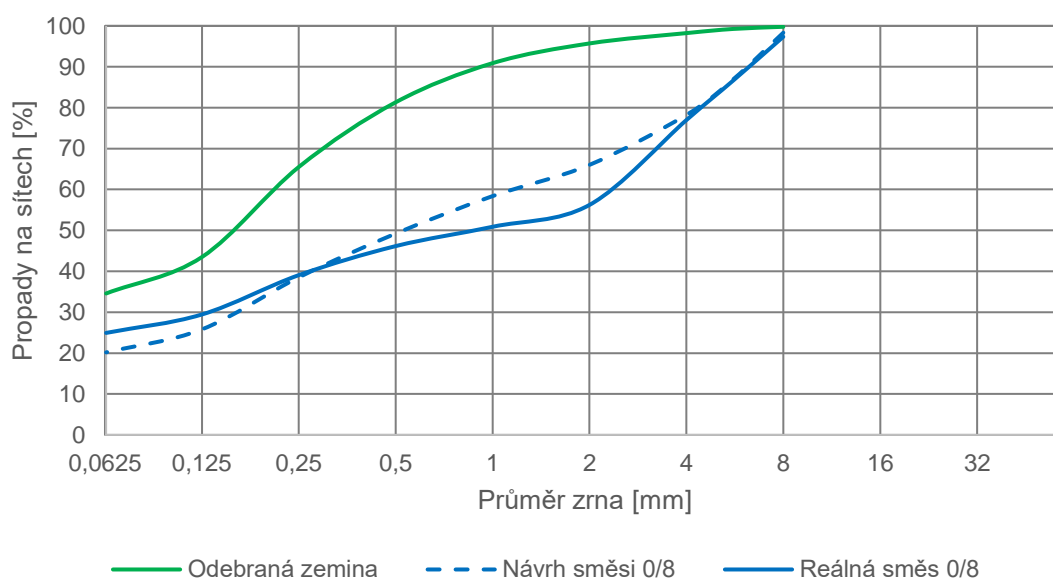
Obr. 31 Prosévací a sedimentační zkouška [16]



Graf 3 Křivka zrnitosti odebrané zeminy

4.5.2. Směs 0/8

Zrnitostní rozbor jsem provedl na vybrané směsi 0/8. Pro zkoušku byla shledána jako postačující prosévací metoda. Během přípravy vzorku mícháním suché zeminy s kamenivem jsem směs navlhčil, abych docílil správného promísení. Odvážil jsem přibližně 1,5 kg vlhké zeminy a dal ji vysušit. Následný postup při promývání, vysušení a prosévání je stejný jako v případě odebrané zeminy. V Graf 4 je znázorněna křivka původní a upravené zeminy v rozsahu 0,063 mm a výše. Mírný odstup od teoretického grafu stanoveného v kapitole 4.2 lze spatřit kolem 2,00 mm.



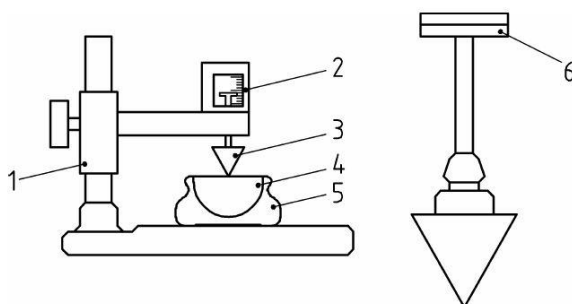
Graf 4 Křivka zrnitosti směsi 0/8

4.6. Konzistence

Plastický stav u jemnozrnných zemin nastává při určitém rozmezí vlhkosti. Stanovení plastického chování lze vymezit na základě konzistenčních mezí, tedy meze plasticity a tekutosti. Mez plasticity je vlhkost, při jejímž překročení přechází zemina do stavu plastického. Po překročení meze tekutosti zemina ztrácí smykovou pevnost a přechází do tekutého stavu. Pro správné zařazení zeminy je nutné znát index plasticity, který odpovídá rozdílu výše zmíněných mezí. Zkoušky se provádí dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12.

Mez tekutosti

Zkouška se provádí za pomoci kuželového přístroje (Obr. 32 a Obr. 34). Kužel se používá v 60 a 80 gramové variantě v závislosti na použité váženice. Pro zkoušku jsem použil první variantu. Po konzultaci jsem přikročil ke zjednodušení a zeminu jsem vysušil a následně prošel přes síto 0,5 mm. Prosetou zeminu jsem rozdělil na čtyři vzorky o hmotnosti přibližně 150 g. Vzorky byly navlhčeny tak, aby jejich konzistence odpovídala plastickému až tekutému stavu (Obr. 33). [18]



Obr. 32 Schéma kuželového přístroje [18]

Tab. 10 Hodnota penetrace v závislosti na kuželu [18]

Kužel	60 g / 60° [mm]	80 g / 30° [mm]
rozsah penetrace	7 - 15	15 - 20
hloubka penetrace při w_L	10	20

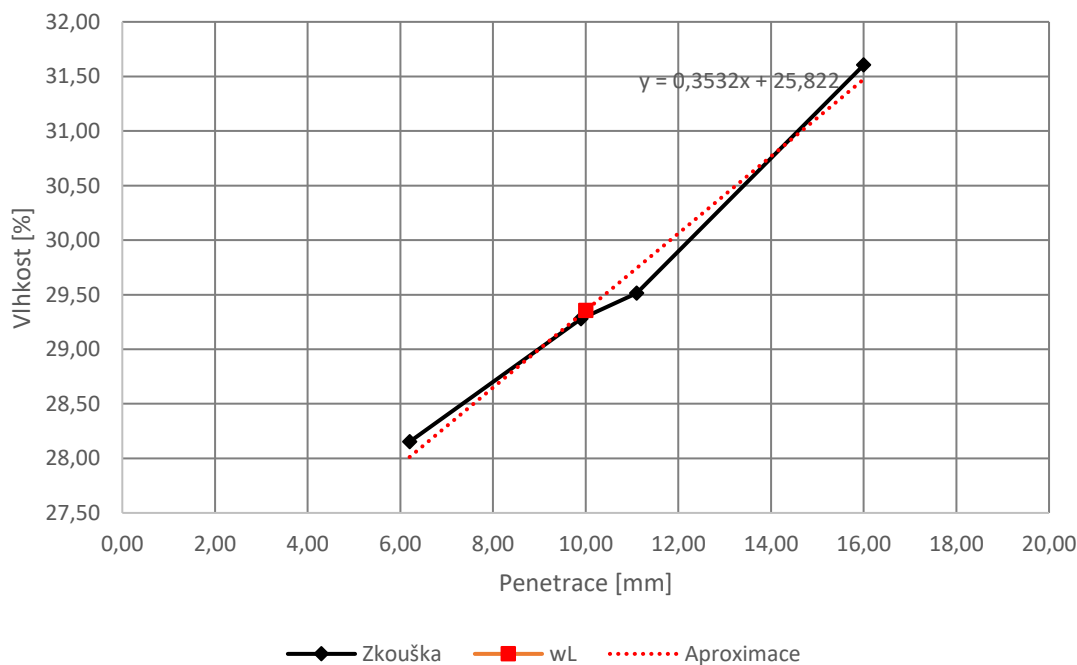


Obr. 33 Vzorky pro zkoušku meze tekutosti

Vzorky postupně podstoupily zkoušku, kdy jsem navlhčenou zeminu vložil do váženky, povrch urovnal, uložil do kuželového přístroje a nastavil hrot na povrch. Kužel se uvolní a následně po 5 ± 1 s se zastaví. Výslednou penetraci jsem odečetl z přístroje a následně dal vzorky vysušit do sušárny pro stanovení vlhkosti. Penetrace odpovídala hodnotám v Tab. 10.



Obr. 34 Herzog Penetrometer



Graf 5 Hodnoty penetrace a vlhkosti při stanovení meze tekutosti

Výsledky jsou vyneseny do Graf 5, který jsem proložil lineární křivkou a určil hodnotu odpovídající penetraci 10 mm.

Vlhkost na mezi tekutosti: **29,35 %**

Mez plasticity

Zemina byla vyrobena stejným způsobem, ale s nižší vlhkostí. Odebral jsem malý vzorek zeminy, začal hníst a válet rukou, kdy se zemina postupně vysoušela. Postupným válením jsem dostal vzorek do stavu, kdy docházelo k porušení válečku průměru 3 mm po přibližně 1 cm (Obr. 35). Rozpraskané zbytky válečků jsem posbíral a vložil do sušárny. Postupně jsem dal sušit tři rozdílné vzorky. [18]

Vlhkost na mezi plasticity: **13,98 %**



Obr. 35 Válení zeminy

Stanovením meze tekutosti a plasticity lze určit index plasticity, stupeň tekutosti a stupeň konzistence. Z hodnoty indexu plasticity a vlhkosti při mezi tekutosti lze určit, zda v zemině převládá jíl, nebo hlína. Dále se stanoví samotná plasticita a konzistence zeminy. [18]

Index plasticity

$$I_P = W_L - W_P = 29,35 - 13,98 = \mathbf{15,37 \%}$$

$$I_{PL} = 0,73 \times \left(\frac{W_L - 20}{W_L - W_P} \right) = 6,83$$

$$I_P > I_{PL} \quad \mathbf{JÍL}$$

PLASTICITA NÍZKÁ

Stupeň tekutosti

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P} = \frac{21,47 - 13,98}{29,35 - 13,98} = \mathbf{0,49}$$

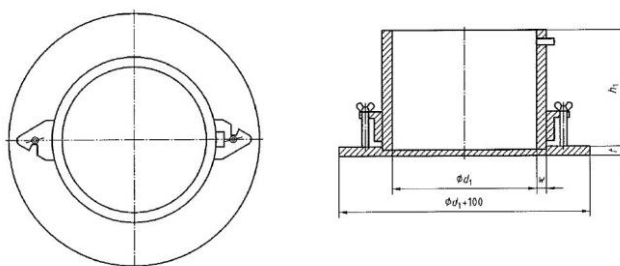
Stupeň konzistence

$$I_C = \frac{W_L - W}{W_L - W_P} = \frac{29,35 - 21,47}{29,35 - 13,98} = \mathbf{0,51}$$

TUHÁ

4.7. Proctor Standard

Principem zkoušky Proctor Standard je stanovení optimální vlhkosti, při které má zemina maximální objemovou hmotnost. Při zkoušce se využije moždíře a pěchu. Postup zkoušení je popsán normou ČSN EN 13286-2. Moždíř se skládá ze samotné nádoby, snímatelné ocelové základní desky a snímatelného nástavce (Obr. 36). Jsou tři základní velikosti moždířů (Obr. 37) a tři druhy pěchů, které se rozlišují hmotností, průměrem a výškou dopadu dle Tab. 12. Výběr správné kombinace je závislý na zrnitostním rozboru zeminy a je znázorněn v Tab. 11. Kromě standardní rozeznáváme i modifikovanou zkoušku. Liší se typem pěchu, počtem vrstev a úderů.



