

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Kalifornský poměr únosnosti CBR v závislosti na vlhkosti zeminy
Marek Kozlík

Bakalářská práce
2019

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek Kozlík**
Osobní číslo: **D18708**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Kalifornský poměr únosnosti CBR v závislosti na vlhkosti
zeminy**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Zhodnocení současného stavu řešené problematiky
 - 2) Laboratorní měření
 - 3) Grafické a početní vyhodnocení zkoušek
 - 4) Zhodnocení dosažených výsledků a diskuse
 - 5) Fotodokumentace
-

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin, 1998

Katalog vozovek pozemních komunikací, Technické podmínky Ministerstva dopravy a spojů ČR č. 78 (TP 78), MSD ČR, 1995

Navrhování vozovek pozemních komunikací, Technické podmínky Ministerstva dopravy a spojů ČR č. 77 (TP 77), MSD ČR, 1995

TP 94 - Úprava zemin

ČSN 73 6133 Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, 1998


ČSN 73 6186: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti a okamžitého indexu únosnosti in situ

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **3. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2019**


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

L.S.

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry



V Pardubicích dne 3. ledna 2018

PROHLÁŠENÍ

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

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

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

V Pardubicích dne 24. května 2019

Marek Kozlík

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Aleši Šmejdovi, Ph.D., vedoucímu práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které významně přispěly k vypracování této bakalářské práce.

Rovněž děkuji všem, kteří byli ochotni mi poskytnout potřebné informace z praxe a čas, který mi věnovali.

V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za jejich trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.

ANOTACE

Práce je věnována zkoumání vlivu rozdílných vlhkostí zemin na hodnoty CBR a následný návrh zlepšující receptury v přímé návaznosti na provedení zkoušky Kalifornského poměru únosnosti. V první části práce je pojednáno obecně o zkoušce CBR a užívaných materiálech pro zlepšování a stabilizaci zemin. Ve druhé části jsem se zaměřil na samotné postupy zatřizení, vyhodnocení a zlepšení zeminy některými pojivy. Na závěr jsou uvedeny závislosti mezi vlhkostí zeminy a hodnotami CBR.

KLÍČOVÁ SLOVA

CBR, kalifornský poměr únosnosti, zlepšení zeminy, vlhkost zeminy

TITLE

California bearing ratio CBR in dependency on soil moisture

ANNOTATION

Thesis is devoted to the investigation of the influence of different soil moisture on the CBR values and suggestion of improving soil in direct relation to the California bearing ratio values. First part of the thesis is about CBR test and soil improvement in general. In the second part, I focused on the actual processes classification and soil improvement by some binders. At the end of this thesis I present some dependency between soil moisture and CBR values.

KEYWORDS

CBR, caifornia bearing ratio, soil moisture, improvement of soils

OBSAH

ÚVOD	10
1 KALIFORNSKÝ POMĚR ÚNOSNOSTI A JEHO PODSTATA	11
1.1 VYMEZENÍ PROBLEMATIKY CBR	11
1.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY	12
1.3 PŘÍPRAVA ZKOUŠKY	13
1.4 POSTUP ZKOUŠKY	14
1.5 CBR V NORMÁCH A PŘEDPÍSECH	15
1.5.1 ČSN 73 6133	15
1.5.2 TP 94	16
1.5.3 TP170	17
1.6 CBR V ZAHRANIČÍ	18
2 STABILIZACE, ZLEPŠOVÁNÍ ZEMIN	20
2.1 MECHANICKÉ ZLEPŠENÍ	20
2.2 POJIVA	20
2.2.1 Vápno	21
2.2.2 Cement	21
2.2.3 Dorosol C	21
2.2.4 Doroport TB	22
3 LABORATORNÍ ČÁST	23
3.1 ZATŘÍZENÍ ZEMINY	23
3.1.1 Sítový rozbor	24
3.1.2 Hustoměrná zkouška	27
3.2 STANOVENÍ ZDÁNLIVÉ HUSTOTY PEVNÝCH ČÁSTIC POMOCÍ PYKNOMETRU - DLE ČSN CEN ISO/TS 17892-2	29
3.3 URČENÍ KONZISTENČNÍCH MEZÍ	31
3.3.1 Mez tekutosti – dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12	31
3.3.3.1 Příprava vzorku	31
3.3.3.2 Postup zkoušky	32
3.3.3.3 Vyhodnocení	32
3.3.2 Mez plasticity	34
3.3.3 Index plasticity	35
3.3.4 Stupeň konzistence	36
3.4 ZKOUŠKA PROCTOR STANDARD	36
3.5 ZKOUŠKA CBR	39
3.5.1 Proctor modifikovaný	39
3.5.2 CBR	39
ZÁVĚR	74
LITERATURA	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma penetračního lisu pro měření CBR	12
Obr. 2 150 g cementu, 150 g dorosolu , 150 g vápna	22
Obr. 3 Klasifikace zemin dle velikosti částic zemin	23
Obr. 4 Křivka zrnitosti.....	25
Obr. 5 Zatřídění zeminy pouze na základě zrnitosti	26
Obr. 6 Vzorek v pyknometru a pískové lázni a určení teploty pomocné kapaliny	31
Obr. 7 Vasilievův přístroj	33
Obr. 8 Vysušené válečky	35
Obr. 9 Cassagrandeho diagram plasticity	35
Obr. 10 Vzorek zatížený prstencem připravený pro zkoušku CBR	39
Obr. 11 Penetrační lis pro měření CBR.....	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Síla potřebná k zatlačení trnu	11
Tab. 2 Přírůstky vlhkosti	13
Tab. 3 Požadovaný stupeň nasycení	14
Tab. 4 Stanovení tloušťky úpravy podloží vozovky.....	15
Tab. 5 Požadované hodnoty poměru únosnosti upravených zemin v násypu a podloží násypu	16
Tab. 6 Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu	16
Tab. 7 Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1% příměsi pojiva	16
Tab. 8 Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu	18
Tab. 9 Korelace CBR s druhy a vlastnostmi zemin.....	19
Tab. 10 Značení zemin	24
Tab. 11 Síťový rozbor dle ČSN EN 933-1	25
Tab. 12 Síťový rozbor pro zrna < 0,063 mm	28
Tab. 13 Hustota pomocné kapaliny	30
Tab. 14 Hustota odvzdušněné vody při různých teplotách, opravená o vztlak ve vzduchu.....	30
Tab. 15 Naměřené hodnoty penetrační zkoušky	32
Tab. 16 Naměřené hodnoty meze plasticity	34
Tab. 17 Naměřené hodnoty zkoušky Proctor Standard	37
Tab. 18 Výstup zkoušky CBR I. - vlhkost 9,19 %	40
Tab. 19 Výstup zkoušky CBR II. - vlhkost 11,84 %.....	42
Tab. 20 Výstup zkoušky CBR III. - vlhkost 20,3 %.....	44
Tab. 21 Výstup zkoušky CBR IV. - vlhkost 12,43 %	45
Tab. 22 Výstup zkoušky CBR V. - vlhkost 17,27 %.....	47
Tab. 23 Výstup zkoušky CBR VI. - vlhkost 13,73 %	48
Tab. 24 Výstup zkoušky CBR VII. - vlhkost 19,21 %.....	50
Tab. 25 Výstup zkoušky CBR VIII. - vlhkost 1,55 %.....	52
Tab. 26 Výstup zkoušky CBR IX. - vlhkost 3,18 %	54
Tab. 27 Výstup zkoušky CBR X. - vlhkost 15,3 %.....	56
Tab. 28 Výstup zkoušky CBR XI. - vlhkost 15,25 %	58
Tab. 29 Výstup zkoušky CBR XII. - vlhkost 15,36 %.....	60
Tab. 30 Výstup zkoušky CBR XIII - vlhkost 14,76 %.....	62
Tab. 31 Výstup zkoušky CBR XIV. - vlhkost 14,21 %	64
Tab. 32 Výstup zkoušky CBR XV. - vlhkost 15,28 %.....	66

Tab. 33 Výstup zkoušky CBR XVI. - vlhkost 13,77 %	68
Tab. 34 Výstup zkoušky CBR XVII. - vlhkost 14,84 %	70
Tab. 35 Výstup zkoušky CBR XVIII. - vlhkost 13,35 %	72
Tab. 36 Porovnání naměřených poměrů síly/penetrace jednotlivých zkoušek CBR	75

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Mez tekutosti - závislost penetrace na vlhkosti.....	33
Graf 2 Závislost objemové hmotnosti na vlhkosti zeminy	38
Graf 3 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška I.	41
Graf 4 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška II	43
Graf 5 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška III.....	44
Graf 6 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška IV	46
Graf 7 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška V.....	47
Graf 8 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VI	49
Graf 9 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VII	50
Graf 10 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VIII.....	53
Graf 11 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška IX	55
Graf 12 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška X.....	57
Graf 13 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XI	59
Graf 14 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XII	61
Graf 15 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XIII.....	63
Graf 16 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XIV	65
Graf 17 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XV	67
Graf 18 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVI.....	69
Graf 19 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVII	71
Graf 20 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVIII	72
Graf 21 Porovnání naměřených poměrů síly/penterace jednotlivých zkoušek CBR	74

SEZNAM ZKRATEK

CBR	kalifornský poměr únosnosti (%)
w	vlhkost zeminy (%)
w _L	mez tekutosti (%)
w _p	mez plasticity (%)
ρ _d	objemová hmotnost suché zeminy podle ČSN 72 1015
I _p	index plasticity
w _p	mez plasticity
DCP	dynamic cone penetrometr

ÚVOD

V této bakalářské práci se zabývám vlivem přirozené vlhkosti zemin na hodnoty měření CBR. Zkoušky byly provedeny na vzorku pořízeného na D5 - Rokycansko z vrtu hlubokého 0,2 – 1,2 m. Vzorek jsem nejprve zařídil a poté zkoumal a porovnával vliv vlhkosti na hodnoty CBR. Práce se dále zabývá návrhem optimální receptury pro zkoumaný vzorek zeminy z nejčastěji používaných pojiv jako vápno, cement, dorosol, doroport v přímé návaznosti na provedení zkoušky CBR. V závěru této práce jsem porovnal finanční dopad pro stavbu při provádění úpravy zemin bez přesného návrhu receptury ve specializované laboratoři.

1 KALIFORNSKÝ POMĚR ÚNOSNOSTI A JEHO PODSTATA

Tato kapitola pojednává o jedné ze základních zkoušek únosnosti zemin, tzv. Kalifornském poměru únosnosti (dále jen CBR) a jeho využití v praxi.

1.1 Vymezení problematiky CBR

Kalifornský poměr únosnosti je laboratorní zkouška, která je v praxi využívána pro měření únosnosti zemin. Jedná se o penetrační zkoušku, která byla vyvinuta v Kalifornii před druhou světovou válkou. Jejím účelem je měření únosnosti základových vrstev zemin při výstavbě pozemních komunikací a neupravených letištních drah. Slouží jako kontrolní test únosnosti jednotlivých konstrukčních vrstev a určuje vhodnost daného materiálu pro výstavbu. [4]

Hodnota CBR se udává v procentech a vyjadřuje poměr síly potřebné k zatlačení trnu do stanovené hloubky zkoušeného vzorku ku síle potřebné k zatlačení trnu do stejné hloubky v předepsaném normativním kamenivu, kterým je drcený kalifornský vápenec. Matematicky lze vyjádřit tento vztah takto [4] :

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

F ... síla potřebná k zatlačení trnu do zkoušené zeminy [kN]

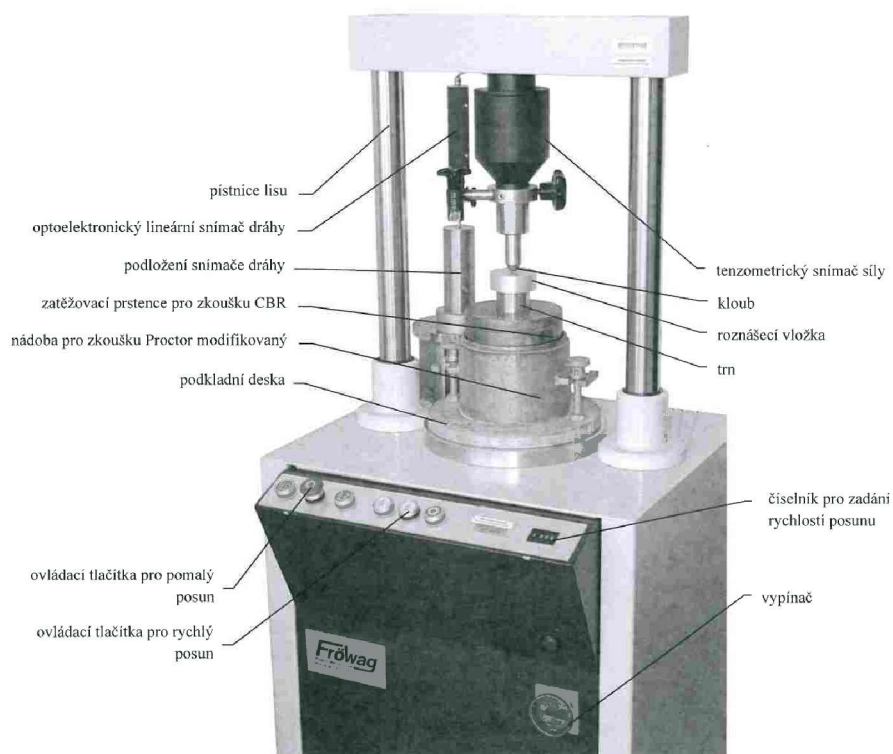
F_s ... normativní síla potřebná k zatlačení trnu do předepsané hloubky předepsaného kameniva [kN]

Za stanovenou hloubku, do níž se trn zatlačuje, se všeobecně považuje hloubka 2,5 mm a 0,5 mm. [4] - Pro výpočet je dále nezbytné znát sílu potřebnou k zatlačení trnu, která se stanoví na základě hodnot uvedených v tabulce níže

Tab. 1 Síla potřebná k zatlačení trnu

Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]
2,5 mm	13,2
5,0 mm	20,0

Zdroj: vlastní zpracování dle[4], 2018



Příloha č. 1 Schéma měřícího zařízení pro zkoušky CBR (DB)

Obr. 1 Schéma penetračního lisu pro měření CBR

Zdroj: [9]

1.2 Přístroje a pomůcky

Pro provedení zkoušky se využívá řada přístrojů a pomůcek z nichž nejdůležitější jsou: [4]

- zatěžovací lis s dolní nebo horní posuvnou deskou - tento lis by měl vyvodit zatížení o síle alespoň 50 kN. Deska se pohybuje rovnoměrnou rychlostí tak, aby rychlost penetrace byla 1,27 mm/min ($\pm 0,20$ mm),
- zařízení na odečítání síly vyvozené lisem - zde je důležitá přesnost zařízení a to ± 50 N při zkouškách silou do 10 kN a ± 100 N při zkouškách do 50 kN,
- kovový válcový hmoždír - pro zkoušku Proctor standard¹,
- kovová dilatační deska,
- zařízení na dynamické zhutňování,

¹ definice Proctor standard – zkouška jejímž výstupem je závislost mezi objemovou hmotností sušiny a vlhkostí, ze které lze stanovit optimální vlhkost při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti vysušené zeminy [3]

- zařízení na statické zhutňování,
- zařízení na vibrační zhutňování,
- prstencové závaží,
- penetrační válec o průměru 50,00 mm s maximální odchylkou $\pm 0,5$ mm a výšce 100 mm s tvrzenou ocelovou spodní základnou,
- zařízení pro stanovení vlhkosti,
- laboratorní váhy,
- síta pro prosévací zkoušku o průměru 5 mm-16 mm.

1.3 Příprava zkoušky

Nejprve je potřeba zeminu vysušit. Pro tuto fázi se využívá tzv. vysoušecí pec v níž zeminu sušíme při teplotě cca. 60 °C přibližně 24 hodin. Následuje provedení prosévací zkoušky, kdy se zemina proseje přes sadu sít.

Po výše uvedené přípravě zeminy je možné odebrání vzorku. Zpravidla se k dalšímu testování odebírá vzorek o hmotnosti cca. 7,5 kg, u nějž se stanoví počáteční vlhkost (w_{po}). Kromě počáteční vlhkosti se při provádění CBR stanovuje zkušební vlhkost (w_{zk}). [9]

U zemin, jejichž číslo plasticity je větší než jedna, se w_{zk} stanoví na základě níže uvedeného vztahu [9]:

$$w_{zk} = w_{opt} + \Delta w_{zk}$$

w_{opt} ... optimální vlhkost [%]

Δw_{zk} ... je přírůstek vlhkosti [%]

Přírůstky vlhkosti (Δw_{zk}) se řídí normou ČSN 72 1002 viz tabulka hodnot níže.