Obr. 36 Půdorys a řez moždířem [4]

Tab. 11 Výběr moždíře dle maximální velikosti zrn [4]

Proctorův moždíř	d [mm]	h [mm]	Maximální velikost zrn kameniva [mm]
A	100±1	120±1	16
B	150±1	120±1	31,5
C	250±1	200±1	63

Tab. 12 Hutnění při zkoušce Proctor Standard [4]

Moždíř		A	B	C
Hmotnost pěchu	[kg]	2,5	2,5	15
Průměr pěchu	mm	50	50	125
Výška dopadu	mm	305	305	600
Počet vrstev		3	3	3
Počet úderů na vrstvu		25	56	22
Hutnící energie	[MJ/m ³]	0,5952	0,5926	0,5935



Obr. 37 Moždíře A; B; C

4.7.1. Odebraná zemina

Pro zkoušku zeminy z ŽST Lysá nad Labem je vhodný úzký moždíř typu A (průměr válce 100 mm; výška 120 mm) a pěch typu A (hmotnost 2,5 kg). Cílem zkoušky je stanovení optimální vlhkosti směsi, které spočívá v přípravě minimálně 5 vzorků s odlišnou vlhkostí. [4]

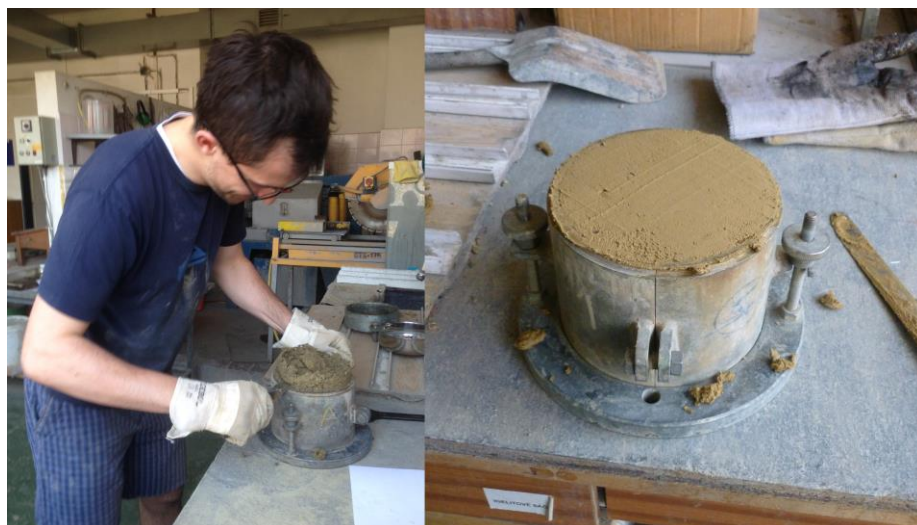
Celkovou potřebnou hmotnost zeminy jsem stanovil na přibližně 12,5 kg v suchém stavu. Zkoušenou zeminu jsem vysušil v sušárně, rozmělnil v hmoždíři a rozdělil na pět vzorků o hmotnosti 2,5 kg. Vzorky jsem promíchal s odlišným množstvím vody tak, aby rozdíl jejich vlhkosti byl přibližně 2 %. Dávkování vody jsem stanovil na 200; 250; 300; 350; 400 ml. Vzorky jsem nechal před hutněním v uzavřených nádobách pro dosažení rovnoměrného rozložení vlhkosti. [4]



Obr. 38 infraTest Universal Soil Compactor 100 + 150 mm

K formě jsem připevnil ocelovou desku a následně zvažil. Osadil jsem nástavec a uložil do zařízení na hutnění dle Proctor Standard. Zemina byla ukládána do moždíře postupně do třech vrstev a vždy se zhutnila 25 úderů pěchu z výšky 305 mm (Obr. 38). Po hutnění jsem odebral snímatelný nástavec a povrch zarovnal do roviny ocelovým urovňovacím pravítkem (Obr. 39). Vzorek

jsem zvážil a získanou hmotnost jsem dosadil do vzorce pro objemovou hmotnost vlhké směsi. V průběhu zkoušky jsem operativně vyrobil ještě jeden vzorek s vyšší vlhkostí, který jsem po ustálení podrobil dodatečné zkoušce. [4]



Obr. 39 Srovnání povrchu po hutnění [29]

Objemová hmotnost vlhké směsi

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

- ρ objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m³]
- m_2 hmotnost moždíře a základní desky [g]
- m_1 hmotnost moždíře, základní desky a směsi [g]
- V objem moždíře [cm³] [4]

Objemová hmotnost suché směsi

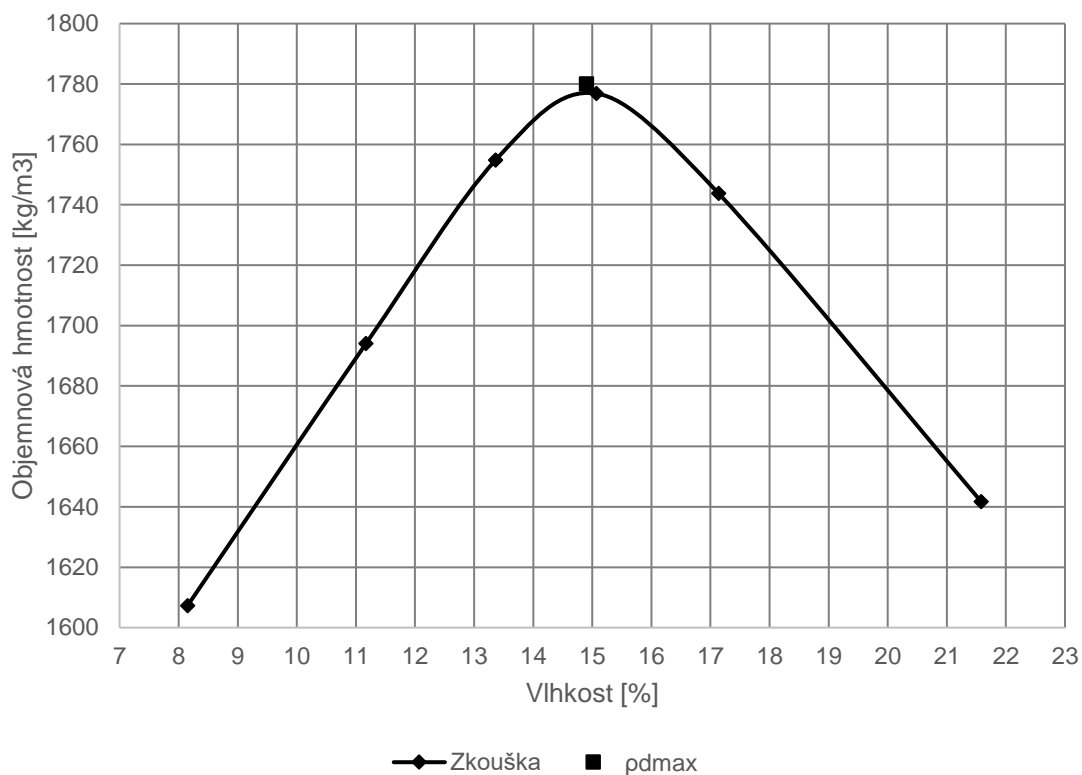
$$\rho_d = \rho \times 100 / (100 + w)$$

- ρ_d objemová hmotnost zhutněné suché směsi [kg/m³]
- w vlhkost směsi [%]
- V objem moždíře [cm³] [4]

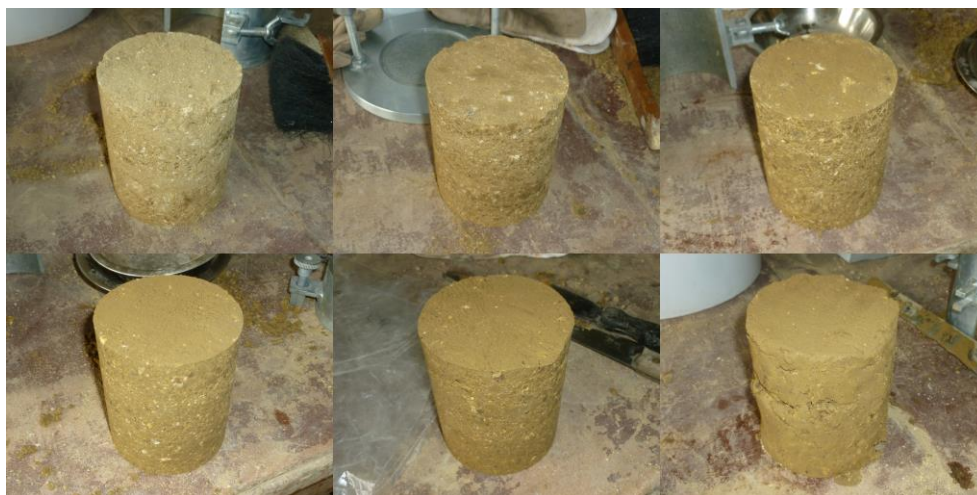
Pro stanovení suché objemové hmotnosti je třeba znát aktuální vlhkost vzorku. Zeminu jsem vyjmul z formy, rozříznul a přibližně ze středu jsem odebral tři vzorky (Obr. 43). Postup je stejný jako u stanovení vlhkosti po odtěžení zeminy a je popsán v kapitole 4.4. Výsledná vlhkost se dosadí do vzorce a objemová hmotnost se vynese do grafu. Výše popsaný postup jsem aplikoval pro všechny vzorky zobrazené na Obr. 40. Vrchol vzniklé křivky v Graf 6 odpovídá maximální objemové hmotnosti zeminy za odpovídající vlhkosti. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Příloha A.

Maximální objemová hmotnost: **1780 kg/m³**

Optimální vlhkost: **14,90 %**



Graf 6 Proctor Standard odebrané zeminy



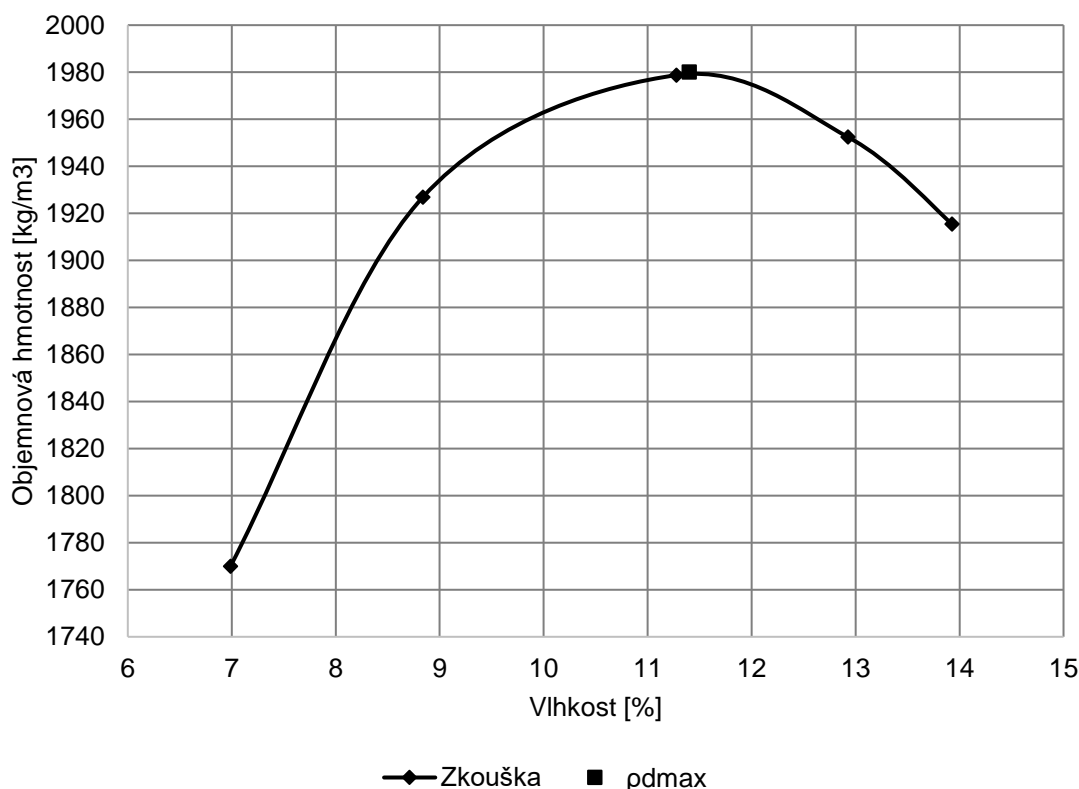
Obr. 40 Vzorky zkoušky Proctor Standard odebrané zeminy

4.7.2. Směs 0,125/4

Postup zkoušky byl stejný jako v předešlém případě včetně zvoleného moždíře a pěchu. Pro výrobu vzorků jsem potřeboval celkem 10 kg směsi pro 4 vzorky. Výroba se skládá z 5 kg odebrané zeminy a 5 kg kameniva 0,125/4, které jsem upravil z původní 0/4 proséváním. Přimísením kameniva jsem očekával snížení vlhkosti na hodnotu přibližně 10 %. Vzorky jsem navlhlčil na 150; 200; 250; 300 ml a nechal odstát. Po proběhnutí zkoušky jsem doplnil navíc jeden vzorek. Hodnoty vstupů a výstupů zkoušek směsi 0,125/4 jsou uvedeny v Příloha B a Graf 7. Vzorky po vyjmutí z formy jsou na Obr. 41.