Tab. 2 Přírůstky vlhkosti

Název zeminy podle ČSN 72 1002	Δw_{zk} [%]
hlinitý písek, jílovitý písek	1,0
písčitá hlína, hlína	2,0
jílovitá hlína písčitá, jílovitá hlína, prachovitá hlína, jíl, písčité jíl	3,0

Zdroj: vlastní zpracování dle[4], 2018

Naproti tomu u zemin, jejichž číslo plasticity je menší nebo rovno jedné, se řídí výpočet zkušební vlhkosti tímto vztahem [9]

$$w_{zk} = S_r * \left(\frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q_s}\right) * Q_w$$

S_r ... stupeň nasycení dle tabulky 3 [%]

Q_d ... objemová hmotnost zkoušené zeminy [$kg \cdot m^{-3}$]

Q_s ... zdánlivá hustota pevných částic [$kg \cdot m^{-3}$]

Q_w ... hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]

Hodnoty stupně nasycení se řídí normou ČSN 72 1002 viz tabulka hodnotí níže.

Tab. 3 Požadovaný stupeň nasycení

Název zeminy podle ČSN 72 1002	S_r [%]
písek, písčité štěrky, hlinito-písčité štěrky, hlinitý písek se štěrky, prachovitý písek	60,0
hlinitý písek, písčité hlína se štěrky, hlinitý štěrky, jílovito-písčité štěrky	80,0

Zdroj: vlastní zpracování podle [4], 2018

Příprava pokračuje určením hmotnosti vody, kterou je potřeba přidat k zemině, aby bylo dosaženo zkušební vlhkosti vzorku a to ze vztahu [4] :

$$Q = \frac{m_p}{100 + w_{po}} * (w_{zk} - w_{po})$$

m_p ... hmotnost navážky [kg]

w_{zk} ... zkušební vlhkost [%]

w_{po} ... počáteční vlhkost vzorku [%]

Po aplikaci vody a řádném promísení se zemina uloží ve vodotěsném obalu na 24 hodin, aby došlo k rovnoměrnému rozložení vlhkosti. Zkoušená zemina se postupně vrství do moždíře, přičemž každá jednotlivá vrstva se hutní ocelovou tyčí. Tento vzorek se hutní celkem v pěti vrstvách tak, aby poslední vrstva přesahovala moždíř alespoň o 5 cm. Povrch se poté zarovná do roviny s moždířem pomocí ocelového pravítka. Tímto je ukončena příprava vzorku pro provedení samotné zkoušky CBR. [9]

1.4 Postup zkoušky

Na povrch zkoušeného vzorku se umístí prstencové závaží, odpovídající hmotnosti konstrukčních vrstev komunikace, přičemž celková hmotnost tohoto závaží nesmí být nižší než 4,5 kg. Na povrch vzorku se umístí penetrační válec a zatíží se tak, aby celková síla nepřekročila:

- 50 N u zemin, kde se předpokládá CBR menší nebo rovno 30 %,
- 250 N v případě CBR větší než 30 %.

Tento stav napětí/deformace se považuje za výchozí. Výše uvedené zatížení penetračního válce se dále pro výpočet neuvažuje, je však nezbytné pro řádné dosednutí na vzorek zeminy.

Penetrační válec se pomocí lisu za konstantní rychlosti (1,27 mm/min) vtlačuje do vzorku a zaznamenávají se zatížení při penetracích po 0,5 mm až do celkové penetrace 10 mm. Dosáhne-li se maximálního zatížení při penetraci menší, zaznamenává se zatížení a penetrace i v tomto okamžiku. Po skončení penetrace se otvor vyplní zeminou ze které byl vzorek připraven. Vzorek se obrátí a provede se zkouška na spodním povrchu vzorku. Po ukončení zkoušky se zjistí vlhkost na obou koncích vzorku. Jako výsledná hodnota vlhkosti se uvede aritmetický průměr obou stanovených. [4]

1.5 CBR v normách a předpisech

1.5.1 ČSN 73 6133

Norma Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací se mimo jiné zabývá vhodností zemin pro stavbu zemního tělesa. Při použití vhodnosti do aktivní zóny se zeminy posoudí podle únosnosti CBR. Zeminu je možné použít bez úprav pokud je hodnota CBR rovna minimálně 15 % pro podloží PIII, 30 % pro PII a 50 % pro PI.

Při použití do násypu se zemina klasiky posuzuje dle zkoušky IBI, v případě ztužující vrstvy vrstevnatého násypu se posuzuje dle CBR. Zeminu není potřeba upravovat pokud je IBI minimálně 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu. Pro ztužující vrstvu hodnota CBR musí být minimálně 10 %.

Účinnost úpravy podloží tělesa určuje její tloušťka. Čím má zemina horší parametry, tím musí být tloušťka úpravy větší. Tloušťka úpravy zeminy pojivy nebo její nahrazení jiným vhodnějším materiálem se stanovuje v závislosti na CBR dle následující tabulky (Tab. 4).

Tab. 4 Stanovení tloušťky úpravy podloží vozovky

Původní materiál		
Zatřídění zemin dle klasifikace	Zatřídění dle CBR	Tloušťka úpravy (h)
MG,CG,MS,CS,SP,SF,SM,SC,GP,GM,GC	$5\% \leq \text{CBR} < 15\%$	$300 \text{ mm} \leq h < 400 \text{ mm}$
ML,MI,CL,CI,MH,MV,CH,CV	$2\% \leq \text{CBR} < 5\%$	$400 \text{ mm} \leq h < 500 \text{ mm}$
	$\text{CBR} < 2\%$	$h \geq 500 \text{ mm}$

Zdroj: vlastní zpracování podle [1], 2019

1.5.2 TP 94

Technické podmínky TP 94 se zabývají zásadami pro úpravu zemin a pro využití upravených zemin při konstrukci pozemních komunikací.

V případě použitá směsi zeminy a pojiva do aktivní zóny se pro návrh úpravy stanovuje hodnota CBR v souladu s ČSN EN 13 286-47. Pro těleso násypu jsou vyžadovány dle TP 94 hodnoty zachycené níže viz Tab. 5 a Tab. 6.

Tab. 5 Požadované hodnoty poměru únosnosti upravených zemin v násypu a podloží násypu

Způsob použití	Požadované hodnoty	
	Okamžitý index únosnosti	CBR
Podloží násypu	min IBI = 10	
Každá technologická vrstva násypu	min IBI = 10	-
Ztužující vrstva násypu vrstevnatého, z váteho písku, z popílku upraveného pojivou	-	min. CBR = 15

Zdroj: vlastní zpracování podle [12], 2019

Tab. 6 Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu

Způsob použití	Požadované hodnoty		
	CBR	Minimální vlhkost směsi	Okamžitý index únosnosti
Aktivní zóna	Podloží P I	CBR ₁₅	W _{0,9}
	Podloží P II	CBR ₃₀	W _{0,9}
	Podloží P III	CBR ₅₀	W _{0,9}

Zdroj: vlastní zpracování podle [12], 2019

Hodnota CBR odvozuje dávkování daného pojiva a vlhkost. Provádějí se tři zkoušky CBR pro tři zvolené vlhkosti zeminy která je zlepšená různými dávkami pojiva. Výsledkem je stanovení závislosti dávkování pojiva na vlhkost zeminy a hodnotě CBR. Z výsledných hodnot se volí takové dávkování pojiva, které odpovídá přirozené vlhkosti zeminy před úpravou a současně dosažená hodnota CBR co nejlíže přesahuje požadovanou hodnotu CBR.

V následující tabulce jsou uvedeny orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1% příměsi pojiva

Tab. 7 Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1% příměsi pojiva

Vlastnost zeminy	Působení	Příměs páleného vápna	Příměs cementu
Vlhkost	snižuje	1 – 2 %	0,2 – 0,4 %
Max. objemová vlhkost	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

Zdroj: vlastní zpracování podle [12], 2019

1.5.3 TP170

V technických podmínkách TP170 je uvedena tabulka díky níž lze odhadnout hodnotu CBR na základě pouhého zatřídění zeminy, viz Tab. 8.

V TP 170 se dále řeší otázka navrhování poměru únosnosti CBR v závislosti na vodním režimu podloží. Vztah kde lze z hodnoty CBR odvodit modul pružnosti podloží vozovky.

$$E_{pd} = 17,6(\text{CBR})^{0,64}$$

E_{pd} . . . návrhová hodnota modulu pružnosti podloží [MPa]

Výše uvedená rovnice má platnost v oboru hodnot CBR 2 % – 12 % pro zeminy s vyšším CBR jak 30 % je doporučeno užívat návrhový modul 150 MPa

Pro navrhování vozovek je počítáno s hodnotou CBR za optimální vlhkosti a 96 hodinové saturaci.

Tab. 8 Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu

Poř. číslo	Název zeminy	Symbol	Obsah jemných částic f [%]	Poměr únosnosti CBR [%]		Modul přetvárnosti $E_{def,2}^{1)}$ [MPa]	Skupina zemín
				při optimální vlhkosti	po uložení ve vodě		
1	šterkovitá hlína	F1 MG	35 – 65	8 – 18	5 – 10	≤ 50	V – VII
2	šterkovitý jíl	F2 CG	35 – 65	5 – 10	3 – 7	≤ 30	V – VII
3	pisčítá hlína I	F3 MS ₁	35 – 50	5 – 25	4 – 15	≤ 60	III – V
4	pisčítá hlína II	F3 MS ₂	50 – 65	3 – 15	2 – 5	≤ 45	VII – IX
5	pisčítý jíl I	F4 CS ₁	35 – 50	5 – 30	5 – 20	≤ 60	IV – V
6	pisčítý jíl II	F4 CS ₂	50 – 65	2 – 20	0 – 4	≤ 50	VII – IX
7	hlína s nízkou plasticitou	F5 ML	nad 65	2 – 20	2 – 7	≤ 50	VII – IX
8	hlína se střední plasticitou	F5 MI	nad 65	2 – 15	1 – 6	≤ 45	VII – IX
9	jíl s nízkou plasticitou	F6 CL	nad 65	3 – 20	1 – 8	≤ 50	VIII – X
10	jíl se střední plasticitou	F6 CI	nad 65	2 – 20	0 – 6	≤ 50	VIII – X
11	hlína s vysokou plasticitou	F7 MH	nad 65	3 – 7	0 – 4	≤ 25	VII – IX
12	hlína s velmi vysokou plasticitou	F7 MV	nad 65	2 – 6	0 – 3	≤ 20	VIII – X
13	hlína s extrémně vysokou plasticitou	F7 ME	nad 65	2 – 5	0 – 2	≤ 20	IX – X
14	jíl s vysokou plasticitou	F8 CH	nad 65	2 – 7	0 – 3	≤ 25	VIII – X
15	jíl s velmi vysokou plasticitou	F8 CV	nad 65	1 – 7	0 – 3	≤ 25	VIII – X
16	jíl s extrémně vysokou plasticitou	F8 CE	nad 65	1 – 6	0 – 3	≤ 20	IX – X
17	písek dobře zrněný	S1 SW	do 5	20 - 40 ²⁾	20 - 40 ²⁾	70 – 120	I – II
18	písek špatně zrněný	S2 SP	do 5	10 - 40 ²⁾	10 - 40 ²⁾	40 – 70	II – III
19	písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S3 S-F	5 – 15	8 – 70	6 – 25	20 – 70	III – V
20	písek hlinitý	S4 SM	15 – 35	6 – 50	4 – 15	15 – 60	III – V
21	písek jílovitý	S5 SC	15 – 35	4 – 30	2 – 12	10 - 60	III – V
22	šterk dobře zrněný	G1 GW	do 5	40 - 80 ²⁾	40 - 80 ²⁾	100 - 120	I – II
23	šterk špatně zrněný	G2 GP	do 5	30 - 60 ²⁾	30 - 60 ²⁾	70 - 120	I – III
24	šterk s příměsí jemnozrnné zeminy	G3 G-F	5 – 15	20 – 90	6 – 60	45 - 90	I – III
25	šterk hlinitý	G4 GM	15 – 35	10 – 60	4 – 40	30 - 70	I – III
26	šterk jílovitý	G5 GC	15 – 35	5 – 30	3 – 20	15 - 60	II – IV

Zdroj: [11]

1.6 CBR v zahraničí

Za hranicemi je test Kalifornského poměru únosnosti také velmi běžný a jeho postup je velmi podobný tomu našemu. Používá se především s empirickými vztahy pro určení tloušťek podkladních vrstev a je také zakotven v národních normách. V Anglii byl v roce 2017 veden výzkum korelace hodnot CBR s druhy a vlastnostmi zemín jako mez tekutosti, mez plasticity,

index plasticity, maximální a optimální vlhkostí. Výstup ukázal u některých druhů zeminy a vlastností korelaci až $R^2 = 0,841$, avšak u konzistenčních mezí byly výsledky horší a to mezi -0,334 až 0,18. Výsledné vztahy ke kterým ve svém výzkumu došli i s korelacemi jsem sjednotil do následující tabulky (Tab. 9). [8]

Tab. 9 Korelace CBR s druhy a vlastnostmi zemin

Vztah mezi	Vzorec	R^2
CBR a W_{max}	$CBR = -175,006 + 99,896 * W_{max}$	0,772
CBR a W_{opt}	$CBR = 99,086 - 5,162 * W_{opt}$	0,741
CBR a IP	$CBR = 35,006 - 0,002 * IP$	0,000
CBR a štěrk [%]	$CBR = -8,093 + 0,680 * \text{štěrk} [\%]$	0,395
CBR a písek [%]	$CBR = 47,052 - 1,393 * \text{písek} [\%]$	11,1
CBR a jíla [%]	$CBR = -58,35 - 0,897 * \text{štěrk} [\%]$	0,416
CBR a jíla, písek, I_p , W_p , W_{max} , W_{opt} , štěrk	$CBR = -20,19 + 47,13 * W_{max} - 2,895 * W_{opt} - 0,091 * W_p - 0,055 * I_p + 0,049 * \text{štěrk} [\%] - 0,668 * \text{písek} [\%] + 0,000 * \text{jíla} [\%]$	0,917

Zdroj: vlastní zpracování podle [8], 2019

Dále je možné v zahraniční literatuře najít obdobné práce jako korelaci hodnot CBR s modulem přetvárnosti, CBR a DCP (dynamic cone penetrometr) nebo například vztah mezi CBR a Clagg Hammerem. Zkoušení Kalifornského poměru únosnosti je časově velmi náročné a tak tyto práce pomáhají k odhadu hodnot CBR a tím rychleji reagovat na problémy na staveništi a urychlovat výstavbu.

2 STABILIZACE, ZLEPŠOVÁNÍ ZEMIN

Cílem upravování zeminy je dosažení návrhových parametrů dle projektové dokumentace.

Neexistují žádné fyzikálně-mechanické vlastnosti které by vylučovali možnost úpravy zeminy a tak lze upravovat jakoukoli zeminu. Pro úpravu a stabilizaci zemin pojivy je vhodné provádět průkazné laboratorní zkoušky již v průběhu geotechnického průzkumu které upřesní množství pojiva potřebné k dosažení CBR 10 %. Podcenění nebo nerespektování laboratorních zkoušek může mít nedostatečný až opačný efekt než jaký byl předpokládán. Abychom se těmto problémům vyhnuli dodržují se základní pravidla. Zkoušky se provádí v laboratoři výhradně na zemině, která bude ve skutečnosti použita s pojivem které bude užito ke zlepšení. Z geotechnického průzkumu je vhodné zjistit, zda není potřeba provedení zkoušek na více druzích zeminy a to zvláště pro stavby s větším rozsahem. I když to předpisy nevyžadují je vhodné dodržet postup který se využívá především ve Francii a doporučený některými českými firmami. A to zkoušení CBR vzorku hodinu po přípravě. Tato hodnota je nazývána IPI – immediate bearing index. IPI je potom porovnáván s CBR stejného vzorku ponořeného na 72 hodin do vodní lázně. Tento postup je vhodný ke zjištění jestli například po vydatných deštích nemůže dojít při plném nasycení vodou ke zhoršení upravené zeminy. Nebo lze dokumentovat zda nepřekračujeme povolenou hodnotu objemových změn zemin. Hodnota CBR syceného vzorku by neměla klesnout pod hodnotu IPI [12]

Provádění stabilizace se provádí také z ekonomických důvodů a správný návrh receptury dokáže ušetřit stavbě nemalé peníze. Ovšem je třeba brát v úvahu všechny náklady s tím spojené a to především dopravu strojů na stavbu a rozdílnou cenu pojiv. Pokud bychom měli porovnat ceny nejpoužívanějších materiálů pro zlepšení tak nejlevněji nakoupíme cement a to zhruba za 3 Kč/kg poté vápno s cenou 3,4 Kč / kg a nejdražší dorosol 5,2 Kč / kg.

2.1 Mechanické zlepšení

Mechanické zlepšení je smísení dvou nebo více druhů zemin aby se zlepšili jejich mechanicko-fyzikální vlastnosti. Zvláštním případem mechanického zlepšení je užití textilních vláken, obvykle za účelem zlepšení smykových vlastností. [15]

2.2 Pojiva

Zemina upravená pojivy okamžitě mění své vlastnosti a to snížením přirozené vlhkosti, zvýšením únosnosti a snížením plasticity.

Pro úpravu jemnozrnných zemin se střední a vysokou plasticitou se doporučuje vápno.

Pro úpravu jemnozrnných zemin s nízkou plasticitou se volí cement nebo hydraulické silniční pojivo.

Pro úpravu písčito-jílových zemin jsou užívány jako pojiva popílky a strusky. [15]

2.2.1 Vápno

Úprava nehašeným vápnem je velmi vhodná pro jemnozrnné zeminy tříd F. Koncepci zlepšení zeminy vápnem lze rozdělit dle efektivnosti na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé efekty působící snížení obsahu vody ve směsi jsou: hydratace vápna, vypařování vody, přidání suchého materiálu, mísení směsi vápna se zeminou. Tyto čtyři vlivy mohou v závislosti na podmínkách vyvolat snížení vlhkosti přibližně o 1 - 2 % na 1% příměsi vápna.

Krátkodobé efekty působící změny geotechnických vlastností zeminy jsou způsobeny chemickými reakcemi a tzv. flokulací (vločkování) jílových částic. V teorii se předpokládá, že při použití 1 % příměsi vápna dojde ke snížení indexu plasticity (I_p) o 1,6 – 2,4 % , zvýšení optimální vlhkosti w_{opt} při zkoušce Proctor standard o 0,7-0,9 % , snížení maximální objemové hmotnosti o 21-33kg/m³, zvýšení CBR_{opt} o 4,1- 6,2% a zvýšení CBR_{sat} o 4,7 - 6,3 %.

Dlouhodobé efekty – jíl a vápno spolu v zemině vzájemně reagují a vytváří tak nový druh minerálů. Tyto změny vedou ke zvýšení pevnosti v prostém tlaku, zvýšení indexu CBR, stabilizaci směsi po saturaci a zvýšení odolnosti proti mrazu.

Zeminy upravované vápnem se zpracovávají při teplotách zeminy do -5°C. [6][15]

2.2.2 Cement

Úprava zeminy pomocí cementu se používá pro úpravu písčito-hlinitých, šterkových a stejnozrnných písčitých zemin. Ke zlepšování se využívá Portlandského, Pucolánového, Směsného, některých vysokopecných cementů případně cementy splňující požadavky na hydraulické silniční pojivo dle ČSN EN 1382-1. Zeminy upravované pojivy na bázi cementu se zpracovávají při teplotách zeminy do 0 °C. [12]

2.2.3 Dorosol C

Směsné hydraulické pojivo které v sobě spojuje výhody klasické vápenné a hydraulické stabilizace, obsahuje proměnlivý podíl hydraulických složek a vzdušného vápna . Dorosol je vhodný především pro jemnozrnné zeminy. Použitím směsného pojiva získáme větší objemovou stálost, dlouhodobý nárůst pevností a zvýšení trvalé únosnosti a mrazuvzdornosti. [10]

2.2.4 Doroport TB

Doroport TB je řada hydraulických silničních pojiv vyrobených z hydraulických složek, portlandského cementového slínku a drobných příměsí vhodných především do písčitých zemin. První zdokumentované použití tohoto pojiva bylo při výstavbě mimoúrovňové křižovatky na Praze 8. Na rozdíl od vápna je Doroport velmi odolný proti mrazu a síranům a cenově výhodnější.



Obr. 2 150 g cementu, 150 g dorosolu , 150 g vápna

Zdroj: vlastní fotografie, 2019

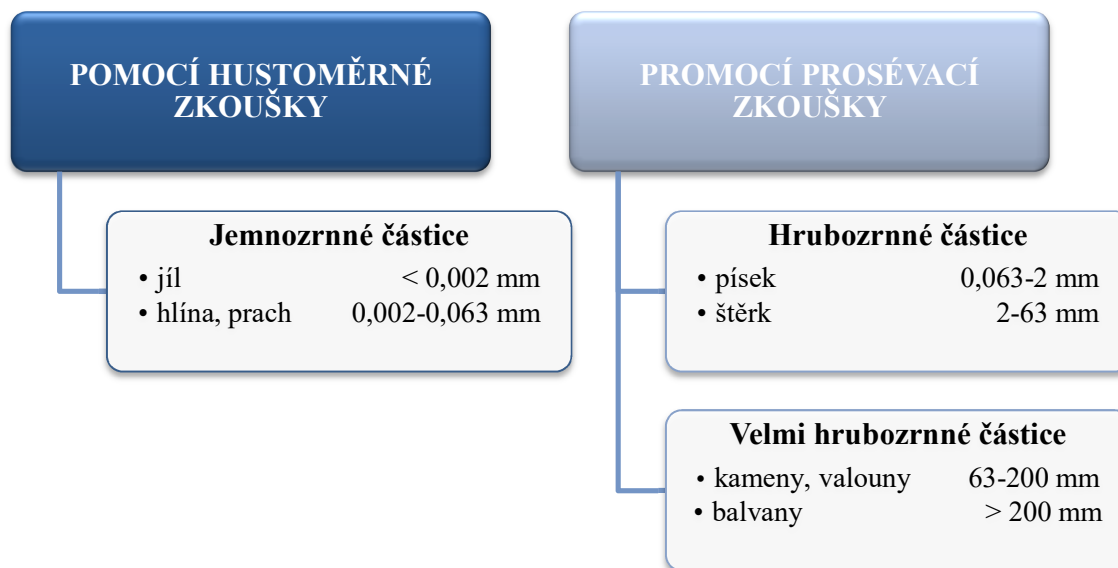
3 LABORATORNÍ ČÁST

V této kapitole je popsáno vyhodnocení laboratorních zkoušek provedených ve Výzkumně vědeckém centru Doubravice (dále jen VVCD). Nejprve jsem zkoumanou zeminu v přirozeném složení zatřídil a následně za různých vlhkostních a chemických podmínek zkoumal hodnot CBR jednotlivých vzorků.

3.1 Zatřídění zeminy

Abych mohl odhadnout vlastnosti dané zeminy, je nezbytné nejprve její vzorek zatřídít. Základem klasifikace je mezinárodní klasifikace USCS (Unified Soil Classification System), z které vychází česká ČSN 73 1001 – Základová půda pod plošnými základy a evropská norma EN ISO 14688 – 1 – Geotechnický průzkum a zkoušení – část 1, Pojmenování a zatřídění zemin.

Dle velikosti částic lze rozlišit zeminy s jemnozrnnými, hrubozrnnými a velmi hrubozrnnými částicemi, viz blíže obrázek níže (Obr. 3). Zeminy obsahují jemnozrnné částice se vyznačují svou soudržností, zatímco s růstem velikosti zrna, roste i nesoudržnost zeminy. [14]



Obr. 3 Klasifikace zemin dle velikosti částic zemin

Zdroj: [14]

Po provedení hustoměrné a prosévací zkoušky se zemina zatřídí dle mezinárodně uznávaného značení zachyceného v následující tabulce (Tab. 10).

Tab. 10 Značení zemin

Zemina	Anglický název	Zkratka	Význam
Jíl	clay	Cl	Jako hlavní složka
		cl	Jako doplňková složka
Prach nebo hlína	silt	Si	Jako hlavní složka
		si	Jako doplňková složka
Písek	sand	Sa	Jako hlavní složka
		sa	Jako doplňková složka
Štěrka	gravel	Gr	Jako hlavní složka
		gr	Jako doplňková složka
Valouny/kameny	cobble	Co	Jako hlavní složka
		co	Jako doplňková složka
Balvany	boulder	Bo	Jako hlavní složka
		bo	Jako doplňková složka

Zdroj: [14]

Pro označení velikosti zrna se u prachu, písku a štěrku dále používá následující označení:

- jemnozrná F např. FSa, fsi,
- hrubozrná M např. MSa, msi,
- velmi hrubozrná C např. CSa, csi.

3.1.1 Síťový rozbor

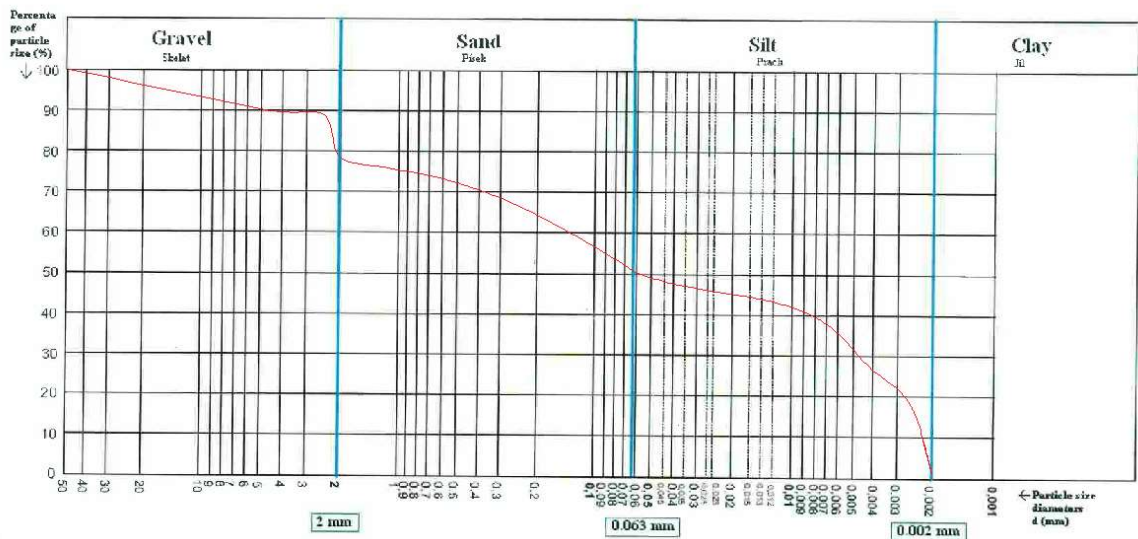
Smyslem síťového rozboru je rozdělit vzorek zeminy z různě velkých částic na jednotlivé zrnitostní frakce, pomocí řady normativních sít a misky, která zachytí propadlá zrna menší než 0,063 mm, umístěné na vibrační desce. [14] Vzorek suché zeminy jsem nasypal na vrchní síto a vibrace z vibrační desky způsobily propad jednotlivými síty. Následně jsem jednotlivá síta zvážil a zaznamenal procentuální zastoupení jednotlivých frakcí. Zkouška byla provedena z 2256,3 g zeminy.

Tab. 11 Sítový rozbor dle ČSN EN 933-1

Hmotnost vzorku M_1 442,44 g				Celková hmotnost zeminy M_2 892,722 g
velikost otvorů síta [mm]	hmotnost zachyceného materiálu R_i [g]	procento zbytku na sítích $100 \times R_i / M_1$ [%]	souhrnné procento propadu $100 - \Sigma(100 \times R_i / M_1)$ [%]	Celkové % nadsítné části $100 - \Sigma(100 \times R_i / M_2)$ [%]
63	75,06	16,97	83,03	91,59
56	0,28	0,06	82,97	91,56
45	3,27	0,74	82,23	91,19
35,5	6,82	1,54	80,69	90,43
25	8,53	1,93	78,76	89,47
20	106,58	24,09	54,67	77,54
16	8,14	1,84	52,83	76,62
0,5	50,88	11,50	41,33	70,92
0,25	41,97	9,49	31,85	66,22
0,063	140,87	31,84	0,00	50,43

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Z naměřených hodnot jsem sestavil křivku zrnitosti, která je zachycena na následujícím obrázku (viz Obr. 4).



Obr. 4 Křivka zrnitosti

Zdroj: vlastní zpracování v AutoCad, 2019

Z křivky zrnitosti jsem odvodil číslo nestejnozrnnosti C_u jako:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,17}{0,0022} = 77,27$$

C_u . . . číslo nestejnozrnnosti

d_{60} . . . 60% propad dle křivky zrnitosti

d_{10} . . . 10% propad dle křivky zrnitosti

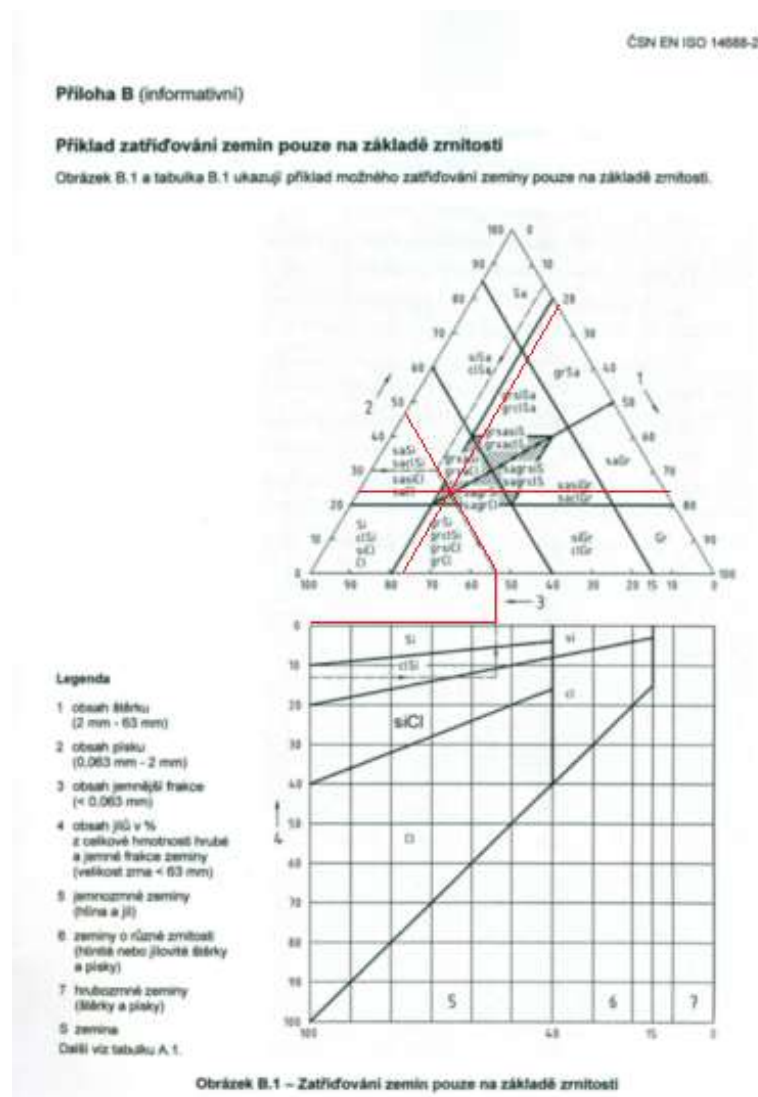
a číslo křivosti C_c , jako:

$$C_c = \frac{d_{30} \cdot d_{30}}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{0,0049 \cdot 0,0049}{0,0022 \cdot 0,17} = \mathbf{0,064}$$

C_c . . . je číslo křivosti

d_{30} . . . 30% propad dle křivky zrnitosti

Z křivky zrnitosti vyplývá procentuální podíl jednotlivých složek a to štěrk (22,46 %), písek (27,11 %) a jemnozrné částice (50,43 %). Díky těmto naměřeným hodnotám může být provedeno zatřídění na základě zrnitosti viz Obr. 5.



Obr. 5 Zatřídění zeminy pouze na základě zrnitosti

Zdroj: [5]

Zemina je zatříděna jako grsaCl = písko-šterkový jíl.

3.1.2 Hustoměrná zkouška

Hustoměrnou zkouškou se zjišťuje zrnitost soudržných zemin se zrny menšími než 0,063 mm. Zrnitost se určuje na základě Stokesova usazovacího zákona.

Vyhází se z předpokladu, že jak pevné částice postupně sedimentují, klesá hustota suspenze. Metoda je založena na měření hustoty v čase. [3]

K výkonu zkoušky jsou potřeba tyto pomůcky:

- hustoměr,
- kalibrovaný měrný válec (1000 ml),
- váhy,
- stopky,
- teploměr,
- míchadlo.

Nejprve jsem musel provést přípravu vzorku, kdy zkoušku lze provést z minimálně 30 g vysušeného propadu frakce menší než 0,063 mm.

Během samotné zkoušky jsem odebral 30,18 g vzorku a ten jsem umístil do měrného válce. Válec byl doplněn vodou po rysku jednoho litru. Teploměrem jsem změřil teplotu suspenze a po pěti minutovém míchání vzorku jsem zahájil měření změn hustoty v čase a provádí se pokud je obsah zrn menších jak 0,063 mm.