Maximální objemová hmotnost: **1980 kg/m³**

Optimální vlhkost: **11,40 %**



Graf 7 Proctor Standard směsi 0,125/4



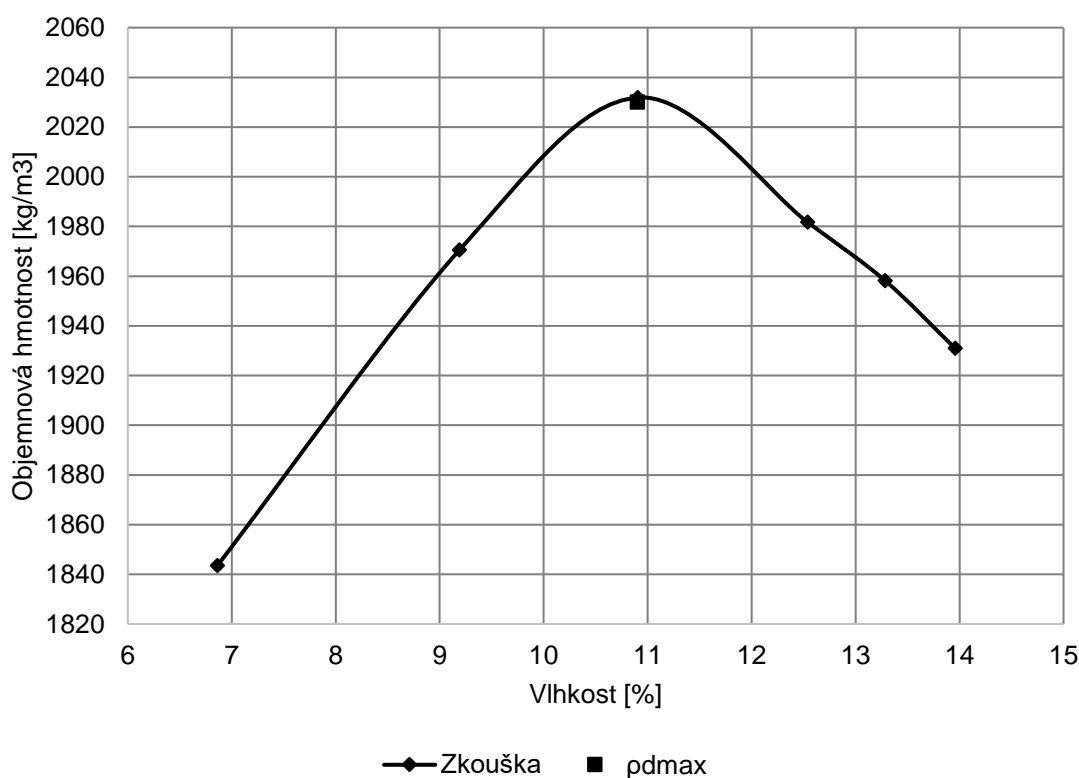
Obr. 41 Vzorky zkoušky Proctor Standard směsi 0,125/4

4.7.3. Směs 0/8

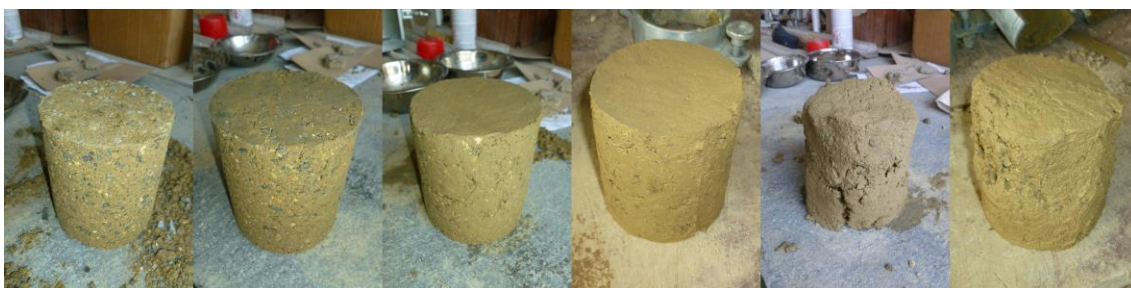
Princip zkoušky i navlhčení jsem zvolil obdobně. Celkem bylo použito 6 vzorků. Pro smíchání 10 kg směsi jsem potřeboval 5 kg zeminy, 3 kg kameniva 0/4 a 2 kg 4/8. Optimální vlhkost jsem očekával díky použití frakce 4/8 mírně nižší než u směsi 0,125/4. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Příloha C a Graf 8. Vzorky po vyjmutí z formy před jsou znázorněny na Obr. 42.

Maximální objemová hmotnost: **2030 kg/m³**

Optimální vlhkost: **10,90 %**



Graf 8 Proctor Standard směsi 0/8



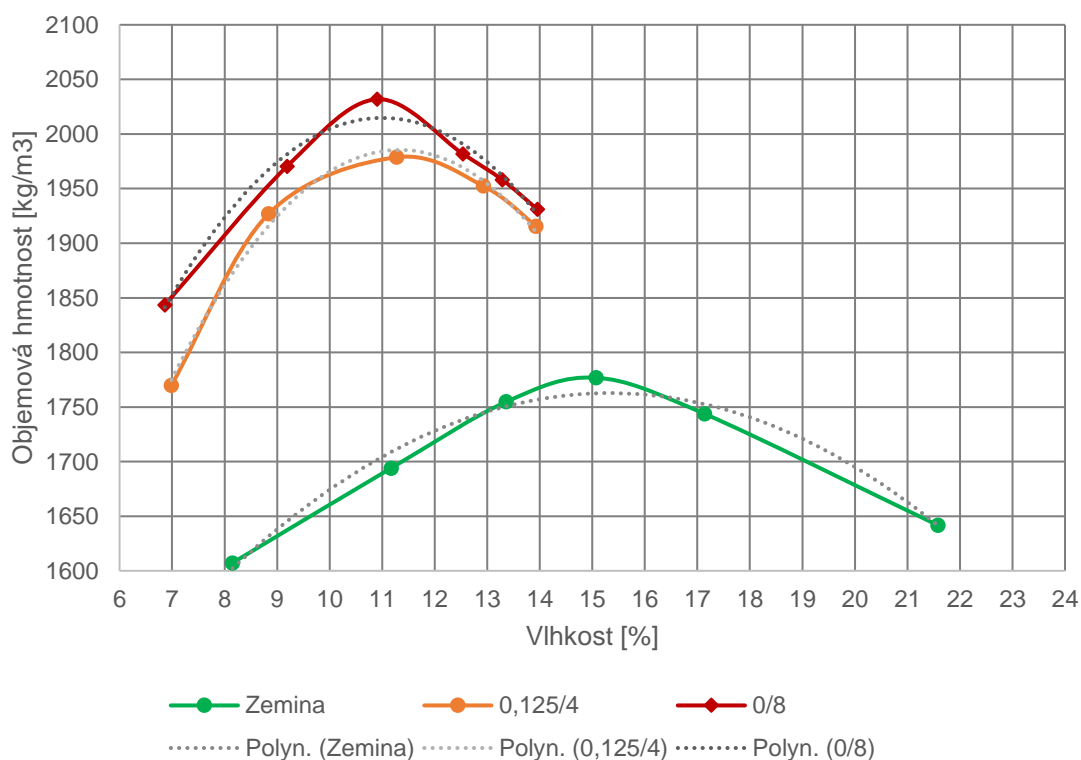
Obr. 42 Vzorky zkoušky Proctor Standard směsi 0/8



Obr. 43 Vzorky v sušárně při zkoušce Proctor Standard

4.7.4. Porovnání

Z výsledků zkoušek lze na Graf 9 vidět, že oproti jemnozrnným zeminám mají hrubozrnné zeminy nižší optimální vlhkost a vyšší objemovou hmotnost. Křivky jsou proloženy kvadratickými polynomy. Získané optimální vlhkosti jednotlivých variant jsou stěžejní pro další zkoušky.



Graf 9 Porovnání zkoušek Proctor Standard

4.8. Poměr únosnosti CBR a IBI

Kalifornský poměr únosnosti (California bearing ratio) CBR určuje poměr síly potřebné k zatlačení penetrační jehly do předepsané hloubky vzorku zeminy vůči síle potřebné k zatlačení jehly do stejné hloubky u normovaného kameniva. Poměr únosnosti CBR byl vyvinut před druhou světovou válkou v Kalifornii. Za normované kamenivo označujeme drčený vápenec v Kalifornii, jehož hodnota CBR se rovná 100 %. Pro zlepšené zeminy se vyžaduje poměru 10%, v případě dosažení 47% se jedná o zeminu nenamrzavou. Index se stanovuje s použitím zatěžovacího prstence a ve většině případů po době zrání. Okamžitý poměr únosnosti (Immediate bearing ratio) IBI se určuje ihned a bez použití prstence. [1] [6]

4.8.1. Odebraná zemina

Okamžitý index únosnosti IBI

Ke zkoušce jsem navlhčil po domluvě dva vzorky na -2 a 0 % oproti optimální vlhkosti. Nižší vlhkost byla zvolena, protože odebraná zemina dosahuje vyšší únosnosti IBI při nižší vlhkosti než optimální. Pro jeden vzorek bylo potřeba přibližně 6 kg zeminy. Příprava vzorku se provádí za pomoci Proctorovy formy typu B a pěchu A dle ČSN EN 13286-2 (Obr. 44). Postup pro hutnění je stejný jako u zkoušky Proctor Standard a byl popsán v kapitole 4.7. Výsledné zkušební vzorky jsem ponechal ve formě. [6]

Ke zkoušce jsem přistoupil ihned po hutnění a stanovil index IBI. Tělesa jsem postupně vložil do lisu, na vrch položil válcový penetrační trn o průměru 50 ± 5 mm (Obr. 47). Vzorek jsem neotočil z důvodu možnosti využít jeden vzorek pro zkoušky CBR i IBI. Výsledná hodnota indexu IBI může mít rozptyl v řádech 1-2 %, neboť seříznutím svrchní vrstvy nelze zaručit vždy stejný výsledek. [6]

Tab. 13 Počáteční síla na lisu při zkoušce CBR a IBI [6]

Hodnota CBR/IBI	Počáteční síla [N]
< 5 %	10
5 % <	40

Přístroj jsem vynuloval v rozmezí, když působil silou 10 až 40 N dle Tab. 13 a poté rychlostí $1,27 \pm 0,2$ mm/min zatěžoval vzorek zeminy. Zaznamenával jsem do Graf 10 hodnotu síly po 0,5 mm do 10 mm. Výsledný poměr CBR a IBI je vztažen k vyššímu poměru penetrační síly vůči normovaným silám dle Tab. 14. Při zkoušce lineárního bobtnání popsané v kapitole 4.9.1 jsem před sycením provedl taktéž zkoušku IBI při optimální vlhkosti. [6]

Tab. 14 Normované síly pro zkoušku CBR a IBI [6]