Vyhodnocení

Určení pravého čtení hustoměru:

$$H_{op} = R'_h + t_m$$

H_{op} je pravé čtení hustoměru [kg/m^3]

R'_h je hodnota odečtená na hustoměru [g/cm^3]

T_m je oprava o teplotu

Výpočet efektivní hloubky hustoměru:

$$H_r = 225,4 - 4,7 * H_{op}$$

H_{op} je pravé čtení hustoměru [kg/m^3]

H_r je efektivní hloubka hustoměru [mm]

Výpočet náhradního průměru zrna:

$$d_i = 0,005531 * \sqrt{\frac{\eta * H_r}{(\rho_s - 1) * t}}$$

d_i je náhradní průměr zrna [mm]

η ke dynamická viskozita vody

H_r je efektivná hloubka hustoměru [mm]

ρ_s je zdánlivá hustota pevných částic [g/cm³]

t je čas [s]

Výsledek zkoušky jsem zanesl do následující tabulky (Tab. 12).

Tab. 12 Sítový rozbor pro zrna < 0,063 mm

Čas [s]	Teplota [°C]	Hustota [g/cm ³]	Rh	Hop	hr [mm]	d_i [mm]	K [%]
20	20	1,016	16	16	150,2	0,013107	86,46334402
40	20	1,0156	15,6	15,6	152,08	0,009326	84,30176042
60	20	1,0148	14,8	14,8	155,84	0,007708	79,97859321
80	20	1,0134	13,4	13,4	162,42	0,006815	72,41305061
100	20	1,013	13	13	164,3	0,006131	70,25146701
120	20	1,0124	12,4	12,4	167,12	0,005644	67,00909161
150	20	1,0116	11,6	11,6	170,88	0,005105	62,68592441
180	20	1,011	11	11	173,7	0,004698	59,44354901
210	20	1,0104	10,4	10,4	176,52	0,004385	56,20117361
240	20	1,01	10	10	178,4	0,004124	54,03959001
270	20	1,0092	9,2	9,2	182,16	0,003929	49,71642281
300	20	1,0091	9,1	9,1	182,63	0,003732	49,17602691
340	20	1,009	9	9	183,1	0,00351	48,63563101
360	20	1,009	9	9	183,1	0,003411	48,63563101
420	20	1,0084	8,4	8,4	185,92	0,003182	45,39325561
480	20	1,008	8	8	187,8	0,002992	43,23167201
540	20	1,0074	7,4	7,4	190,62	0,002842	39,98929661
600	20	1,007	7	7	192,5	0,002709	37,82771301
660	20	1,0064	6,4	6,4	195,32	0,002602	34,58533761
720	20	1,006	6	6	197,2	0,002503	32,42375401
780	20	1,005	5	5	201,9	0,002433	27,019795
840	20	1,004	4	4	206,6	0,002372	21,615836
900	20	1,0034	3,4	3,4	209,42	0,002307	18,3734606
960	20	1,0026	2,6	2,6	213,18	0,002254	14,0502934
1020	20	1,0018	1,8	1,8	216,94	0,002206	9,727126202
1080	20	1,0012	1,2	1,2	219,76	0,002157	6,484750801
1140	20	1,0006	0,6	0,6	222,58	0,002113	3,242375401

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

3.2 Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic pomocí pyknometru - dle ČSN CEN ISO/TS 17892-2

Hustota pevných částic je poměr hmotnosti částic a jejich objemu. Pro provedení této zkoušky jsou potřeba následující pomůcky [3]:

- váhy (s přesností 0,01 g),
- pyknometry,
- písková lázeň,
- sušárna.

Postup zkoušky

Nejprve bylo nutné provést kalibraci hmotnosti suchého pyknometru a to jeho naplněním po okraj pomocnou kapalinou a vytlačení přebytečné vody pomocí zátky s kapilární trubičkou. Po okamžitém osušení vnějšího povrchu jsem pyknometr zvažil a stanovil celkovou hmotnost s přesností na 0,01 g. Pomocnou kapalinu jsem následně vylil a pomocí trychtýře do pyknometru umístil zkoumaný vzorek zeminy o minimální hmotnosti 10 g. Vzorek byl vysušený a rozemletý.

Po umístění vzorku jsem stanovil hmotnost m_2 . Pyknometr spolu se zkoumaným vzorkem musel být doplněn pomocnou kapalinou do výšky 10 – 20 mm nad zeminu. Pyknometr byl umístěn do pískové lázně k povaření. Tím došlo k odstranění uzavřeného vzduchu. V dalším kroku se vzorek nechal vychladnout na laboratorní teplotu. Poté jsem pyknometr opět doplnil pomocnou kapalinou a změřil teplotu a hmotnost pyknometru zcela vyplněného saturovaným zkušebním vzorkem a pomocnou kapalinou.

Výsledek se určí jako :

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} * \rho_w$$

ρ_s ... hustota pevných částic g/cm³

m_0 ... hmotnost suchého pyknometru [g]

m_1 ... hmotnost pyknometru zcela naplněného pomocnou kapalinou [g]

m_2 ... hmotnost suchého pyknometru s vysušeným zkušebním vzorkem [g]

m_3 ... hmotnost pyknometru zcela naplněného saturovaným zkušebním vzorkem a pomocnou kapalinou [g]

m_4 ... hmotnost vysušeného zkušebního vzorku [g]

ρ_w ... hustota pomocné kapaliny (viz Tab. 13) [g/cm³]

Tab. 13 Hustota pomocné kapaliny

Teplota°C	Hustota g/cm ³	Teplota°C	Hustota g/cm ³	Teplota°C	Hustota g/cm ³
10	0,99973	17	0,99880	24	0,99733
11	0,99963	18	0,99862	25	0,99708
12	0,99953	19	0,99843	26	0,99681
13	0,99941	20	0,99823	27	0,99654
14	0,99927	21	0,99802	28	0,99626
15	0,99913	22	0,99780	29	0,99598
16	0,99897	23	0,99757	30	0,99568

Zdroj: [3]

Zkoušku byla provedena ve čtyřech pyknomech o objemu (V) 100 ml a výsledek zanesen do následující tabulky (Tab. 14).

Tab. 14 Hustota odvzdušněné vody při různých teplotách, opravená o vztlak ve vzduchu

Označení pykometru	1	2	3	4
m ₀ [g]	54,66	53,23	84,1	95,13
m ₁ [g]	136,44	133,22	145,8	151,37
m ₂ [g]	33,95	32,53	64,18	74,12
m ₃ [g]	149,25	146,08	157,81	164,61
m ₄ [g]	21	21	21,12	21,01
t [°C]	20	20	21	21

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Na základě výše uvedených hodnot jsem stanovil výsledné hodnoty měření:

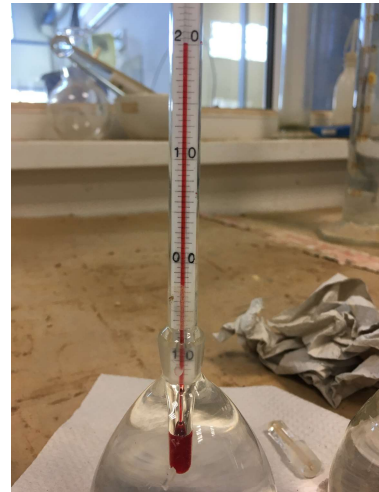
$$\rho_{s1} = \frac{20,95}{(136,44-33,95)-(149,25-54,61)} * 0,99823 = 2,668 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{s2} = \frac{20,97}{(133,22-32,53)-(146,08-5,2)} * 0,99823 = 2,685 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{s3} = \frac{21,12}{(145,8-64,18)-(157,81-84,1)} * 0,99802 = 2,670 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{s4} = \frac{21,01}{(151,37-74,12)-(164,61-95,13)} * 0,99802 = 2,698 \text{ g/cm}^3.$$

Aritmetickým průměrem jsem stanovil zdánlivou hustotu částic zkoušeného vzorku na 2,680 g/cm³.



Obr. 6 Vzorek v pyknometru a pískové lázni a určení teploty pomocné kapaliny

Zdroj: vlastní fotografie, 2019

3.3 Určení konzistenčních mezí

Konzistence je stav zeminy, který v závislosti na typu a vlhkosti vyjadřuje odolnost proti deformaci. Mezi jednotlivými konzistentními stavy zeminy jsou tzv. konzistenční meze. Lze rozeznat dvě konzistenční meze a to mez tekutosti a mez plasticity.

Plasticitu si lze představit jako schopnost materiálu, vystaveného vnějšímu silovému působení, stále zachovávat stejný odpor a měnit svůj tvar. [15]

3.3.1 Mez tekutosti – dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12

Mez tekutosti, udávaná v procentech, je vlhkost, ze které zemina přechází z tekutého do plastického stavu. Zjišťuje se pomocí Cassagrandeho zkoušky nebo kuželové zkoušky. [1]

Pro provedení této zkoušky jsou potřeba následující pomůcky:

- Vasilievův přístroj s příslušenstvím,
- váženky,
- sušička,
- keramická miska,
- ocelové pravítko.

3.3.3.1 Příprava vzorku

Pro výkon této zkoušky je zapotřebí odebrat minimálně 200 g zeminy v přirozeném stavu, proseté přes síto 0,4 mm. Zemina byla umístěna do keramické misky a po přidání vody řádně

promíchána. Promíseným vzorkem jsem naplnil hliníkovou misku a povrch zarovnal ocelovým pravítkem. Tímto byl vzorek připraven k samotné zkoušce.

3.3.3.2 Postup zkoušky

Namíchaný vzorek v hliníkové misce jsem umístil bezprostředně pod hrot penetračního trnu a přístroj byl spuštěn. Po 5 vteřinách jsem na měřidle poklesu odečetl hodnotu penetrace, údaj zaznamenal a ze vzorku odebral přibližně 20 gramů zeminy pro zjištění vlhkosti. Celý postup jsem čtyři krát opakoval při rozdílných vlhkostech vzorku. Pro vyhodnocení jsem data zanesl do grafu a určil vlhkost odpovídající 20mm penetraci, čímž jsem zjistil hodnotu vlhkosti (w_1).

3.3.3.3 Vyhodnocení

Po provedení výše popsané zkoušky byly zjištěny hodnoty vlhkosti zachycené v tabulce níže (Tab. 15).

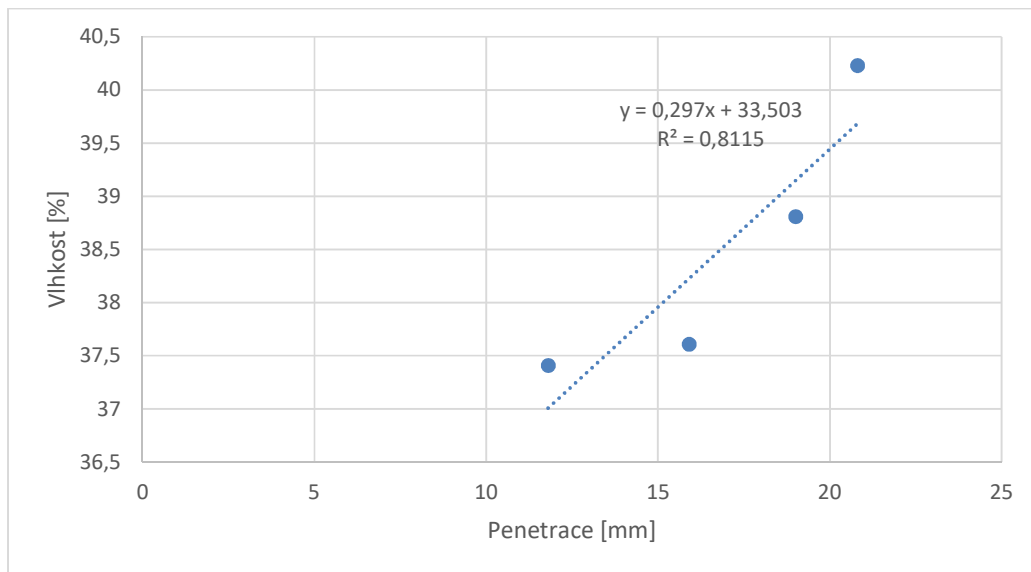
Tab. 15 Naměřené hodnoty penetrační zkoušky

Vzorek	Penetrace	Vlhkost
1	118	37,41
2	159	37,61
3	170	38,81
4	208	40,23

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Závislost penetrace na vlhkosti je vyobrazena v grafu, ze kterého byla odečtena předpokládaná vlhkost při penetraci 20 mm.

Graf 1 Mez tekutosti - závislost penetrace na vlhkosti



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

$$y = 0,297 * 20 + 33,503 = 39,44 \%$$



Obr. 7 Vasilievův přístroj

Zdroj: vlastní fotografie, 2019

3.3.2 Mez plasticity

Mez plasticity, udávaná v procentech, je vlhkost, ze které zemina přechází z plastického do pevného stavu.

Pro provedení této zkoušky jsou potřeba následující pomůcky:

- odpařovací misky,
- podkladní sklo,
- sušička,
- laboratorní váhy,

Postup zkoušky:

Do keramické misky jsem vložil zeminu frakce < 0,5 mm, přidal malé množství vody a důkladně promíchal. Z takto navlhčené zeminy jsem odebral malé množství vzorku a zformoval ho do kuličky, kterou jsem následně rozválel na laboratorním skle do podoby válečků o průměru 3 mm. Tento postu jsem opakoval za stále se zvyšující vlhkosti, do doby, než se váleček začal drolit na 8-10mm dlouhé kousky. Tyto kousky jsem umístil do odpařovacích misek a po vysušení byla určena jejich vlhkost. Pro zvýšení přesnosti jsem tuto zkoušku provedl 3x a výsledné vlhkosti zprůměroval do hledané meze plasticity.

Vyhodnocení:

Po provedení výše popsané zkoušky byly zjištěny hodnoty vlhkosti zachycené v tabulce níže (viz Tab. 16).

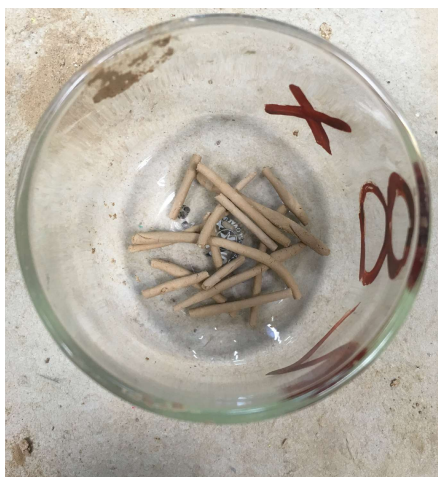
Tab. 16 Naměřené hodnoty meze plasticity

Vzorek	Hmotnost vlhkého vzorku [g]	Hmotnost sušiny [g]	Vlhkost [%]
01	17,27	13,97	23,62
02	32,79	26,54	23,54
03	30,12	24,35	23,69

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Aritmetickým průměrem jsem určil výslednou hodnotu meze plasticity:

$$w_p = \frac{0,2362 + 0,2354 + 0,2369}{3} = 0,236166 = \mathbf{23,61\%}$$



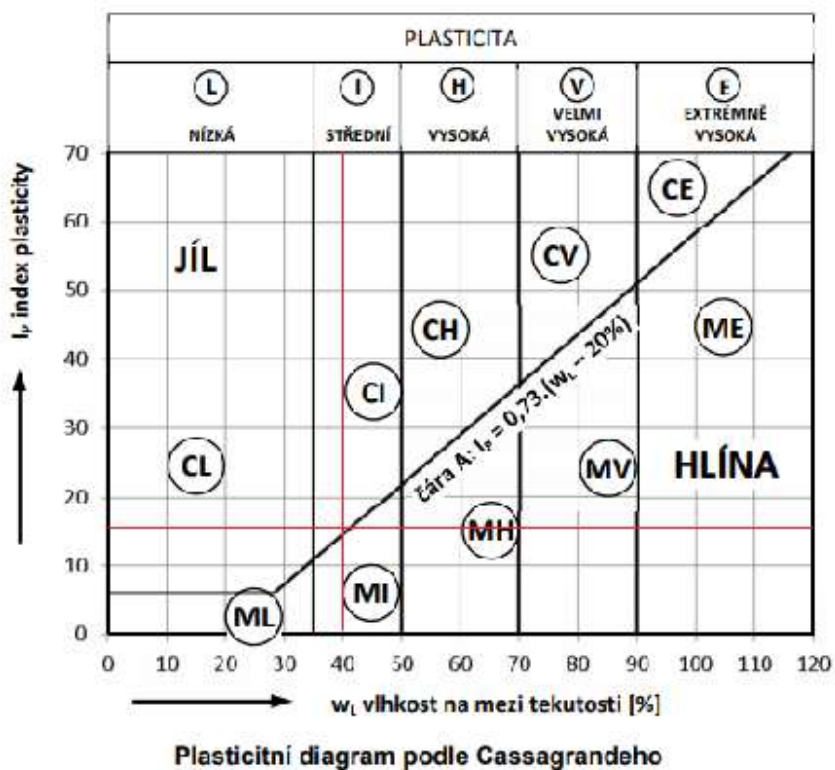
Obr. 8 Vysušené válečky

Zdroj: vlastní fotografie, 2019

3.3.3 Index plasticity

Hodnota vyjadřující rozsah vlhkosti ve kterém je zemina plastická. Udává se rozdílem meze plasticity a meze tekutosti. Čím je index plasticity menší tím zemina snáze konsoliduje, je propustnější, lépe zpracovatelná ale snadno rozbředá.

$$I_p = W_L - W_p = 39,44 - 23,61 = 15,83$$



Obr. 9 Cassagrandeho diagram plasticity

Zdroj: [5]

Na základě Cassagrandeho diagramu vyplývá že se jedná o CI = jííl se střední plasticitou.