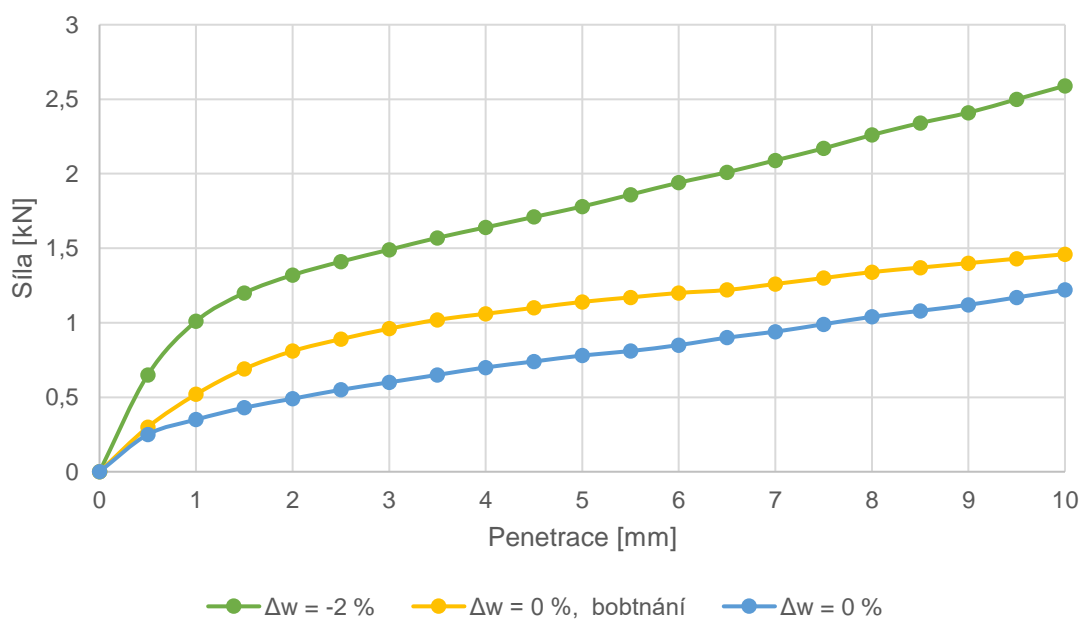
Penetrace [mm]	Normovaná síla [kN]
2,5	13,2
5	20

$$CBR/IBI = \frac{F}{F_s} \times 100$$

- CBR/IBI poměr únosnosti CBR/IBI [%]
 - F naměřená síla [kN]
 - F_s normovaná síla [kN]
- [6]



Obr. 44 Odebraná zemina IBI, $\Delta w = 0\%$



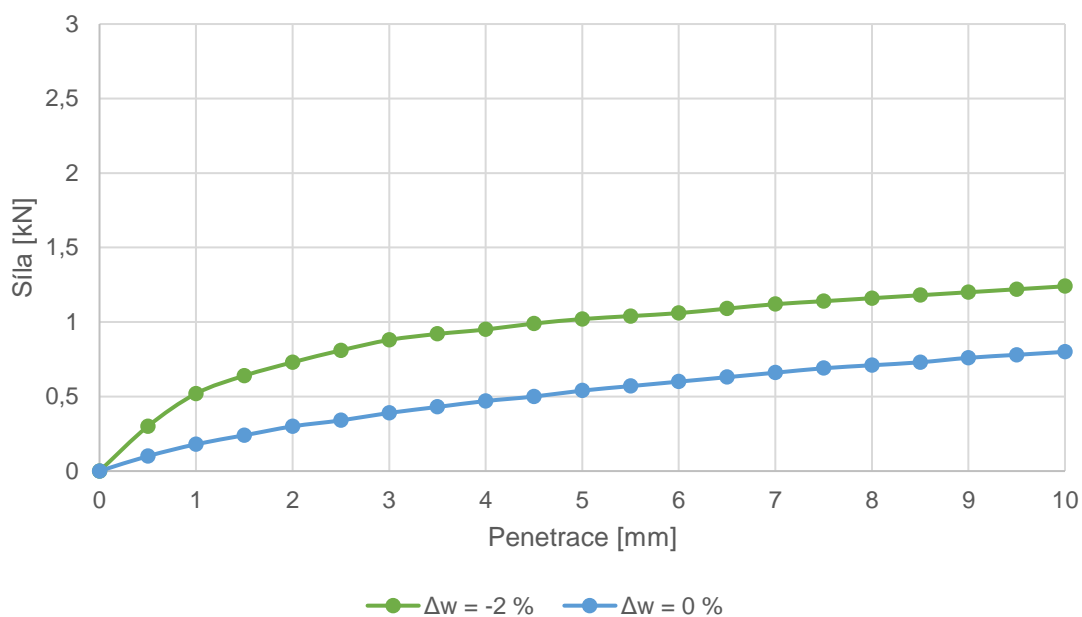
Graf 10 IBI odebrané zeminy

Kalifornský poměr únosnosti CBR

Po provedené zkoušce IBI jsem od tělesa odmontoval podložku a z druhé strany, kde probíhalo zatěžování při zkoušce IBI, jsem připevnil děrovanou podkladní desku. Následně bylo těleso otočeno a z druhé strany, která byla původně spodní při zkoušce Proctor Standard a IBI, jsem položil druhou menší děrovanou podložku s přitěžovacím prstencem o hmotnosti 2,5 kg. [6]

Těleso může zrát při zamezení odpařování, při plném nasycení, nebo kombinací výše zmíněných. Pro zkoušku bylo zvoleno plné nasycení. Těleso jsem ponořil do vodní lázně při teplotě $+20\pm 2$ °C na dobu 96 hodin, tj. 4 dny. [6]

Po vyjmutí z vody a okapání jsem odstranil děrované podložky, přitěžovací prsteneček a navrátil původní podkladní desku, ale z druhé strany, kde probíhala zkouška IBI. Po vložení do lisu jsem na vzorek položil zpět přitěžovací prsteneček a dále postupoval jako při zkoušce IBI (Obr. 45). Postup u druhého vzorku byl stejný. Po zkoušce CBR jsem vždy odebral tři vzorky pro stanovení vlhkosti. Naměřené hodnoty sil a vlhkosti dle křivky Proctor Standard jsou znázorněny v Příloha A a Graf 11.



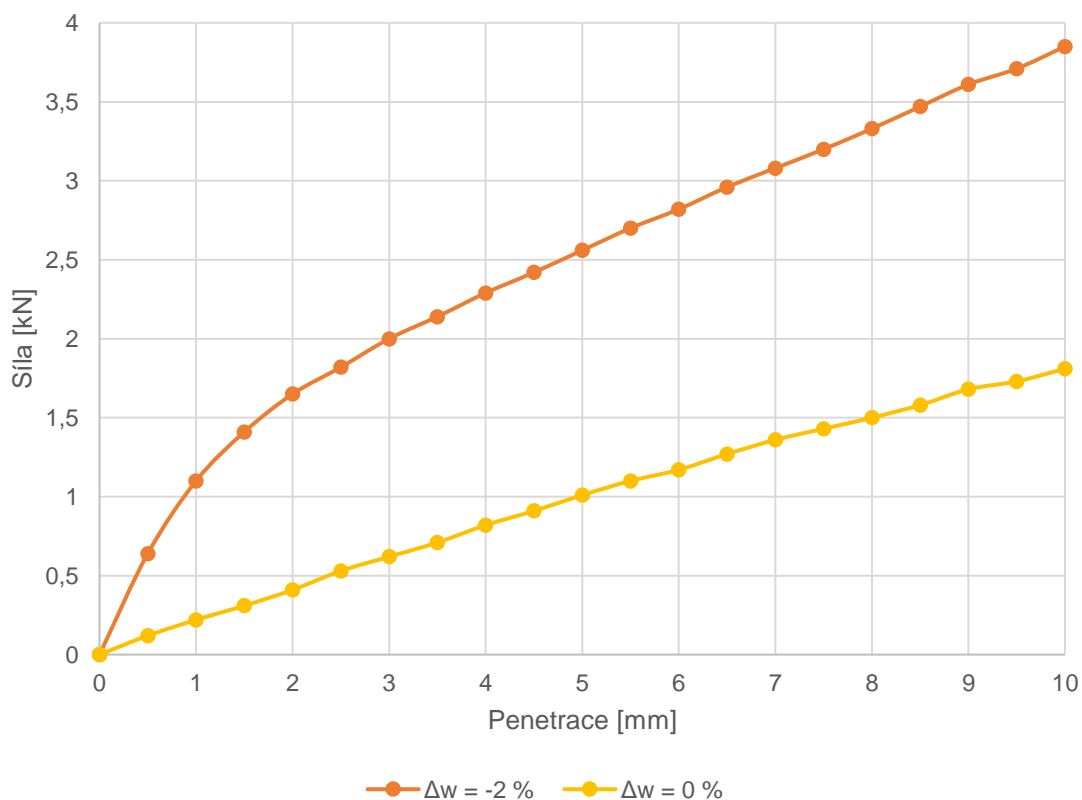
Graf 11 CBR odebrané zeminy



Obr. 45 Odebraná zemina CBR, $\Delta w = -2\%$

4.8.2. Směs 0,125/4

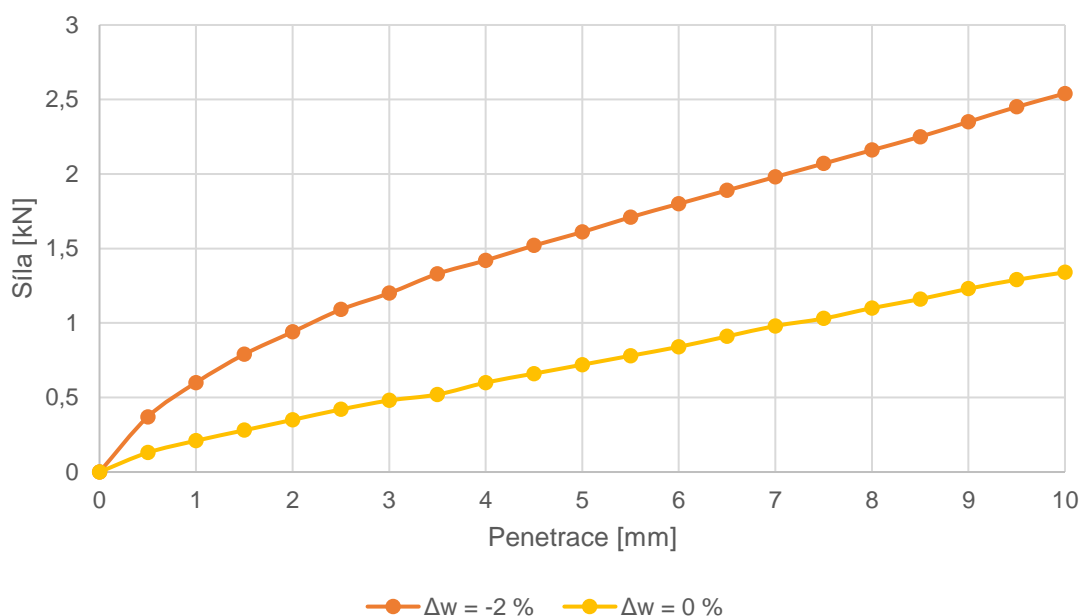
Postup zkoušek je stejný jako u odebrané zeminy (Obr. 46). Potřebné množství materiálu pro jeden vzorek je 6 kg (3 kg zemina; 3 kg kamenivo 0,125/4). Vzorky jsem navlhčil na -2 a 0% oproti optimální vlhkosti. Hodnoty sil a jednotlivé vlhkosti vzorků jsou uvedeny v Příloha B, Graf 12 a Graf 13.



Graf 12 IBI směsi 0,125/4



Obr. 46 Směs 0,125/4 CBR, $\Delta w = -2$; 0 %



Graf 13 CBR směsi 0/8

4.8.3. Směs 0/8

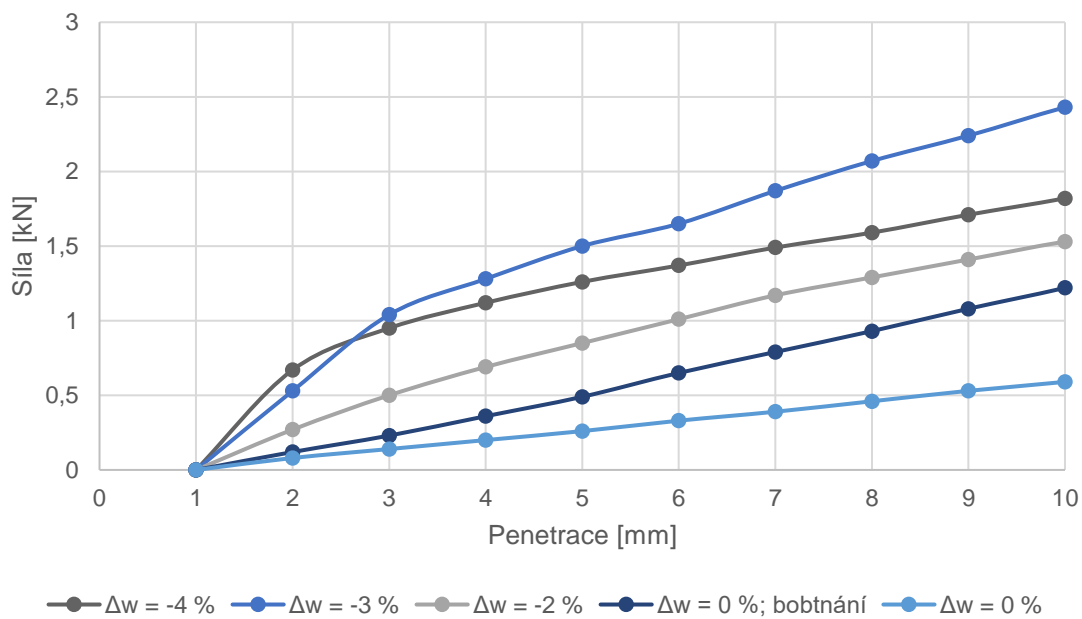
Vzhledem k tomu, že směs 0/8 byla vybrána pro zlepšení, připravil jsem vzorky -4; -3; -2; 0 % oproti optimální vlhkosti (Obr. 48). Postup u zkoušek byl stejný jako v předešlých případech (Obr. 49). Potřebné množství směsi na jeden vzorek je 6 kg (3 kg zemina; 1,8 kg kamenivo 0/4; 1,2 kg kamenivo 4/8). Lineární bobtnání je obsaženo v kapitole 4.9.2. Protokoly laboratorních zkoušek jsou uvedeny v Příloha C, Graf 14 a Graf 15.



Obr. 47 Zkušební lis Strassentest FHF



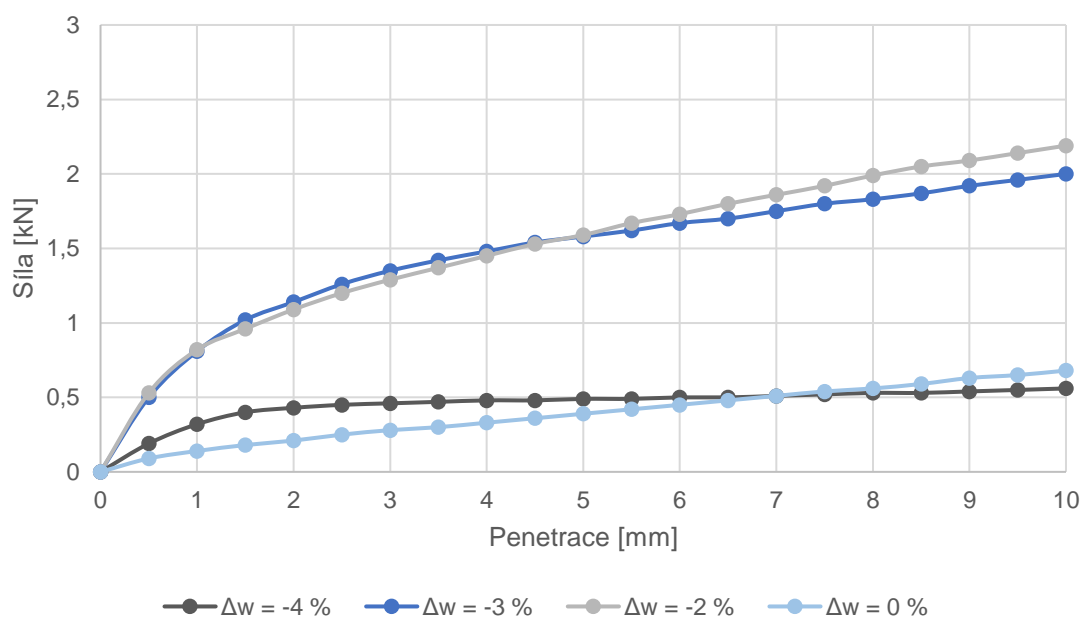
Obr. 48 Směs 0/8 IBI, $\Delta w = -4; -3; -2; 0\%$



Graf 14 IBI směsi 0/8



Obr. 49 Směs 0/8 CBR, $\Delta w=0\%$



Graf 15 CBR směsi 0/8

4.8.4. Porovnání

Pro výběr vhodné směsi jsem u odebrané zeminy a obou navržených variant vyrobil vzorky o vlhkosti -2 a 0 % oproti optimální vlhkosti. Nižší vlhkost, než optimální byla zvolena, protože při zkouškách IBI zemina dosahuje vyšší pevnosti při vlhkosti mezi -2 a -4 % oproti optimální vlhkosti. Naopak při mírném převlhčení za optimem pevnost prudce klesá.

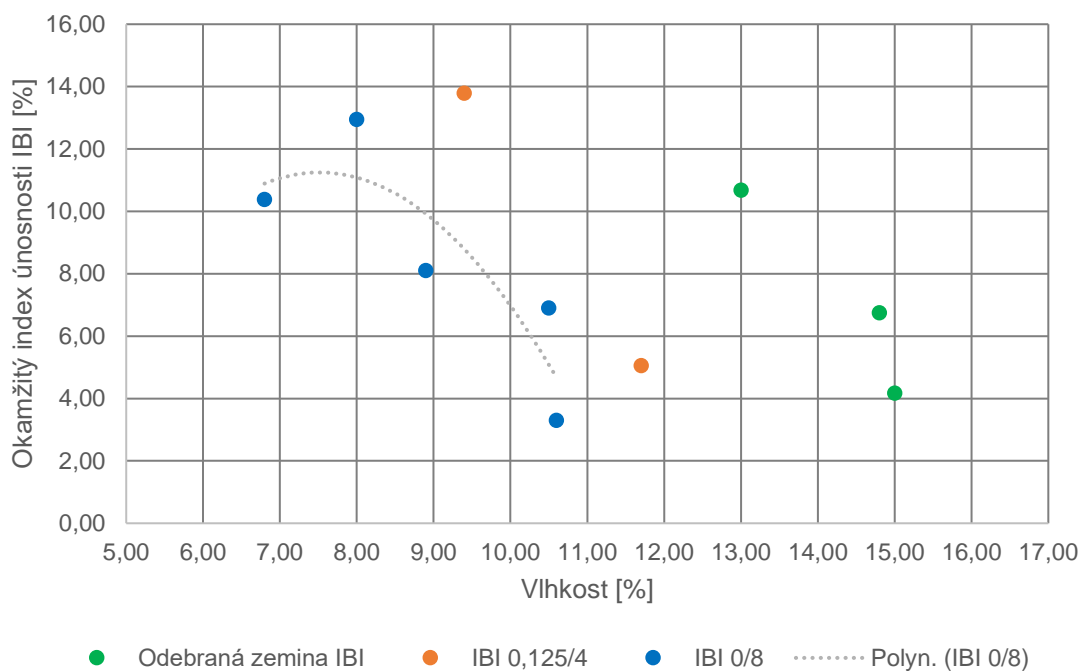
Porovnání naměřených hodnot CBR a IBI poukazuje na to, že mechanická úprava odebrané zeminy není vhodná volba. Směsi 0,125/4 a 0/8 dosahují relativně stejných hodnot jako odebraná zemina. Požadovaných hodnot dle SŽDC S4 nelze samostatnou mechanickou úpravou dosáhnout. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce bylo přistoupeno k úpravě směsi 0/8. Samotná její

příprava je praktičtější, neboť se nemusí odstraňovat frakce pod 0,125 mm proséváním. Přímá úprava dovezeným kamenivem byla shledána jako nejvhodnější. U vybrané varianty 0/8 jsem navíc doplnil vzorky navlhčené na -4 a -3 % oproti optimální vlhkosti.

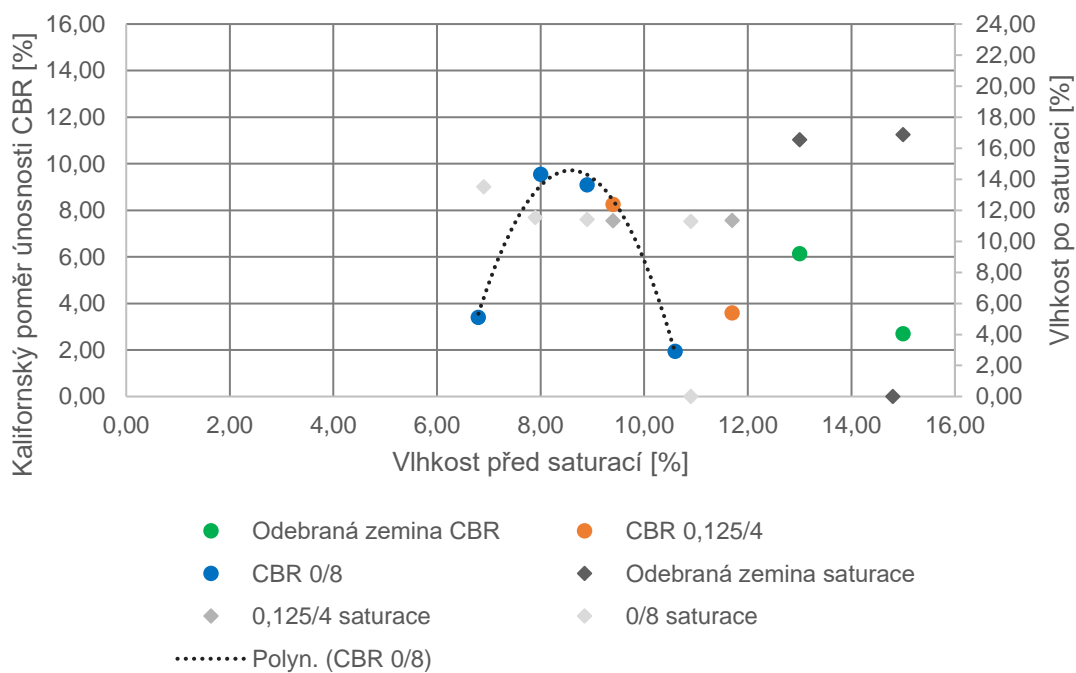
Následující Tab. 15, Graf 16 a Graf 17 ukazují vzájemné rozdíly. Podrobné hodnoty jsou zaznamenány v přílohách jednotlivých zkoušek. V tabulkách je znázorněna vlhkost vzorku, která vychází z křivky zkoušky Proctor Standard, okamžitý index únosnosti IBI, vlhkost po saturaci a kalifornský poměr únosnosti CBR. U vzorků s nižší vlhkostí lze sledovat, že během saturace se jejich vlhkost zvýšila na optimální, ale výsledná únosnost CBR je rozdílná a vyšší oproti optimální. U směsi 0/8 jsou hodnoty proloženy kvadratickým polynomem.