3.3.4 Stupeň konzistence

Dle hodnoty stupně konzistence je možné orientačně určit konzistenci zeminy

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_L - w} = \frac{w_l - w}{I_p} = \frac{33,44 - 11,35}{15,83} = \mathbf{1,39}$$

3.4 Zkouška Proctor standard

Proctorova zkouška slouží ke stanovení optimální vlhkosti při níž se dosáhne největší objemové hmotnosti suché zeminy. Zkouška probíhá v souladu s ČSN 72 1015 "Laboratorní stanovení zhutnitelnosti zemin". Pro provedení této zkoušky jsou potřeba následující pomůcky:

- Proctorova forma se snímatelným nástavcem a deskou,
- pěkch,
- ocelová deska,
- síto,
- odměrné válce,
- stříčka,
- váhy,
- sušička.

Postup zkoušky

Vzorek jsem vysušil při teplotě 60 °C v laboratorní peci a prošel přes síto 5 mm, nadsítný vzorek nebyl v této zkoušce již použit.

Dle třídy zeminy jsem odhadl optimální vlhkost na 15 % a první vzorek navlhčil na cca 12 %. Zeminu jsem postupně ve třech podobně vysokých vrstvách ukládal do moždíře typu A o rozměrech 101,5 x 117 mm. Každá jednotlivá vrstva byla hutněna ve specializovaném přístroji 25 ranami normativního pěkchu o hmotnosti 2 500 g z výšky 305 mm. Po zhutnění jsem sejmul prstencový nástavec z moždíře a výšku zeminy zarovnal s horní hranou moždíře. Vzorek jsem zvážil a zaznamenal do tabulky níže. Následně jsem vzorek rozpůlil a z jeho středu odebral vzorek cca 200 g, který byl následně vysušen a určil přesně počáteční vlhkost.

Naměřené hodnoty zachycuje následující tabulka (Tab. 17).

Tab. 17 Naměřené hodnoty zkoušky Proctor Standard

Zkouška	1	2	3	4
m_m	5790	5790	5790	5790
m_s	7547,7	7665,82	7757,49	10433,74
V_n	947	947	947	947
ρ_v	1860	1985	2082	2201
ρ_d	1788,461538	1855,14	1924,214	1967,99
Vlhkost zeminy	4	7,1	8,20	10,11

Zkouška	5	6	7
m_m	5790	5790	5790
m_s	10469,3	12531	10521
V_n	947	947	947
ρ_v	2218	2138,324	2130,503
ρ_d	1971,556	1880,176	1816,751
Vlhkost zeminy	12,55	14,06	17,27

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

m_m ... hmotnost prázdného moždíře [g]

m_s ... hmotnost moždíře plně nahutněného zeminou [g]

V_n ... objem moždíře [cm^3]

ρ_v ... objemová hmotnost vlhké zeminy [kg/m^3]

ρ_d ... objemová hmotnost suché zeminy [kg/m^3]

w ... vlhkost vzorku [%]

Vztah pro určení objemové hmotnosti vlhké směsi [13]:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1)}{V} * 1000$$

ρ ... objemová hmotnost zhutněné vlhké zeminy [kg/m^3]

m_1 ... hmotnost formy a základní desky [g]

m_2 ... hmotnost formy a základní desky a zhutněné zeminy [g]

V ... objem formy [cm^3]

Vztah pro určení objemové hmotnosti suché směsi [13]

$$\rho_d = \frac{100 * \rho}{100 + w}$$

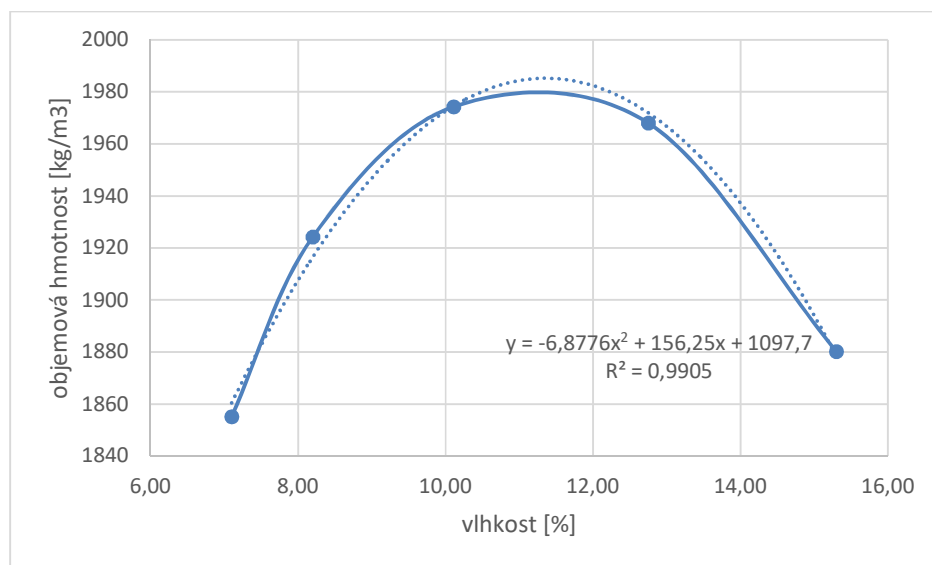
ρ_d ... objemová hmotnost zhutněné suché zeminy [kg/m³]

ρ ... objemová hmotnost zhutněné vlhké zeminy [kg/m³]

w ... vlhkost směsi [%]

Výstupem této zkoušky je graf, který ukazuje závislost mezi objemovou hmotností suché zeminy a vlhkostí (Graf 2).

Graf 2 Závislost objemové hmotnosti na vlhkosti zeminy



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Z grafu vyplývá že nejvyšší objemová hmotnost tohoto konkrétního vzorku je 1985,14 kg/m³ a je dosažena při vlhkosti 11,35 %.

3.5 Zkouška CBR

Zkoušky CBR byly provedeny dle kapitoly 1. Kalifornský poměr únosnosti a jeho podstata této bakalářské práce. Vzorky o různých vlhkostech byly testovány bez doby zrání.

3.5.1 Proctor modifikovaný

Zkoušku jsem provedl v 7,856kg moždíři o průměru 150 mm. Vzorek byl hutněn v pěti vrstvách, každá vrstva hutněna 56 údery normovaného hutnícího pěchu o váze 2,5 kg a výškou dopadu 30,5 cm. Po zhutnění jsem sejmul prstencový nástavec a vzorek seříznul do roviny s horním okrajem formy. Takto připravený vzorek byl použit pro zkoušku CBR.

3.5.2 CBR

Vzorek v proktorově formě jsem umístil pod penetrační válec lisu a na horní plochu vzorku umístil zatěžovací prstenec s otvorem pro zatěžovací trn. Zaznamenal jsem nulové čtení a za nastavené rychlosti penetrace 1,27 mm/min jsem zaznamenával pokles válce každých 30 s a hodnoty zanesl do tabulky, grafu a určil hodnoty CBR.



Obr. 10 Vzorek zatížený prstencem připravený pro zkoušku CBR

Zdroj:vlastní fotografie, 2019



Obr. 11 Penetrační lis pro měření CBR

Zdroj: vlastní fotografie, 2019

3.5.2.1 Vzorek I – 9 %

První vzorek jsem připravil pod hranicí nejvyšší optimální hmotnosti na 9 %. Výsledky měření zanesl do tabulky níže (Tab. 18) a graficky znázornil viz Graf 3.

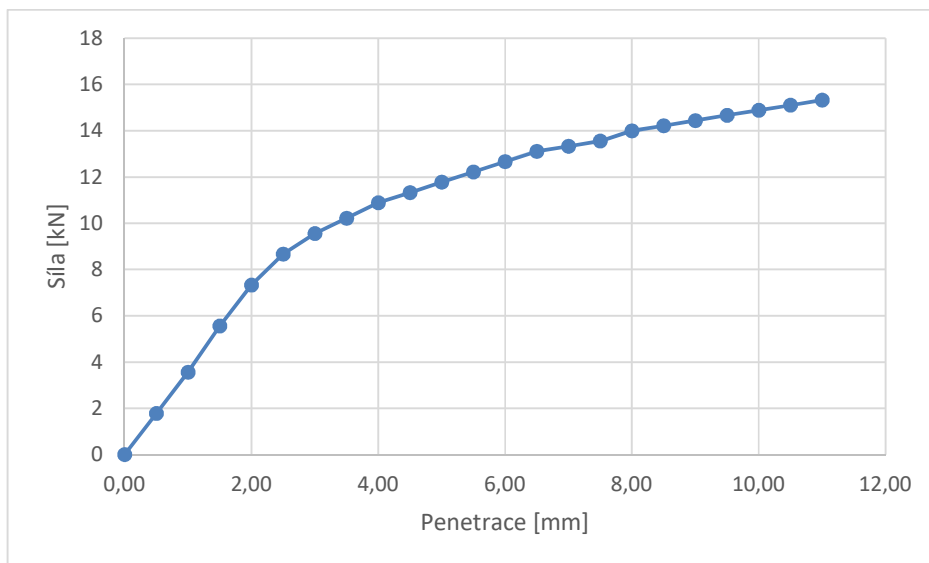
Tab. 18 Výstup zkoušky CBR I. - vlhkost 9,19 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	1,78
1,00	3,56
1,50	5,56
2,00	7,33
2,50	8,67
3,00	9,56
3,50	10,22
4,00	10,89
4,50	11,33
5,00	11,78
5,50	12,22
6,00	12,67
6,50	13,11
7,00	13,33
7,50	13,56

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
8,00	14
8,50	14,22
9,00	14,44
9,50	14,67
10,00	14,89
10,50	15,11
11,00	15,33

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 3 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška I.



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 8,67 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 11,78 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{8,67}{13,2} * 100 = \mathbf{65,68 \%}$$

$$CBR = \frac{11,78}{20,0} * 100 = \mathbf{58,9 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(64,15 - 5,76)}{58,76} * 100 = \mathbf{9,17 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(57,73 - 52,89)}{52,89} * 100 = \mathbf{9,15 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(59,46 - 42)}{54,42} * 100 = \mathbf{9,26 \%}$$

3.5.2.2 Zkouška II – vlhkost 12%

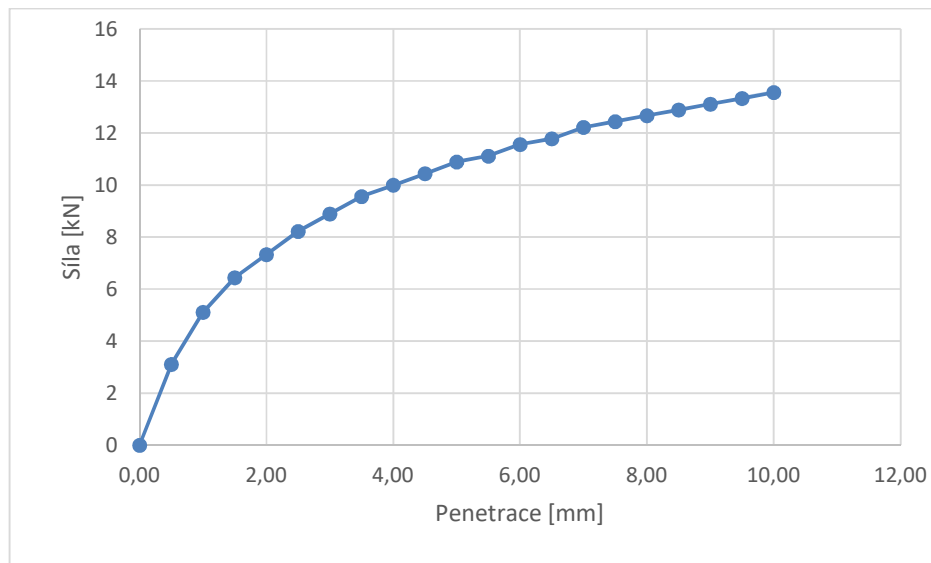
Druhý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsí na odhadovanou vlhkost 12 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 19), grafické zobrazení viz (Graf 4).

Tab. 19 Výstup zkoušky CBR II. - vlhkost 11,84 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	3,11
1,00	5,11
1,50	6,44
2,00	7,33
2,50	8,22
3,00	8,89
3,50	9,56
4,00	10
4,50	10,44
5,00	10,89
5,50	11,113
6,00	11,56
6,50	11,78
7,00	12,22
7,50	12,44
8,00	12,67
8,50	12,89
9,00	13,11
9,50	13,33
10,00	13,56

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 4 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška II



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 8,22 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 10,89 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{8,22}{13,2} * 100 = \mathbf{62,27 \%}$$

$$CBR = \frac{10,89}{20,0} * 100 = \mathbf{54,45 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(67,18 - 60,17)}{60,17} * 100 = \mathbf{11,65 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(15,39 - 1,73)}{13,73} * 100 = \mathbf{12,09 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(56,63 - 50,66)}{50,66} * 100 = \mathbf{11,78 \%}$$

3.5.2.3 Zkouška III – vlhkost 20 %

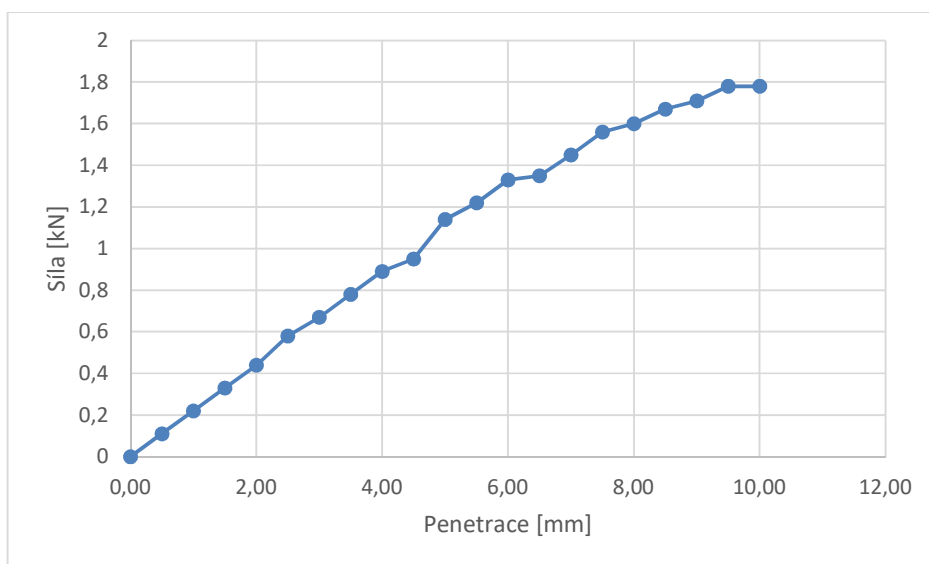
Třetí vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsí na odhadovanou vlhkost 20 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 20), grafické zobrazení viz (Graf 5).