Tab. 15 Porovnání CBR a IBI

$\Delta W_{\text{navrhnutá}}$	[%]	-4,00	-3,00	-2,00	0,00	0,00	
ODEBRANÁ ZEMINA					W_{opt}	[%]	14,90
$W_{\text{navrhnutá}}$	[%]			12,90	14,90	14,90	
$W_{\text{dle PS}}$	[%]			13,00	14,80	15,00	
ΔW	[%]			0,10	-0,10	0,10	
IBI	[%]			10,68	6,74	4,17	
W_{saturace}	[%]			16,55	lineární	16,87	
ΔW	[%]			3,65	bobtnání	1,97	
CBR	[%]			6,14		2,70	
SMĚS 0,125/4					W_{opt}	[%]	11,40
$W_{\text{navrhnutá}}$	[%]			9,40		11,40	
$W_{\text{dle PS}}$	[%]			9,40		11,70	
ΔW	[%]			0,00		0,30	
IBI	[%]			13,79		5,05	
W_{saturace}	[%]			11,34		11,36	
ΔW	[%]			1,94		-0,04	
CBR	[%]			8,26		3,60	
SMĚS 0/8					W_{opt}	[%]	10,90
$W_{\text{navrhnutá}}$	[%]	6,90	7,90	8,90	10,90	10,90	
$W_{\text{dle PS}}$	[%]	6,80	8,00	8,90	10,50	10,60	
ΔW	[%]	-0,10	0,10	0,00	-0,40	-0,30	
IBI	[%]	10,38	12,95	8,10	6,90	3,30	
W_{saturace}	[%]	13,51	11,54	11,41	lineární	11,29	
ΔW	[%]	6,61	3,64	2,51	bobtnání	0,39	
CBR	[%]	3,41	9,55	9,09		1,95	



Graf 16 Porovnání IBI



Graf 17 Porovnání CBR

V Graf 17 jsou šedými body označeny hodnoty vlhkosti po saturaci odpovídajících vzorků.

4.9. Lineární bobtnání

Bobtnání zemin je jev, při kterém jemnozrná zemina nasává vodu a následně zvětšuje svůj objem. K bobtnání nemusí dojít jen přisunem vody, ale i odlehčením. Dle ČSN EN 14227-15 se rozlišuje lineární a objemové bobtnání.

Lineární bobtnání je součástí zkoušky CBR, kdy se při syčení vzorku ve vodě měří vertikální posun vrchní děrované podložky s přitěžovacím prstencem. Vlivem uložení tělesa ve formě je umožněno roztahování směsi pouze v ose válcového tělesa. Příprava tělesa byla popsána u zkoušky CBR a řídí se taktéž normou ČSN EN 13268-47. Pro zkoušky zemin byla zvolena metoda lineárního bobtnání. [6]

Objemové bobtnání sleduje změny rozměrů ve všech směrech a řídí se normou ČSN EN 13268-49.

4.9.1. Odebraná zemina

U odebrané zeminy jsem přistoupil k měření bobtnání na zvláštním vzorku navlhčeném na optimální vlhkost a za použití 6 kg zeminy. Provedl jsem zkoušku IBI, která je znázorněna v kapitole 4.8.1, a těleso bylo ponecháno k nasycení po dobu 10 dní (Obr. 51). Na formu bylo připevněno měřicí zařízení (Obr. 50). Původně jsem počítal s delším časem, ale vzhledem k tomu, že se vertikální posun zastavil, mohla být zkouška ukončena dříve. Těleso bylo ponořeno do vodní lázně při teplotě $+20\pm 2$ °C. Výsledný průběh bobtnání je znázorněn v grafu společně s upravenou zeminou. [6]

4.9.2. Směs 0/8

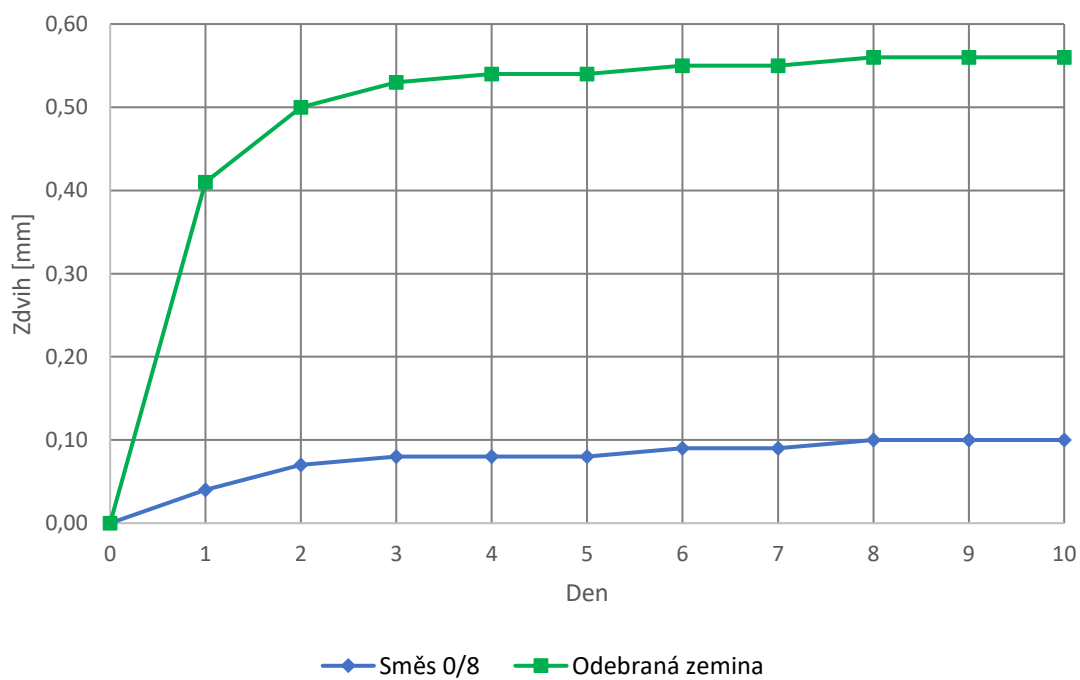
Upravenou zeminu jsem připravil stejným způsobem a nechal sytit po stejnou dobu, tj. 10 dní. Zkouška IBI je znázorněna v kapitole 4.8.3. Po vyjmutí tělesa směsi 0/8 i odebrané zeminy jsem zkoušku CBR neprováděl.



Obr. 50 Měřicí zařízení Mitutoyo Absolute



Obr. 51 Zkouška lineárního bobtnání



Graf 18 Lineární bobtnání

Z výsledků zkoušek v Graf 18 je patrné, že u upravené zeminy je bobtnání nižší. Ustálení zdvihu nastalo u obou vzorků přibližně ve čtvrtý den zkoušky.

4.10. Pevnost v tlaku

Určení pevnosti v tlaku je jedním z požadavků stabilizovaných zemin. Zkušební těleso je plynule zatěžováno až do porušení, z maximální síly se stanoví pevnost v tlaku.

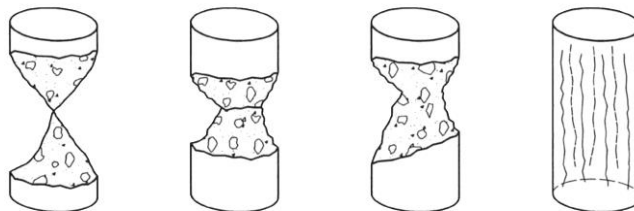
Ke zkoušce jsem vyrobil tři vzorky o celkové hmotnosti přibližně 7,5 kg zeminy. Vzorky jsem vyrobil v Proctorově formě typu A a pěchu A dle ČSN EN 13286-2. Vzorky byly navlhčeny na -4; -2; 0 % oproti optimální vlhkosti. Postup hutnění je stejný jako v předešlých zkouškách a byl popsán v kapitole 4.7. [5]

Při užití hydraulicky stmelené směsi se musí tělesa minimálně 1 den uchovat ve formách při teplotě $+20\pm 5$ °C a dále 27 dní mimo formu při teplotě $+20\pm 5$ °C a vlhkosti 95-100 %. Zkouška se řídí dle normy ČSN EN 13286-41. Vzhledem k volbě nestmelené směsi jsem mohl rovnou přikročit ke zkoušce. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce jsem postupoval dále dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-7. Norma definuje, že pevnost v tlaku odpovídá síle při porušení, nebo při 15 % přetvoření ve směru zatěžování. Zatěžování tělesa probíhá plynule bez rázů po dobu v rozmezí 2 až 15 min. [9] [17]

Pro zkoušku je zapotřebí zkušební lisu, který má dvě ocelové tlačné desky a průměr desek musí být větší než průměr vzorků, tj. min. 100 mm pro tuto zkoušku. Rychlost zatěžování jsem stanovil na 2,00 mm/min a vycházel jsem ze zkušeností se zkouškami CBR, resp. IBI. Pevnost v tlaku by měla odpovídat minimální hodnotě stanovené v Tab. 18. vycházející ze SŽDC S4. [5]

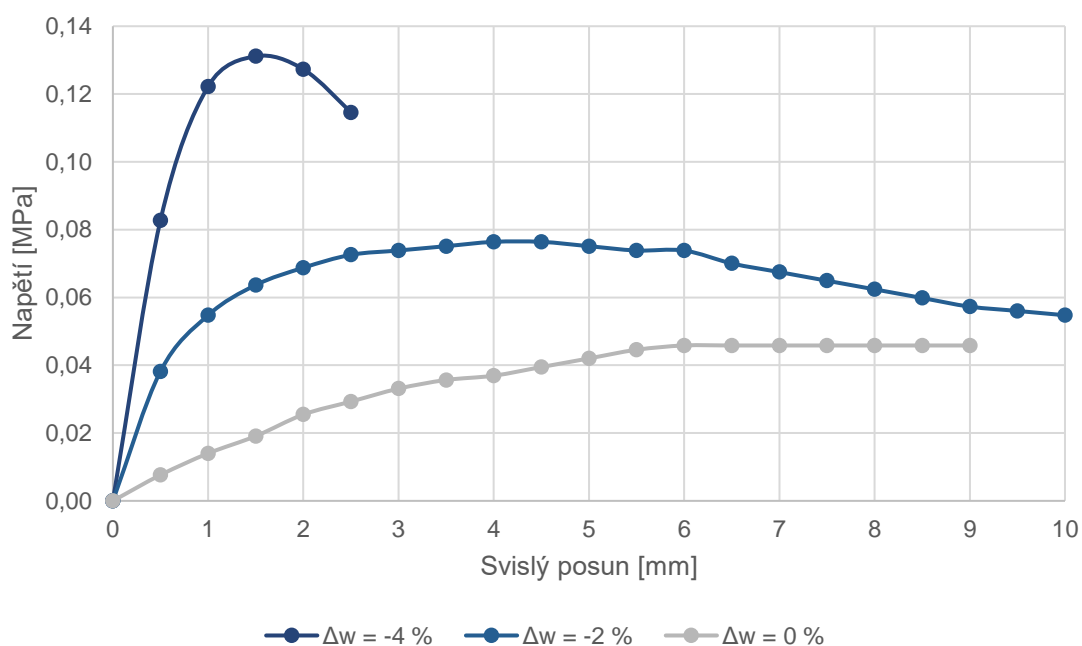
$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

- R_c pevnost v tlaku [MPa]
- F síla při porušení [N]
- A_c plocha kolmá na namáhání [mm^2] [5]



Obr. 52 Příklady vhodného porušení [5]

Kromě síly se sleduje i charakter porušení, na Obr. 52 jsou znázorněny uspokojivé porušení válcových těles. Porušení vzorků nastávalo podélnými trhlinami a odpadáváním kusů po obvodě (Obr. 53). Vzorky vždy dosáhly porušení a nebylo nutné čekat do 15 % přetvoření.



Graf 19 Pevnost v tlaku

Z Graf 19 vidíme, že vzorek zeminy navlhčený na optimální vlhkost se po vzniku první trhliny konstantně plasticky přetvářel a síla zůstávala neměnná. U druhého vzorku došlo ke snížení působící síly po vzniku prvních trhlin a rozpad začal později. Vzorek s nejnižší vlhkostí má nejprudší nárůst síly a náhlé celkové porušení. Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloha C a Tab. 16.