Tab. 20 Výstup zkoušky CBR III. - vlhkost 20,3 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,16
1,00	0,23
1,50	0,25
2,00	0,27
2,50	0,28
3,00	0,3
3,50	0,33
4,00	0,36
4,50	0,38
5,00	0,4
5,50	0,42
6,00	0,43
6,50	0,44
7,00	0,45
7,50	0,46
8,00	0,47
8,50	0,47
9,00	0,48
9,50	0,48
10,00	0,48

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 5 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška III



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 0,28 kN
 Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 0,4 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{0,28}{13,2} * 100 = 2,12 \%$$

$$CBR = \frac{0,4}{20,0} * 100 = 2 \%$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{110,57 - 92,14}{92,14} * 100 = 20,00 \%$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(74,62 - 62,03)}{62,03} * 100 = 20,29 \%$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(121,95 - 101,12)}{101,12} * 100 = 20,59 \%$$

3.5.2.4 Vzorek IV – vlhkost 12,5 %

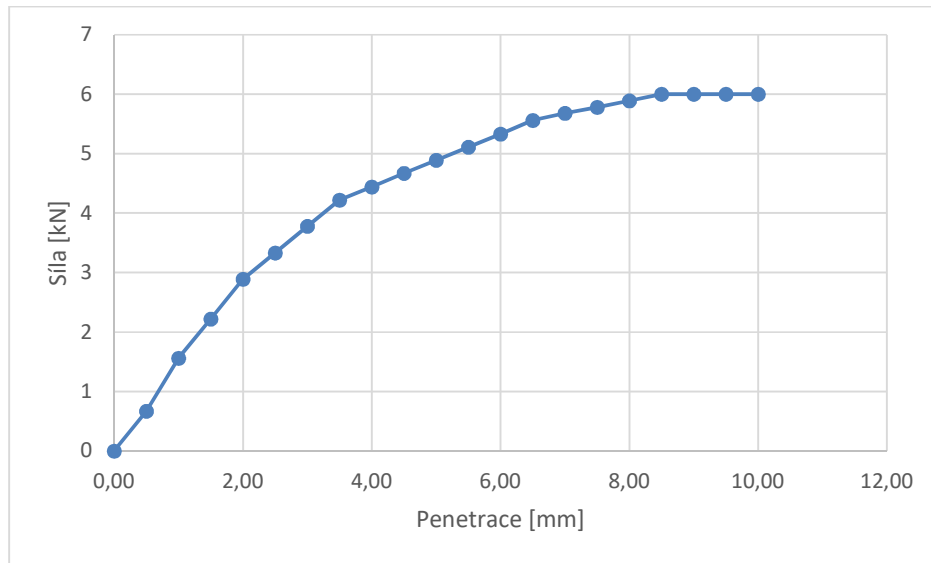
Čtvrtý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsi na odhadovanou vlhkost 12,5%. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 21), grafické zobrazení viz (Graf 6).

Tab. 21 Výstup zkoušky CBR IV. - vlhkost 12,43 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,67
1,00	1,56
1,50	2,22
2,00	2,89
2,50	3,33
3,00	3,78
3,50	4,22
4,00	4,44
4,50	4,67
5,00	4,89
5,50	5,11
6,00	5,33
6,50	5,56
7,00	5,68
7,50	5,78
8,00	5,89
8,50	6
9,00	6
9,50	6
10,00	6

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 6 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška IV



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 3,33 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 4,89 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{3,33}{13,2} * 100 = \mathbf{25,22 \%}$$

$$CBR = \frac{4,89}{20,0} * 100 = \mathbf{24,45 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(48,06 - 42,77)}{42,77} * 100 = \mathbf{12,36 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(70,59 - 62,78)}{62,78} * 100 = \mathbf{12,44 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(82,76 - 73,56)}{73,56} * 100 = \mathbf{12,5 \%}$$

3.5.2.5 Vzorek V – vlhkost 17 %

Pátý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsí na odhadovanou vlhkost 17 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 22), grafické zobrazení viz

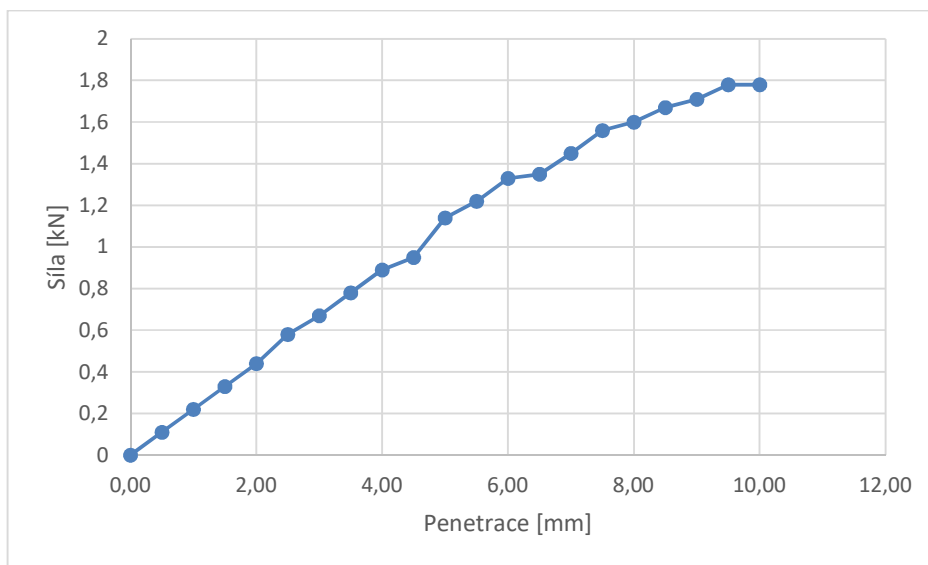
Graf 7

Tab. 22 Výstup zkoušky CBR V. - vlhkost 17,27 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,11
1,00	0,22
1,50	0,33
2,00	0,44
2,50	0,58
3,00	0,67
3,50	0,78
4,00	0,89
4,50	0,95
5,00	1,14
5,50	1,22
6,00	1,33
6,50	1,35
7,00	1,45
7,50	1,56
8,00	1,6
8,50	1,67
9,00	1,71
9,50	1,78
10,00	1,78

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 7 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška V



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 0,58 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 1,14 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{0,58}{13,2} * 100 = 4,39 \%$$

$$CBR = \frac{1,14}{20,0} * 100 = 5,7 \%$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(92,04 - 78,56)}{78,56} * 100 = 17,15 \%$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(120,45 - 102,51)}{102,51} * 100 = 17,50 \%$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(135,18 - 115,37)}{115,37} * 100 = 17,17 \%$$

3.5.2.6 Vzorek VI – vlhkost 13 %

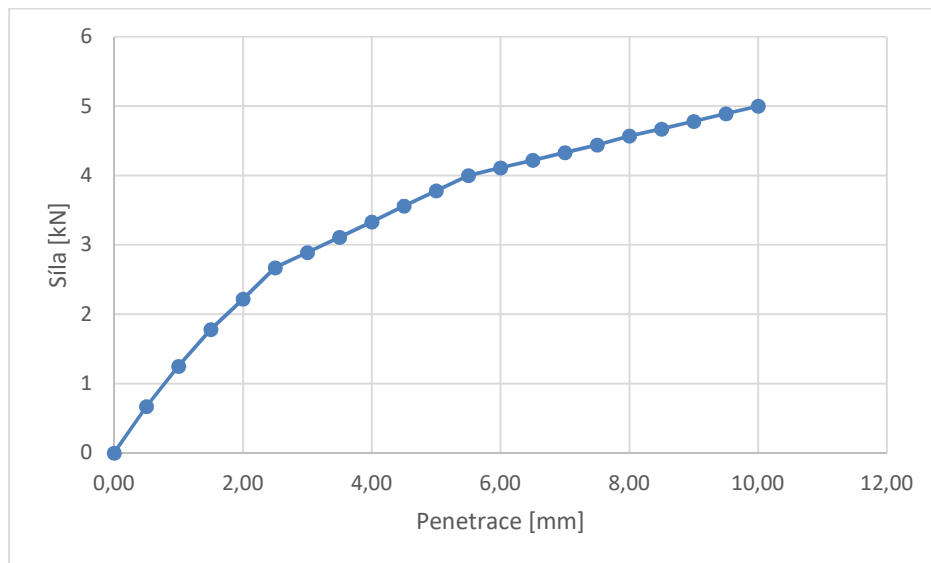
Šestý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsí na odhadovanou vlhkost 13 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 23), grafické zobrazení viz Graf 8.

Tab. 23 Výstup zkoušky CBR VI. - vlhkost 13,73 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,67
1,00	1,25
1,50	1,78
2,00	2,22
2,50	2,67
3,00	2,89
3,50	3,11
4,00	3,33
4,50	3,56
5,00	3,78
5,50	4
6,00	4,11
6,50	4,22
7,00	4,33
7,50	4,44
8,00	4,57
8,50	4,67
9,00	4,78
9,50	4,89
10,00	5

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 8 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VI



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 2,67 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 4 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{2,67}{13,2} * 100 = \mathbf{20,22 \%}$$

$$CBR = \frac{3,78}{20,0} * 100 = \mathbf{18,9 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(71,49 - 63,09)}{63,09} * 100 = \mathbf{13,31 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(113,93 - 100,05)}{100,05} * 100 = \mathbf{13,87 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(113,05 - 99,15)}{99,15} * 100 = \mathbf{14,01 \%}$$

3.5.2.7 Vzorek VII – vlhkost 19 %

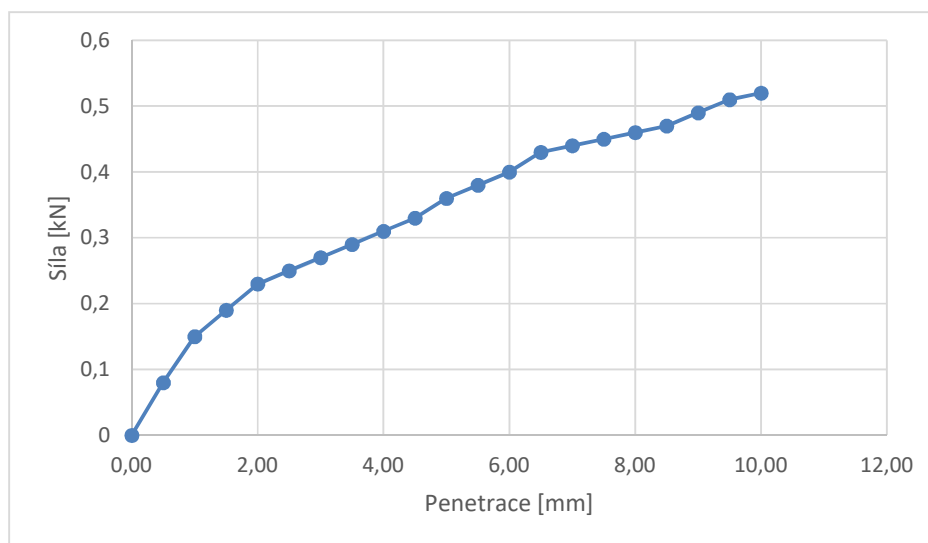
Sedmý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsi na odhadovanou vlhkost 19 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 24), grafické zobrazení viz Graf 9.

Tab. 24 Výstup zkoušky CBR VII. - vlhkost 19,21 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,08
1,00	0,15
1,50	0,19
2,00	0,23
2,50	0,25
3,00	0,27
3,50	0,29
4,00	0,31
4,50	0,33
5,00	0,36
5,50	0,38
6,00	0,4
6,50	0,43
7,00	0,44
7,50	0,45
8,00	0,46
8,50	0,47
9,00	0,49
9,50	0,51
10,00	0,52

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 9 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 0,25 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 0,36 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{0,25}{13,2} * 100 = \mathbf{1,89 \%}$$

$$CBR = \frac{0,36}{20,0} * 100 = \mathbf{1,80 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(144,19 - 121,58)}{121,58} * 100 = \mathbf{18,59 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(99,24 - 83,16)}{83,16} * 100 = \mathbf{19,33 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(120,74 - 100,86)}{100,86} * 100 = \mathbf{19,71 \%}$$

3.5.2.8 Vzorek VIII – vlhkost 1,5 %

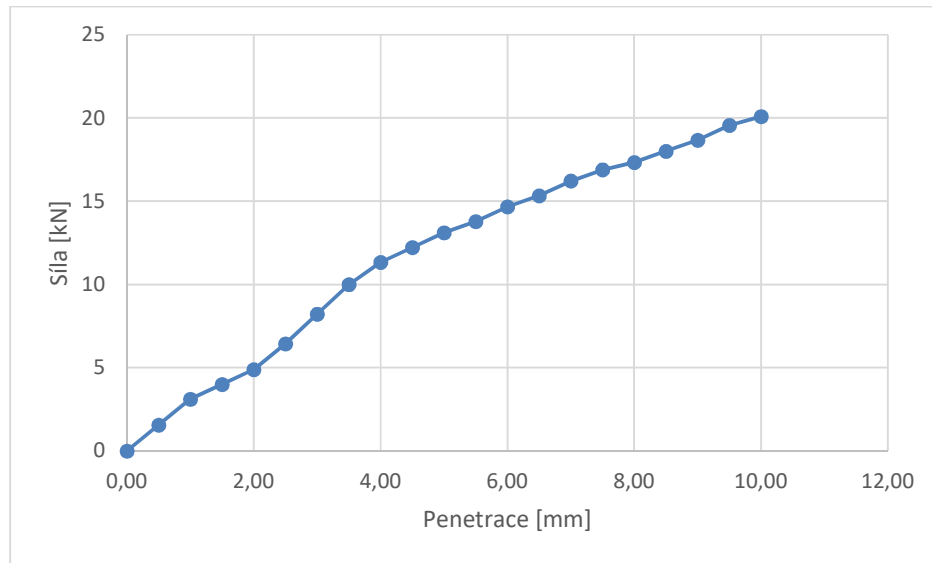
Osmý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsí na odhadovanou vlhkost 1,5 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 25), grafické zobrazení viz Graf 10.

Tab. 25 Výstup zkoušky CBR VIII. - vlhkost 1,55 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	1,56
1,00	3,11
1,50	4
2,00	4,89
2,50	6,44
3,00	8,22
3,50	10
4,00	11,33
4,50	12,22
5,00	13,11
5,50	13,78
6,00	14,67
6,50	15,33
7,00	16,22
7,50	16,89
8,00	17,33
8,50	18
9,00	18,67
9,50	19,56
10,00	20,09

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 10 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška VIII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 6,44 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 13,11 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{6,44}{13,2} * 100 = \mathbf{48,78 \%}$$

$$CBR = \frac{13,11}{20,0} * 100 = \mathbf{65,55 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(107,59 - 105,94)}{105,94} * 100 = \mathbf{1,55 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(86,44 - 85,11)}{85,11} * 100 = \mathbf{1,55 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(112,73 - 110,98)}{110,98} * 100 = \mathbf{1,57 \%}$$

3.5.2.9 Vzorek IX – vlhkost 3 %

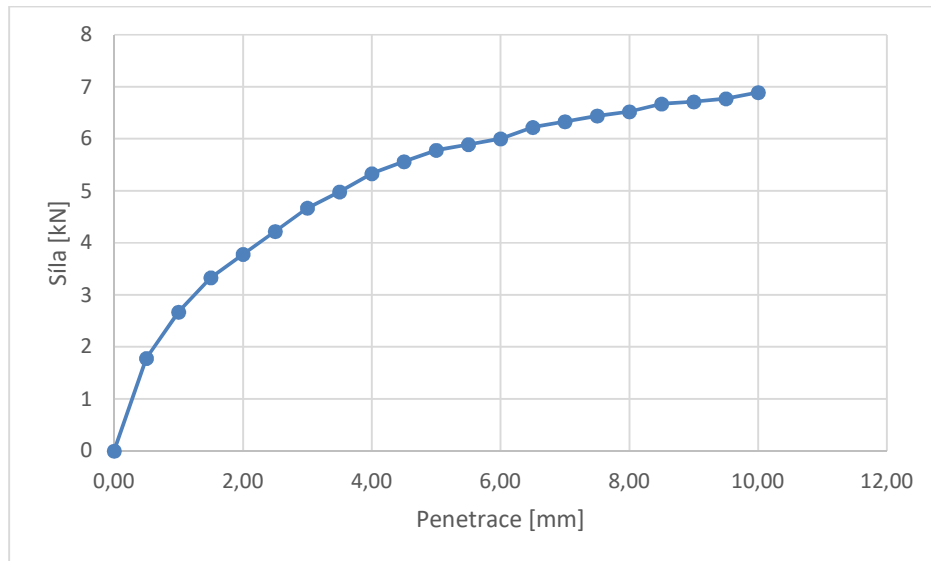
Devátý vzorek jsem připravil ze základní zeminy bez příměsi na odhadovanou vlhkost 3 %. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 26), grafické zobrazení viz Graf 11.