Tab. 16 Pevnost v tlaku směsi 0/8

Vzorek		$\Delta w = -4\%$	$\Delta w = -2\%$	$\Delta w = 0\%$
Pevnost v tlaku	[MPa]	0,13	0,08	0,05



Obr. 53 Porušené vzorky po zkoušce pevnosti v tlaku

4.11. Odolnost proti mrazu

Druhým hlavním požadavkem u stabilizovaných zemin je odolnost proti mrazu. Zkouška se řídí dle přílohy A normy ČSN 73 6124-1 a při stanovení pevnosti dle ČSN EN 13286-41. Před samotným zatěžováním je těleso cyklicky zmrazováno při stanovené teplotě a počtu opakování.

4.11.1. Odebraná zemina

Příprava a zrání vzorků je stejné jako u pevnosti v tlaku. Vzorky jsem připravil v mozdíři typu A a pěchu A o přibližné celkové hmotnosti 7,5 kg. Rozdílné vlhkosti jsou -4; -2; 0 % oproti optimální vlhkosti.

Vzorky byly vloženy na plastěnou podložku, kde se nasýtily kapilárně vodou (Obr. 55). Po ustálení jsem vložil vzorky do mrazící skříně na dobu $6 \pm 0,5$ hodin. Po vyjmutí byly znovu položeny k nasycení a rozmrznutí na podložku po dobu $18 \pm 0,5$ hodin při teplotě $+20$ až $+25$ °C. Celý cyklus se opakuje dle Tab. 17. [9]

Tab. 17 Teploty zmrazování a počet zmrazovacích cyklů [1]

Vrstva	Teplota zmrazování [°C]	Počet cyklů dle indexu mrazu		
		< 350	350 - 600	600 <
aktivní zóna	-15	7	10	13
zemní těleso	-10	5	7	10

V ŽST Lysá nad Labem byl index mrazu stanoven na 200 – 300 °C.den. Směs navrhujeme do aktivní zóny, počet cyklů je stanoven na 7 a zmrazovací teplota na -15 °C. Orientační hodnoty indexu mrazu lze určit dle Obr. 54.

Výsledné vzorky by se měly po absolvovaných cyklech zmrazování vložit do lisu a změřit pevnost v tlaku. Výsledná pevnost musí odpovídat Tab. 18.

Tab. 18 Požadavky na pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě [1]

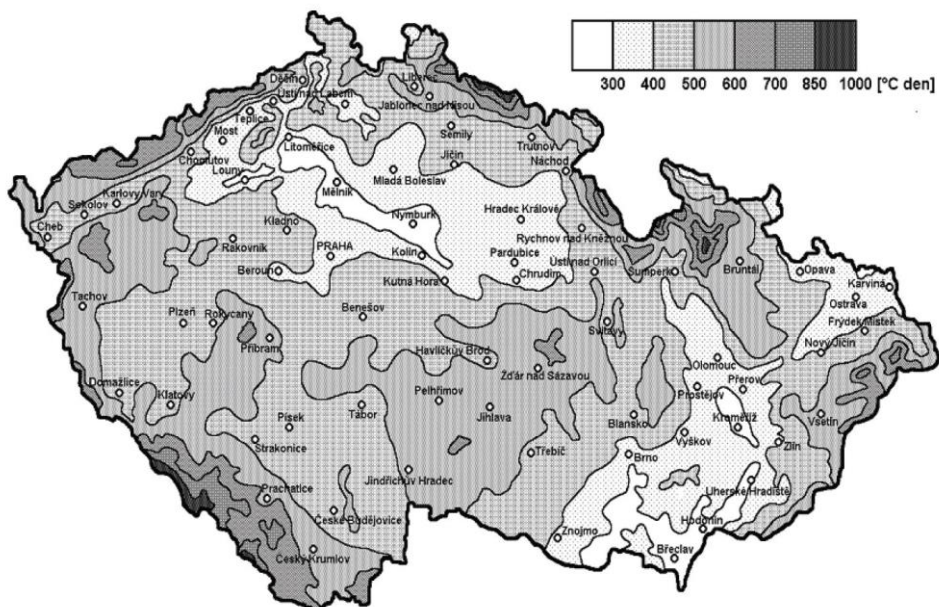
Vrstva	Pevnost v tlaku [MPa]	Odolnost proti mrazu a vodě [MPa]
aktivní zóna	2,5	3,5
zemní těleso	1	1,2

Vzorky navlhčené na méně, než optimální vlhkost se rozpadly po 3. cyklu (Obr. 57). Nestmelené směsi se poruší při sycení vodou, protože při zmrazování zvětší svůj objem a stmelí se zmrznutím. Při následném tání a sycení se vlivem rozrušené struktury rozpadnou. U stmelené směsi dochází k porušení při zmrazování. Vzorek s optimální vlhkostí vydržel 4 cykly.

4.11.2. Směs 0/8

Výroba a zvolená vlhkost je srovnatelná. Vzorky s nižší vlhkostí, než optimální se rozpadly dříve a to po 2. zmrazovacím cyklu (Obr. 56). Vzorek

s optimální vlhkostí vydržel všech 7 cyklů. Vzhledem k nízké pevnosti v tlaku stanovené v kapitole 4.10 jsem po dohodě s vedoucím bakalářské práce těleso následující zkoušce nepodrobil.



Obr. 54 Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu [1]



Obr. 55 Kapilární sycení na plstěné podložce



Obr. 56 Vzorky po 2. zmrazovacím cyklu

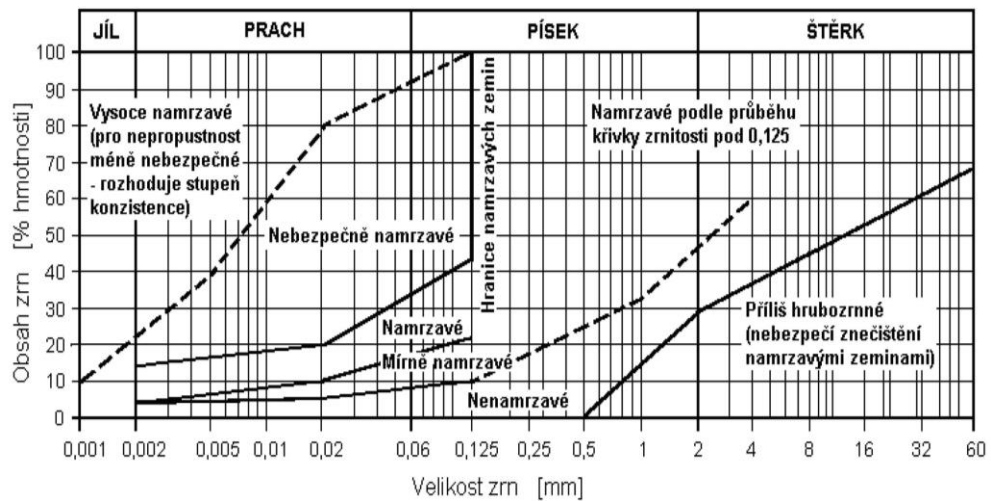


Obr. 57 Vzorky po 3. zmrazovacím cyklu

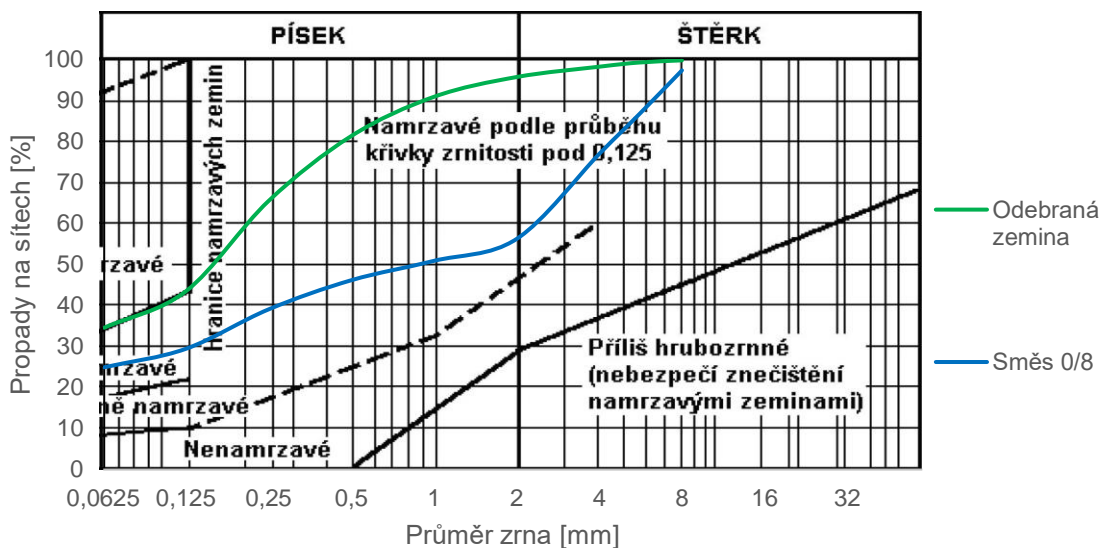
4.12. Namrzavost

S odolností proti mrazu souvisí namrzavost zemin. Z hlediska namrzavosti dělíme zeminy na nenamrzavé, mírně namrzavé, namrzavé, nebezpečně namrzavé a vysoce namrzavé. U namrzavých zemin dochází při teplotách pod bodem mrazu a při stálém přísunu vody k objemovým změnám. Podstatou změn je vznik ledových čoček, který vede k nechtěnému zdvihu nivelety a v době tání na jaře ke ztrátě únosnosti. Namrzavost lze určit přímou a nepřímou metodou. Přímá metoda se určuje na základě laboratorní zkoušky.

Nepřímou metodou dle Scheiblova kritéria se stanoví křivka zrnitosti a dle Obr. 58 se určí namrzavost. Vycházel jsem z křivky zrnitosti určené v kapitole 4.5. Odebranou zeminu lze popsat jako nebezpečně namrzavou a směs 0/8 jako nenamrzavou dle Graf 20.



Obr. 58 Nepřímé určení namrzavosti dle zrnitosti zeminy [1]



Graf 20 Namrzavost odebrané zeminy a směsi 0/8

5. ZÁVĚR

Cílem laboratorních zkoušek byla mechanická úprava písku s příměsí jemnozrné zeminy (S3), která spočívá v doplnění vhodného kameniva do původní zeminy. V průběhu laboratorních zkoušek jsem odebranou zeminu zatřídil jako písek jílovitý (S5), resp. jíl písčitý (F4). Zvolená mechanická úprava odebrané zeminy se ukázala jako proveditelná, ale nevhodná.

Upravené zemině se zvýšila objemová hmotnost přibližně o 250 kg/m³ a snížila optimální vlhkost o 5 % oproti odebrané zemině. Kalifornský poměr únosnosti CBR a okamžitý index únosnosti IBI nabývají podobných hodnot jako u odebrané zeminy. Během zkoušek bylo zjištěno, že odebraná i upravená zemina dosahuje vyšší únosnosti při nižších vlhkostech v rozsahu -4 až -2 % oproti optimální. Přimísením kameniva v poměru 1:1 došlo ke snížení bobtnání upravené zeminy přibližně o 20 %. Pevnost v tlaku odpovídá nízkým hodnotám CBR a IBI. Z hlediska odolnosti proti mrazu vydržel vzorek upravené zeminy s optimální vlhkostí všechny zmrazovací cykly oproti vzorku odebrané zeminy, který se rozpadl o 2 cykly dříve. Vzorky s nižší vlhkostí se rozpadly již po 2. a 3. cyklu. Výsledky laboratorních zkoušek souhrnně ukazují, že vybraná mechanická úprava jemnozrné zeminy odebraného typu nepřinesla požadované zlepšení. Domnívám se, že úprava kombinací kameniva a pojiva by mohla dosáhnout u odebrané zeminy jílovitého charakteru lepších výsledků.

Původní záměr odebrání písku s příměsí jemnozrné zeminy (S3) bohužel nevyšel. Písčítá zemina lépe funguje při mechanické úpravě. V případě úspěchu by bylo možné zvážit, zda by nešlo v ŽST odtěžit pouze nevhodnou jílovitou zeminu a mechanicky upravit písčitou v poměru například 1:1 (zemina:kamenivo). Dle výsledků únosnosti by se eventuálně doplnilo pojivo. Tímto postupem by mohla být snížena spotřeba kameniva oproti současné variantě až o 50 %. Uvažuji následující možné varianty úpravy.

- Mechanická úprava v kombinaci s pojivem
- Odtěžení F4 a mechanická úprava S3
- Odtěžení F4 a mechanická úprava S3 v kombinaci s pojivem
- Původní návrh odtěžení a náhrady SC

V případě nevhodnosti předchozích variant již zůstává jediná možnost náhrady původní zeminy. Zemina se odtěží a nahradí novou vrstvou kameniva stmeleného cementem. Poslední varianta odpovídá současnému návrhu dle projektu „Rekonstrukce ŽST Lysá nad Labem“.

6. LITERATURA

- [1] SŽDC S4 Železniční spodek. 2008.
- [2] ČD Ž Vzorové listy železničního spodku. 2002.
- [3] EN 16907-4: Zemní práce - Část 4: Úprava zemin vápnem a/nebo hydraulickými pojivy. 2019.
- [4] 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. 2011.
- [5] ČSN EN 13286-41: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směrů stmelených hydraulickými pojivy. 2004.
- [6] ČSN EN 13286-47: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. 2012.
- [7] ČSN EN 13286-49: Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 49: Zkušební metoda pro stanovení zrychleného bobtnání zemin zlepšených vápnem a/nebo hydraulickými pojivy. 2005.
- [8] ČSN 72-1191: Zkoušení míry namrzavosti zemin. 2013.
- [9] ČSN 73 6124-1: Stavba vozovek - Vrstvy ze směrů stmelených hydraulickými pojivy - Část 1: Provádění a kontrola shody. 2016.
- [10] ČSN 73 6125: Stavba vozovek. Stabilizované podklady. 1994.
- [11] ČSN EN 14227-1: Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem. 2013.
- [12] ČSN EN 14227-4: Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 4: Popílký pro směsi stmelené hydraulickými pojivy. 2013.
- [13] ČSN EN 14227-5: Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy. 2008.
- [14] ČSN EN 14227-15: Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 15: Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy. 2016.
- [15] ČSN EN ISO 17892-1: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti. 2015.
- [16] ČSN EN ISO 17892-4: Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti. 2017.
- [17] ČSN CEN ISO/TS 17892-7: Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 7: Zkouška pevnosti v prostém tlaku u jemnozrných zemin. 2005.
- [18] ČSN CEN ISO/TS 17892-12: Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí. 2005.

- [19] TP 94: Úprava zemin. Praha: Ministerstvo dopravy odbor pozemních komunikací, 2013.
- [20] KREJČIŘÍKOVÁ, Hana. Železniční stavby 1. Praha: ČVUT, 2017. ISBN 978-80-01-06157-2.
- [21] MARTIN, Lidmila. Železniční stavby 1 [přednášky]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2018 [cit. 2019-05-12].
- [22] VANÍČEK, Ivan. Geomechanika 10: Mechanika zemin. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01437-1.
- [23] SALÁK, Jan. Mechanika zemin [přednášky]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2007.
- [24] SŽDC. Mapa na vývěsných jízdních řádech [online]. 2018 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z:
<https://provoz.szdc.cz/portal/Show.aspx?path=/Data/Mapy/kjr.pdf>
- [25] Geologické mapy Klecany [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z:
<http://www.geologicke-mapy.cz/regiony/ku-666033/>
- [26] BŘEŠŤOVSKÝ, Petr. [foto]. Lysá nad Labem, 2019.
- [27] HORNÍČEK, Leoš. [foto]. Klecany, 2019.
- [28] BABIČ, Michal. [foto].
- [29] KOVAČOVÁ, Aneta. [foto]. Praha, 2019.
- [30] KECLÍK, Jiří. [foto]. Most, 2018.
- [31] PECHR, Tomáš. [foto]. Bohuslavice, 2018.
- [32] WIRTGEN. Die Welt der WIRTGEN Kaltrecycler und Bodenstabilisierer [online]. 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z:
<https://www.wirtgen.de/de/produkte/kaltrecycler-bodenstabilisierer/kaltrecycler-bodenstabilisierer/media/infomaterial.php>
- [33] SŽDC. SO 01-10-01 a SO 01-11-01 ŽST Lysá nad Labem, železniční svršek a spodek: PRAŽCOVÉ PODLOŽÍ. Praha: Mott MacDonald CZ, spol. s r.o, 2018.
- [34] SŽDC. Rekonstrukce ŽST Lysá nad Labem: Průzkum pražcového podloží. Praha: SUDOP EU, 2019.
- [35] SŽDC. Jednotná železniční mapa.
- [36] Mapy.cz: ŽST Lysá nad Labem [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z:
<https://mapy.cz/zakladni?x=14.8381788&y=50.1958527&z=19&base=ophoto&source=muni&id=4106>

7. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Křivka zrnitosti s kamenivem 0/4 (1:1); 0/4 (3:2); 0,125:4 (1:1)	32
Graf 2 Křivka zrnitosti s kamenivem 0/4 (3:5); 4/8 (2:5); kombinací (1:1) ...	32
Graf 3 Křivka zrnitosti odebrané zeminy	40
Graf 4 Křivka zrnitosti směsi 0/8	40
Graf 5 Hodnoty penetrace a vlhkosti při stanovení meze tekutosti	42
Graf 6 Proctor Standard odebrané zeminy	47
Graf 7 Proctor Standard směsi 0,125/4	48
Graf 8 Proctor Standard směsi 0/8	49
Graf 9 Porovnání zkoušek Proctor Standard	50
Graf 10 IBI odebrané zeminy	52
Graf 11 CBR odebrané zeminy	53
Graf 12 IBI směsi 0,125/4	54
Graf 13 CBR směsi 0/8	55
Graf 14 IBI směsi 0/8	56
Graf 15 CBR směsi 0/8	57
Graf 16 Porovnání IBI	59
Graf 17 Porovnání CBR	59
Graf 18 Lineární bobtnání	61
Graf 19 Pevnost v tlaku	63
Graf 20 Namrzavost odebrané zeminy a směsi 0/8	67

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Konstrukce železničního tělesa [1]	8
Obr. 2 Pražcové podloží typu 6 [2]	9
Obr. 3 Pražcové podloží typu 6 [2]	9
Obr. 4 Pražcová podloží typu 1; 2; 3; 4; 5 [2].....	10
Obr. 5 Schéma výpočtu ekvivalentního modulu přetvárnosti [1]	11
Obr. 6 Fáze zeminy [22]	12
Obr. 7 Flokulace jílových minerálů [23].....	13
Obr. 8 Vodní režim zemní pláně [1].....	14
Obr. 9 Trojúhelníkový diagram [1]	16
Obr. 10 Diagram plasticity zemin [1].....	16
Obr. 11 Dávkoč na podvozku MAN při modernizaci tratě č. 026 [31].....	19
Obr. 12 Dávkoč na podvozku Tatra 815 [28]	19
Obr. 13 Zemní fréza Wirtgen [30]	20
Obr. 14 Mísení zeminy s pojivem zemní frézou [32].....	20
Obr. 15 Zemní fréza při modernizaci tratě č. 026 [31]	21
Obr. 16 Vliv vápna na upravenou zeminu [19].....	25
Obr. 17 Graf zrnitosti zemin pro stabilizace [10].....	26
Obr. 18 Lokalita ŽST Lysá nad Labem v mapě KJŘ [24].....	27
Obr. 19 MUV 69 s drapákem v ŽST Lysá nad Labem	28
Obr. 20 Poloha kopané sondy v ŽST Lysá nad Labem [36]	28
Obr. 21 Kopaná sonda [26].....	29
Obr. 22 Poloha kopané sondy u kol. č. 104 v km 337,818 [35].....	29
Obr. 23 Klecany v geologické mapě [25]	30
Obr. 24 Kamenolom Klecany.....	30
Obr. 25 Odběr kameniva [27]	31
Obr. 26 Vysušené vzorky.....	34
Obr. 27 Promývací zařízení infraTest	35
Obr. 28 Prosévací zařízení Haver EML 200 digital T.....	36
Obr. 29 Kalibrace stupnice hustoměru [16].....	37

Obr. 30 Hustoměrná zkouška	37
Obr. 31 Prosévací a sedimentační zkouška [16]	39
Obr. 32 Schéma kuželového přístroje [18].....	41
Obr. 33 Vzorky pro zkoušku meze tekutosti	41
Obr. 34 Herzog Penetrometer	42
Obr. 35 Válání zeminy	43
Obr. 36 Půdorys a řez moždířem [4].....	44
Obr. 37 Moždíře A; B; C	45
Obr. 38 infraTest Universal Soil Compactor 100 + 150 mm	45
Obr. 39 Srovnání povrchu po hutnění [29].....	46
Obr. 40 Vzorky zkoušky Proctor Standard odebrané zeminy	47
Obr. 41 Vzorky zkoušky Proctor Standard směsi 0,125/4.....	48
Obr. 42 Vzorky zkoušky Proctor Standard směsi 0/8	49
Obr. 43 Vzorky v sušárně při zkoušce Proctor Standard	50
Obr. 44 Odebraná zemina IBI, $\Delta w=0$ %.....	52
Obr. 45 Odebraná zemina CBR, $\Delta w=-2$ %	54
Obr. 46 Směs 0,125/4 CBR, $\Delta w=-2$; 0 %.....	55
Obr. 47 Zkušební lis Strassentest FHF	56
Obr. 48 Směs 0/8 IBI, $\Delta w=-4$; -3; -2; 0 %	56
Obr. 49 Směs 0/8 CBR, $\Delta w=0$ %.....	57
Obr. 50 Měřicí zařízení Mitutoyo Absolute.....	60
Obr. 51 Zkouška lineárního bobtnání	61
Obr. 52 Příklady vhodného porušení [5]	62
Obr. 53 Porušené vzorky po zkoušce pevnosti v tlaku	63
Obr. 54 Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu [1].....	65
Obr. 55 Kapilární sycení na plstěné podložce	65
Obr. 56 Vzorky po 2. zmrazovacím cyklu	66
Obr. 57 Vzorky po 3. zmrazovacím cyklu	66
Obr. 58 Nepřímé určení namrzavosti dle zrnitosti zeminy [1]	67

9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení zemin dle zrnitosti [1].....	14
Tab. 2 Skupiny zemin dle zrnitosti [1]	14
Tab. 3 Plasticita zemin [1].....	15
Tab. 4 Konzistence zemin [1]	15
Tab. 5 Minimální návrhové parametry upravených zemin [1]	17
Tab. 6 Varianty zlepšených a stabilizovaných zemin [1].....	17
Tab. 7 Vhodnost materiálů pro zlepšené a stabilizované zeminy [1]	24
Tab. 8 Provedené zkoušky	33
Tab. 9 Podíl jednotlivých frakcí odebrané zeminy	36
Tab. 10 Hodnota penetrace v závislosti na kuželu [18]	41
Tab. 11 Výběr moždíře dle maximální velikosti zrn [4]	44
Tab. 12 Hutnění při zkoušce Proctor Standard [4].....	44
Tab. 13 Počáteční síla na lisu při zkoušce CBR a IBI [6].....	51
Tab. 14 Normované síly pro zkoušku CBR a IBI [6]	52
Tab. 15 Porovnání CBR a IBI	58
Tab. 16 Pevnost v tlaku směsi 0/8.....	63
Tab. 17 Teploty zmrazování a počet zmrazovacích cyklů [1]	64
Tab. 18 Požadavky na pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě [1] ..	64

10. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A Zkoušky odebrané zeminy
- Příloha B Zkoušky směsi 0,125/4
- Příloha C Zkoušky směsi 0/8
- Příloha D Zkoušky akreditovaných laboratoří