Tab. 26 Výstup zkoušky CBR IX. - vlhkost 3,18 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	1,78
1,00	2,67
1,50	3,33
2,00	3,78
2,50	4,22
3,00	4,67
3,50	4,98
4,00	5,33
4,50	5,56
5,00	5,78
5,50	5,89
6,00	6
6,50	6,22
7,00	6,33
7,50	6,44
8,00	6,52
8,50	6,67
9,00	6,71
9,50	6,77
10,00	6,89

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 11 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška IX



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 4,22 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 5,78 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{4,22}{13,2} * 100 = \mathbf{31,96 \%}$$

$$CBR = \frac{5,78}{20,0} * 100 = \mathbf{28,9 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(127,86 - 123,94)}{123,94} * 100 = \mathbf{3,16 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(124,95 - 121,07)}{121,07} * 100 = \mathbf{3,2 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(119,52 - 115,72)}{115,72} * 100 = \mathbf{3,2 \%}$$

3.5.2.10 Vzorek X – vlhkost 15 %

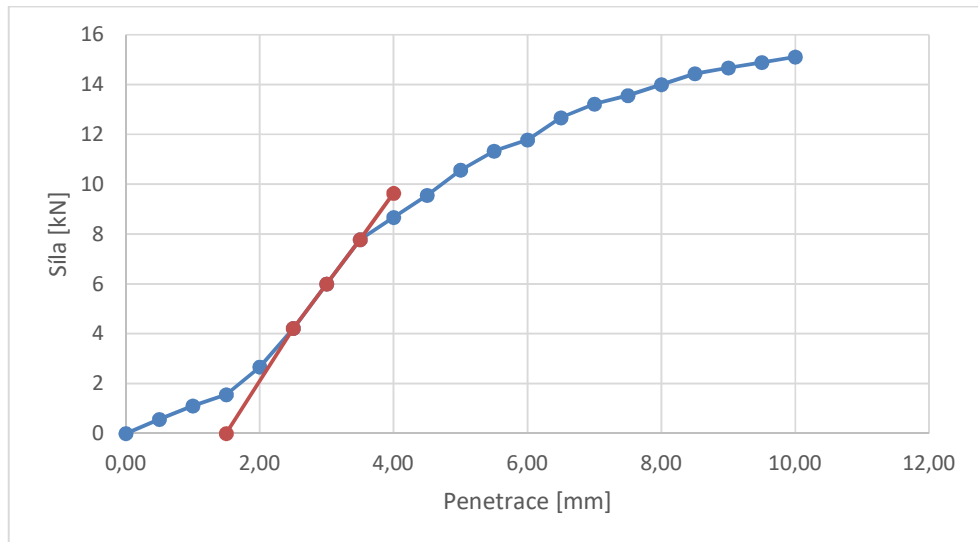
Desátý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 3% příměsí cementu. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 27), grafické zobrazení viz Graf 12.

Tab. 27 Výstup zkoušky CBR X. - vlhkost 15,3 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,57
1,00	1,11
1,50	1,56
2,00	2,67
2,50	4,22
3,00	6
3,50	7,78
4,00	8,67
4,50	9,56
5,00	10,57
5,50	11,33
6,00	11,78
6,50	12,67
7,00	13,22
7,50	13,56
8,00	14
8,50	14,44
9,00	14,67
9,50	14,89
10,00	15,11

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 12 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška X



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 4,22 kN po korelaci 6,77 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 10,57 kN po korelaci 9,11 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{6,77}{13,2} * 100 = \mathbf{51,28 \%}$$

$$CBR = \frac{9,11}{20,0} * 100 = \mathbf{45,55 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(143,78 - 12,46)}{124,46} * 100 = \mathbf{15,52 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(162,04 - 14,67)}{140,67} * 100 = \mathbf{15,19 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(127,46 - 11,64)}{110,64} * 100 = \mathbf{15,20 \%}$$

3.5.2.11 Vzorek XI – vlhkost 15 %

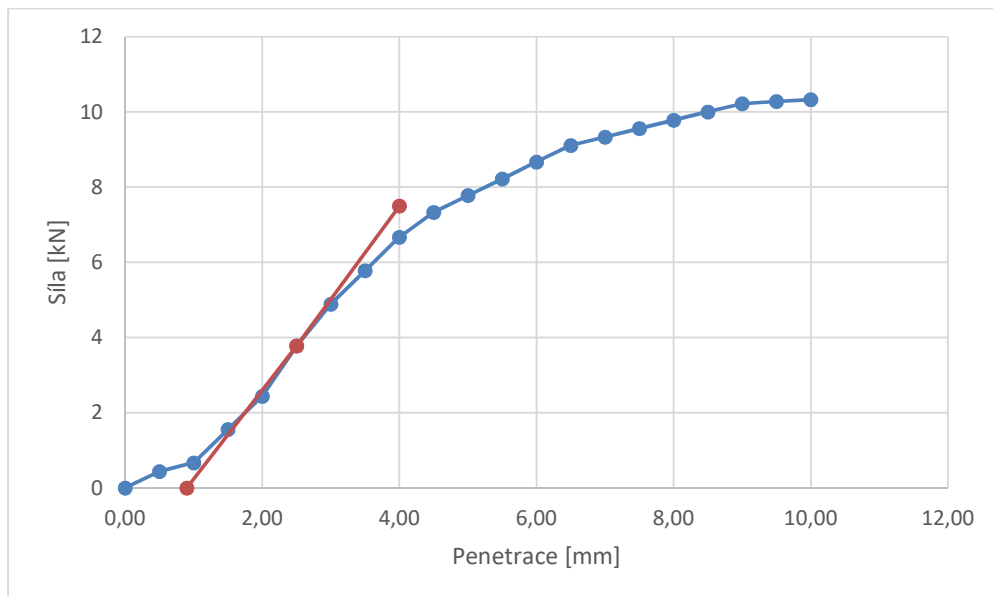
Jedenáctý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 3% příměsí Dorosolu C50. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 28), grafické zobrazení viz Graf 13.

Tab. 28 Výstup zkoušky CBR XI. - vlhkost 15,25 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,44
1,00	0,67
1,50	1,56
2,00	2,44
2,50	3,78
3,00	4,89
3,50	5,78
4,00	6,67
4,50	7,33
5,00	7,78
5,50	8,22
6,00	8,67
6,50	9,11
7,00	9,33
7,50	9,56
8,00	9,78
8,50	10
9,00	10,22
9,50	10,28
10,00	10,33

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 13 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XI



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 3,78 kN po korelaci 5,61 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5 mm je 7,78 kN po korelaci 8,54 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{5,61}{13,2} * 100 = 42,5 \%$$

$$CBR = \frac{8,54}{20,0} * 100 = 42,7 \%$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(151,16 - 13,12)}{131,12} * 100 = 15,28 \%$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(111,25 - 96,61)}{96,61} * 100 = 15,15 \%$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(138,98 - 12,47)}{120,47} * 100 = 15,36 \%$$

3.5.2.12 Vzorek XII – vlhkost 15 %

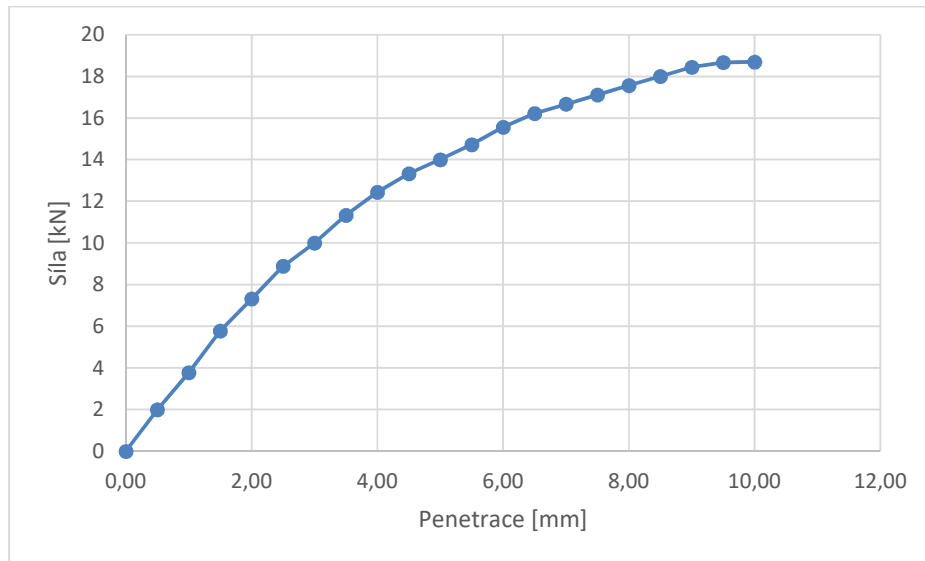
Dvanáctý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 3% příměsí vápna. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 29), grafické zobrazení viz Graf 14.

Tab. 29 Výstup zkoušky CBR XII. - vlhkost 15,36 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	2
1,00	3,78
1,50	5,78
2,00	7,32
2,50	8,89
3,00	10
3,50	11,333
4,00	12,44
4,50	13,33
5,00	14
5,50	14,72
6,00	15,56
6,50	16,22
7,00	16,67
7,50	17,11
8,00	17,56
8,50	18
9,00	18,44
9,50	18,67
10,00	18,69

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 14 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 8,89 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 14 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{8,89}{13,2} * 100 = 67,34 \%$$

$$CBR = \frac{14}{20,0} * 100 = 70 \%$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(143,32 - 124,13)}{124,13} * 100 = 15,45 \%$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(123,96 - 107,44)}{107,44} * 100 = 15,37 \%$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(140,87 - 122,2)}{122,2} * 100 = 15,27 \%$$

3.5.2.13 Vzorek XIII – vlhkost 15 %

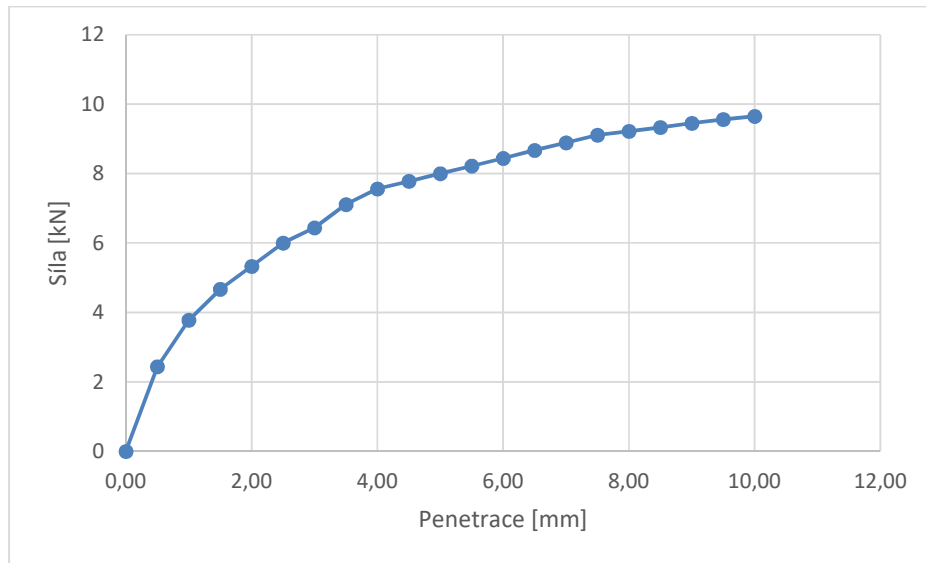
Třináctý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 5% příměsí cementu. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Druhý test jsem udělal na tom samém vzorku po 24 hodinách. Hodnoty obou testů zanesl do následujících tabulek (Tab. 30), grafické zobrazení viz .

Tab. 30 Výstup zkoušky CBR XIII - vlhkost 14,76 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	2,44
1,00	3,78
1,50	4,67
2,00	5,33
2,50	6
3,00	6,44
3,50	7,11
4,00	7,56
4,50	7,78
5,00	8
5,50	8,22
6,00	8,44
6,50	8,67
7,00	8,89
7,50	9,11
8,00	9,22
8,50	9,33
9,00	9,45
9,50	9,56
10,00	9,65

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 15 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XIII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 6,00 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 8,00 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{6}{13,2} * 100 = 45,45 \%$$

$$CBR = \frac{8}{20,0} * 100 = 40 \%$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy pro určení vlhkostí.

$$W = \frac{(129,63 - 112,18)}{112,18} * 100 = 14,76 \%$$

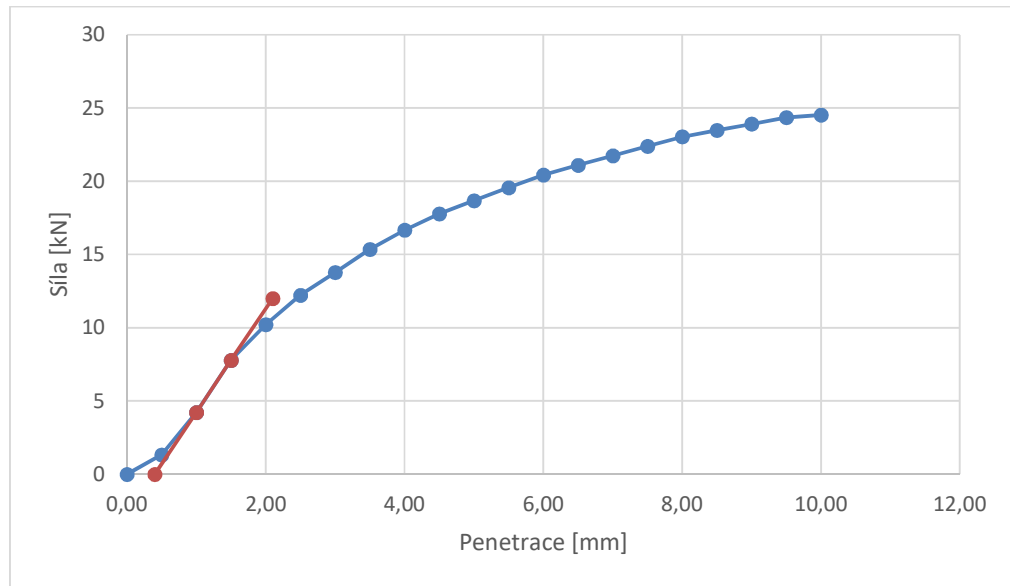
3.5.2.14 Vzorek XIII – po 24 hodinách

Tab. 31 Výstup zkoušky CBR XIV. - vlhkost 14.21 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	1,33
1,00	4,22
1,50	7,78
2,00	10,22
2,50	12,22
3,00	13,78
3,50	15,35
4,00	16,67
4,50	17,78
5,00	18,67
5,50	19,56
6,00	20,43
6,50	21,09
7,00	21,74
7,50	22,39
8,00	23,04
8,50	23,48
9,00	23,91
9,50	24,35
10,00	24,52

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 16 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XIV



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 12,22 kN po korelaci 13,53

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 18,67 kN po korelaci 19,42

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{13,52}{13,2} * 100 = \mathbf{102,42 \%}$$

$$CBR = \frac{19,42}{20,0} * 100 = \mathbf{97,1 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(157,95 - 13,65)}{137,65} * 100 = \mathbf{14,74 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(145,99 - 12,63)}{127,63} * 100 = \mathbf{14,38 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(135,88 - 1,7)}{119,7} * 100 = \mathbf{13,51 \%}$$

3.5.2.15 Vzorek XIV – vlhkost 15 %

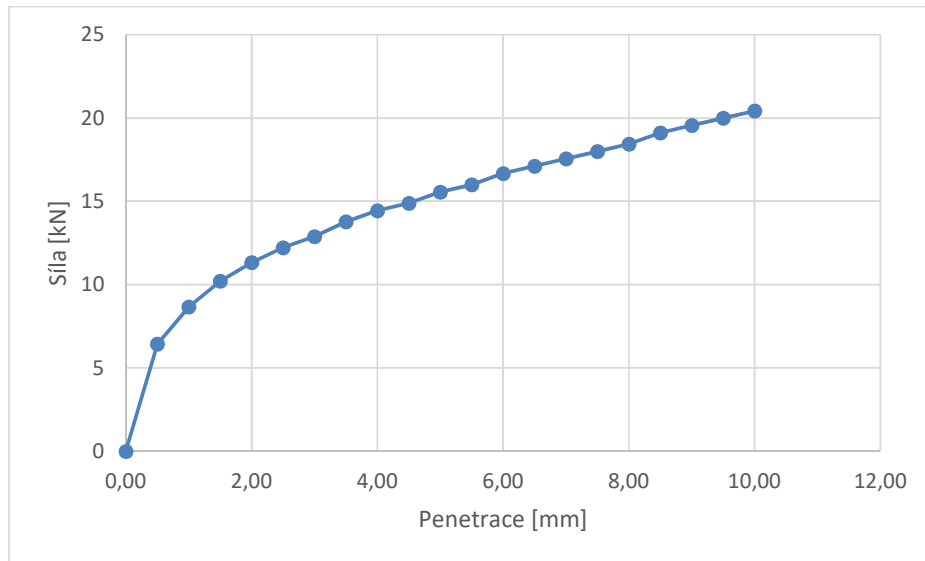
Čtrnáctý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 5% příměsí Dorosolu C50. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 32), grafické zobrazení viz Graf 17.

Tab. 32 Výstup zkoušky CBR XV. - vlhkost 15,28 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	6,44
1,00	8,67
1,50	10,22
2,00	11,33
2,50	12,22
3,00	12,89
3,50	13,78
4,00	14,44
4,50	14,89
5,00	15,56
5,50	16
6,00	16,67
6,50	17,11
7,00	17,56
7,50	18
8,00	18,44
8,50	19,11
9,00	19,56
9,50	20
10,00	20,43

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 17 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XV



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 12,22 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 15,56 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{12,22}{13,2} * 100 = \mathbf{92,57 \%}$$

$$CBR = \frac{15,56}{20,0} * 100 = \mathbf{77,80 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy pro určení vlhkostí.

$$W = \frac{(183,69 - 1,33)}{159,33} * 100 = \mathbf{15,28 \%}$$

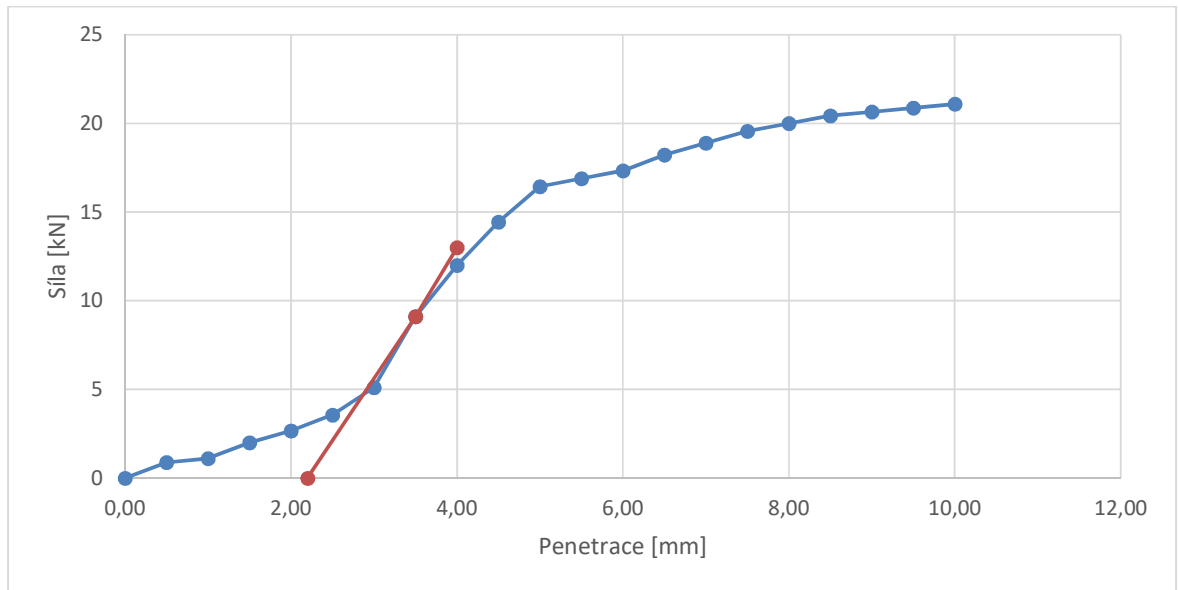
3.5.2.16 Vzorek XIV – po 24 hodinách

Tab. 33 Výstup zkoušky CBR XVI. - vlhkost 13,77 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,89
1,00	1,11
1,50	2
2,00	2,67
2,50	3,56
3,00	5,11
3,50	9,11
4,00	12
4,50	14,44
5,00	16,44
5,50	16,89
6,00	17,33
6,50	18,22
7,00	18,89
7,50	19,56
8,00	20
8,50	20,43
9,00	20,65
9,50	20,87
10,00	21,09

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 18 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVI



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 3,56 kN po korelaci 15,31

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 16,44 kN po korelaci 19,16

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{15,31}{13,2} * 100 = \mathbf{115,98 \%}$$

$$CBR = \frac{19,16}{20,0} * 100 = \mathbf{95,80 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(87,38 - 76,95)}{76,95} * 100 = \mathbf{13,55 \%}$$

$$W_{\text{střed}} = \frac{(157,47 - 138,21)}{138,21} * 100 = \mathbf{13,93 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(151,95 - 133,46)}{133,46} * 100 = \mathbf{13,85 \%}$$

3.5.2.17 Vzorek XV – vlhkost 15 %

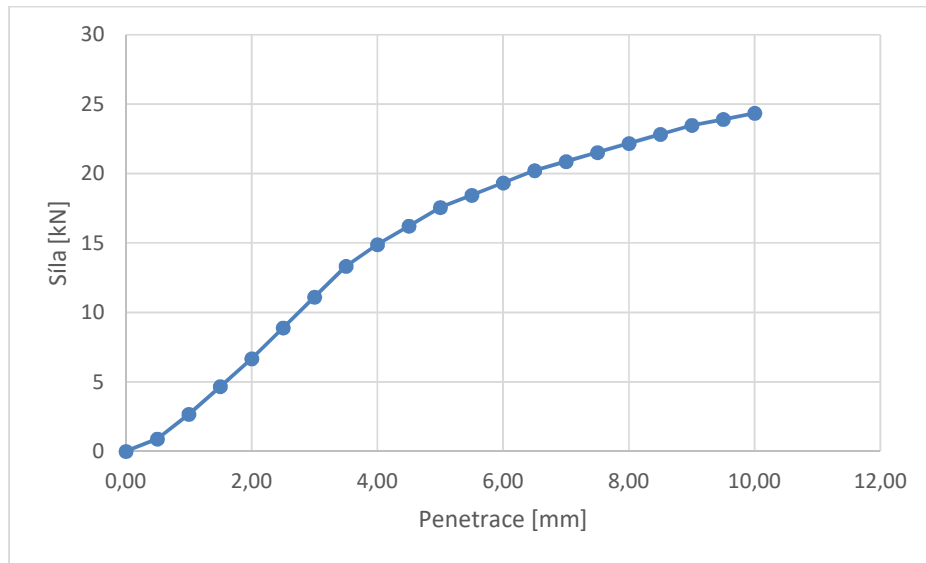
Patnáctý vzorek jsem připravil ze 5 kg základní zeminy vlhčené na 15 % a 5% příměsí vápna. Doba mezi hydratováním vzorku a zkouškou CBR byla zhruba 90 minut. Hodnoty zanesl do následující tabulky (Tab. 34), grafické zobrazení viz Graf 19.

Tab. 34 Výstup zkoušky CBR XVII. - vlhkost 14,84 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,89
1,00	2,67
1,50	4,67
2,00	6,67
2,50	8,89
3,00	11,11
3,50	13,33
4,00	14,89
4,50	16,22
5,00	17,56
5,50	18,44
6,00	19,33
6,50	20,22
7,00	20,87
7,50	21,52
8,00	22,17
8,50	22,83
9,00	23,48
9,50	23,91
10,00	24,35

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 19 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 8,89 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 17,56 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{8,89}{13,2} * 100 = \mathbf{67,34 \%}$$

$$CBR = \frac{17,56}{20,0} * 100 = \mathbf{87,80 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy pro určení vlhkostí.

$$W = \frac{(165,81 - 1,38)}{144,38} * 100 = \mathbf{14,84 \%}$$

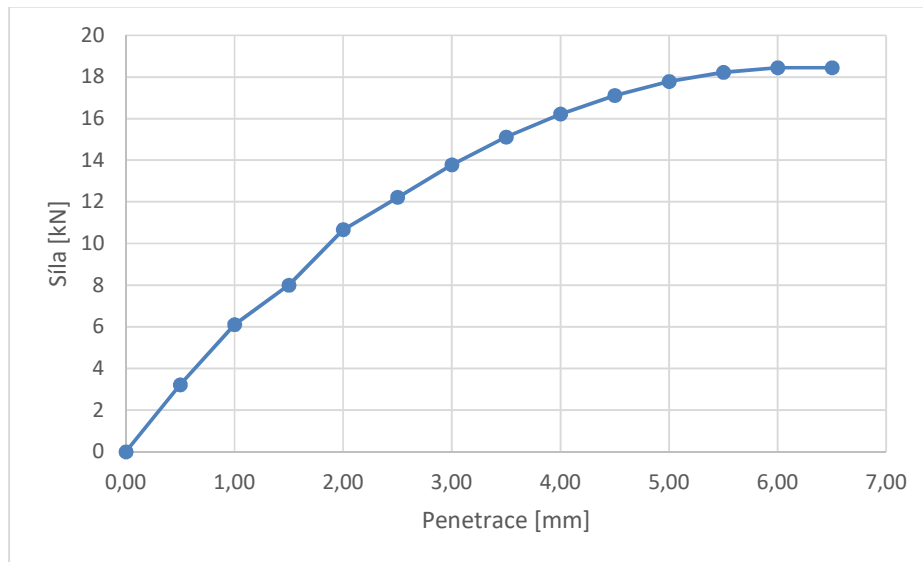
3.5.2.18 Vzorek XV – po 24 hodinách

Tab. 35 Výstup zkoušky CBR XVIII. - vlhkost 13,35 %

Zatlačení [mm]	Síla [kN]
0,00	0
0,50	0,67
1,00	3,11
1,50	8
2,00	10,67
2,50	12,22
3,00	13,78
3,50	15,11
4,00	16,22
4,50	17,11
5,00	17,78
5,50	18,22
6,00	18,44
6,50	18,44

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Graf 20 CBR - závislost penetrace na síle - Zkouška XVIII



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 2,5mm je 12,22 kN

Síla odpovídající penetraci trnu do hloubky 5mm je 17,78 kN

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100 \quad [\%]$$

$$CBR = \frac{12,22}{13,2} * 100 = \mathbf{92,57 \%}$$

$$CBR = \frac{17,78}{20,0} * 100 = \mathbf{88,90 \%}$$

Po provedení zkoušky jsem odebral vzorky zeminy ze středu, horní a dolní části vzorku pro určení vlhkostí.

$$W_{\text{horní}} = \frac{(199,22 - 176,07)}{176,07} * 100 = \mathbf{13,14 \%}$$

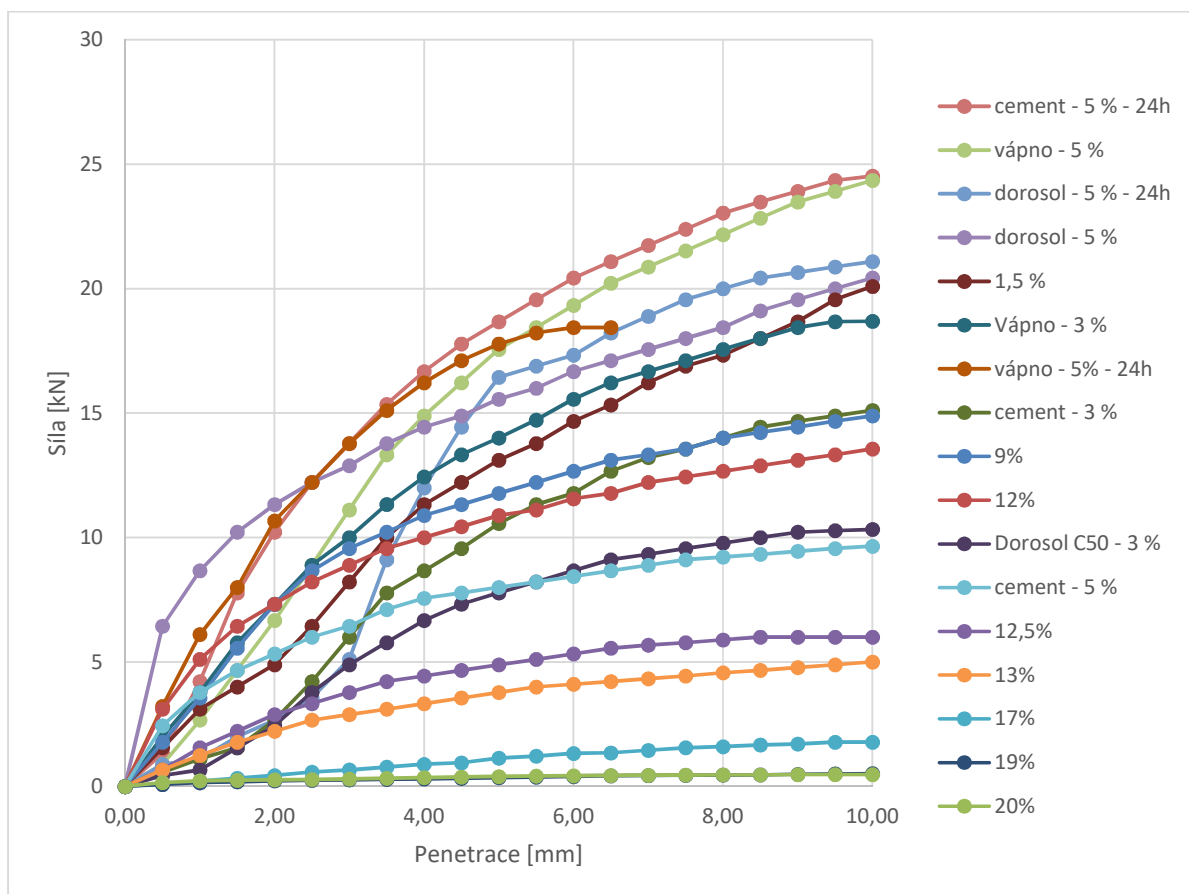
$$W_{\text{střed}} = \frac{(121,7 - 107,2)}{107,2} * 100 = \mathbf{13,52 \%}$$

$$W_{\text{dolní}} = \frac{(139,58 - 123,09)}{123,09} * 100 = \mathbf{13,39 \%}$$

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo provedení a porovnání zkoušek kalifornského poměru únosnosti na základní zemině odebrané na dálnici D5 v oblasti Rokycanska. Zkoušky jsem provedl při 20, 19, 17, 13, 12,5, 12, 9 a 1,5 procentní vlhkosti vzorku a také na zlepšených vzorcích nejpoužívanějšími materiály ke zlepšování nevyhovujících zemin a to cementem, dorosolem C50 a vápnem při použití 3 a 5 % obsahu. V Graf 21 Porovnání naměřených poměrů síly/penterace jednotlivých zkoušek CBR jsem porovnal průběhy hodnot síly k penetraci jednotlivých zkušebních vzorků. A do Tab. 35 zanesl výsledky měření $CBR_{2,5}$ a $CBR_{5,0}$.

Graf 21 Porovnání naměřených poměrů síly/penterace jednotlivých zkoušek CBR



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Tab. 36 Porovnání naměřených poměrů síly/penetrace jednotlivých zkoušek CBR

Zkoušky	CBR _{2,5}	CBR _{5,0}
Cement – 5 % - 24h	102,42	97,1
Vápno – 5 %	67,34	87,80
Dorosol 5 % - 24 h	115,98	95,8
Dorosol 5 %	92,57	77,80
1,5 %	48,78	65,55
Vápno – 3 %	67,34	70
Vápno -5 % - 24 hod	92,57	77,80
Cement – 3 %	51,28	45,55
9 %	65,68	58,9
12 %	62,27	54,45
Dorosol – 3 %	42,5	42,7
Cement – 5 %	45,47	40
12,5	25,22	22,45
13	20,22	18,9
17	4,39	5,7
19	1,89	1,8
20	2,12	2

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

Z výše uvedeného grafu lze vyčíst že pro získání co nejlepších hodnot CBR je vhodné pro zlepšení tohoto konkrétního vzorku použít 5 % cementu. Ostatní pojiva také prokázala dostatečné zlepšení parametrů a byla by vhodná k užití pro zlepšení.

Většina výsledků CBR ve vztahu k vlhkosti vyšla jak jsme mohli pro jílovitou zeminu předpokládat, a to že se stoupající vlhkostí klesá hodnota CBR. Bohužel jsem žádnou spolehlivou závislost nevypozoroval. I když je laboratorní měření CBR časově náročnější věřím, že je stále výhodnější než měření in situ kde mohou být hodnoty ovlivněny meteorologickými a geologickými podmínkami a tím dát zkreslený výsledek.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 6133 - Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací 2010
- [2] ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity 2018
- [3] ČSN CEN ISO/TS 17892-2 (721007). Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin
- [4] ČSN EN 13286-47 (736185). *Směsi a směsi stmelené hydraulickými pojiv: Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Praha: Praha: ÚNMZ, 2012.
- [5] ČSN EN ISO 14688 - 2: Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 2: Zásady pro zařídování. 2018.
- [6] HAUSER, Jaroslav. *ÚPRAVA MÁLO VHODNÝCH A NEVHODNÝCH ZEMIN VÁPNEM V TĚLESE ZEMNÍCH KONSTRUKCÍ* [online]. In: . BRNO: VŠB [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/32.pdf>
- [7] KAUN, Miroslav a František LEHOVEC. *Pozemní komunikace 20*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2105-X.
- [8] Katte, V.Y., Mfoyet, S.M., Manefouet, B. et al. Geotech Geol Eng (2019) 37: 217. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0604-x>
- [9] MOHYLA, M, Ing. Kalifornský poměr únosnosti [online] – Předmět: Silniční a geotechnická laboratoř, podklady pro cvičení, Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Dostupné z: <http://geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/kalifornsky-pomer-unosnosti.pdf>
- [10] STAVITEL, Perspektivní stavební materiály Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/573752006>
- [11] TP 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy odbor pozemních komunikací, 2004
- [12] TP 94. *Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy odbor pozemních komunikací, 2013.
- [13] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Vyd. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1437-1.
- [14] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.

- [15] ZAJÍČEK, Jan. Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6