

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Ondřej PAVELKA

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zemin
pomocí hydraulických pojiv**

Ondřej Pavelka

Bakalářská práce

2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej PAVELKA**
Osobní číslo: **D07410**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Dopravní cesta**
Název tématu: **Zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zemin pomocí hydraulických pojiv**
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. Popište a zhodnoťte metody, které se používají pro zlepšování zemin.
2. Prakticky proveďte laboratorní zkoušky, které jsou spojeny se zlepšením mechanicko-fyzikálních vlastností zemin.
3. Na daném vzorku zeminy proveďte laboratorní zkoušky před a po zlepšení.
4. Výsledky experimentu vyhodnoťte, porovnejte a proveďte diskusi nad výsledky.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Šimek, J., Holoušová, T. Mechanika zemin a zakládání staveb Skriptum ČVUT v Praze, 1996.

Vacck, J. Geotechnika I, UPa DFJP, Pardubice 2000.

Vacek, J. Geotechnika II, UPa DFJP, Pardubice 2000.

Vaniček, I. Mechanika zemin, Skripta FSV ČVUT, 2000.

Hulla, J., Turček, P. Zakladanie stavieb Vyd. Jaga group, v.o.s. ISBN 80-88905-05-2, 1998.

Vaniček, I., Kudrnáčová, I. Mechanika zemin - cvičení, skriptum ČVUT.

Myslivec, A. a kol. Mechanika zemin, SNTL/ALFA, 1970.

TP 94 Zlepšení zemin.

TP 95 Vrstevnaté násypy pozemních komunikací.

ČSN 73 6133 Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce:

30. listopadu 2009

Termín odevzdání bakalářské práce:

31. května 2010



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

vedoucí katedry

dne

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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 31. 5. 2010

Ondřej Pavelka

ANOTACE

Práce je věnována tématu, zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zemin pomocí hydraulických pojiv. V první části práce je pojednáno o vnitřním chování zeminy, používaných materiálech a technologii zlepšování zemin hydraulickými pojivy. Ve druhé části jsem se zaměřil na praktické postupy zatřídění, vyhodnocení dané zeminy a zlepšení vybraným hydraulickým pojivem. Na závěr jsou uvedeny a porovnány výsledky před zlepšením zeminy a po přidání vybraného hydraulického pojiva.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zemina, vlhkost, triaxiální přístroj, zrnitost zeminy, hustoměr, zhutnitelnost, hydraulická pojiva.

TITLE

Improving the mechanical and physical properties of soil using hydraulic binders.

ANNOTATION

Work is dedicated to improving on the mechanical and physical properties of soil using hydraulic binders. The first part is dealing with the internal behaviour of soil materials and technology used in improving soil hydraulic binders. The second section focused on the practical modalities of the evaluation and classification of soil and improve the hydraulic binder is selected. Finally the results were compared before and improving the soil and the addition of hydraulic binder selected.

KEYWORDS

Soil, moisture, triaxial apparatus, soil granularity, hydrometer, compactibility, hydraulic binders.

OBSAH

1. ÚVOD.....	8
ČÁST 1. - ZÁKLADNÍ INFORMACE.....	9
2. VZNIK A VNITŘNÍ CHOVÁNÍ ZEMINY.....	10
3. TECHNOLOGIE ÚPRAVY MÁLO VHODNÝCH A NEVHODNÝCH ZEMIN.....	13
3.1. MECHANICKY ZLEPŠENÁ ZEMINA.....	15
3.2. ZEMINA ZLEPŠENÁ S PŘÍMĚSÍ HYDRAULICKÉHO POJIVA.....	16
3.2.1. VÁPNO.....	18
3.2.2. CEMENT.....	20
3.2.3. DOROPORT TB 25.....	22
3.2.4. DOROSOL C XX.....	23
3.2.5. POPÍLEK.....	24
3.3. GEOSYNTETIKA.....	25
4. NÁVRH ÚPRAVY ZEMIN.....	27
ČÁST 2. - LABORATORNÍ ČÁST.....	29
5. KLASIFIKACE ZEMIN.....	30
5.1. STANOVENÍ PŘIROZENÉ VLHKOSTI ZEMIN.....	30
5.2. STANOVENÍ ZDÁNLIVÉ HUSTOTY PEVNÝCH ČÁSTIC POMOCÍ PYKNOMETRU.....	31
5.3. KONZISTENČNÍ MEZE.....	33
5.4. STANOVENÍ ZRNITOSTI.....	38
5.5. POPIS, POJMENOVÁNÍ A ZATŘÍDĚNÍ ZEMINY.....	44
5.6. STANOVENÍ ZHUTNITELNOSTI ZEMIN.....	47
5.7. URČENÍ PEVNOSTI V PROSTÉM TLAKU.....	50
6. ZLEPŠENÍ ZEMINY VYBRANÝM POJIVEM.....	55
6.1. ZKOUŠKY VZORKŮ V TRIAXIÁLNÍ PŘÍSTROI.....	55
7. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	75
8. ZÁVĚR.....	77
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	78
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	80
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	81

1. Úvod

Zlepšování zemin pomocí hydraulických pojiv, má přibližně patnáctiletou historii a první realizace byly provedeny v Německu. Zlepšením vlastností zemin měníme základovou půdu, zvyšujeme smykovou pevnost a pevnost v prostém tlaku, zlepšujeme zpracovatelnost, odolnost vůči klimatickým vlivům a na druhu použitého hydraulického pojiva i další mechanicko-fyzikální vlastnosti původní zeminy. Stabilizace hydraulickými pojivy značně snižuje náklady na stavbu a zároveň redukuje celkovou tloušťku vrstev spodních konstrukcí o 15 a v některých případech až o 20 % v závislosti na typu stavby a druhu podloží. Druh podloží hraje důležitou roli při volbě hydraulického pojiva, proto je nutné nejdříve zeminu správně zatřídit a pojmenovat. Z výše uvedeného vyplývá, že druh a obsah pojiva volíme v závislosti na původní zemině a například při stavbě pozemní komunikace se může obsah a druh pojiva v průběhu trasy měnit.

Tato bakalářská práce se zabývá metodami, které se používají pro zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zeminy pomocí hydraulických pojiv.

V práci si uvedeme metody, které lze za určitých podmínek využít. Budou provedeny laboratorní zkoušky na vzorku zeminy získané z hloubky cca 80 cm. Vzorek bude podroben zatřídění a budou na něm provedeny příslušné zkoušky před a po zlepšení zeminy určitým hydraulickým pojivem.

ČÁST 1. – ZÁKLADNÍ INFORMACE

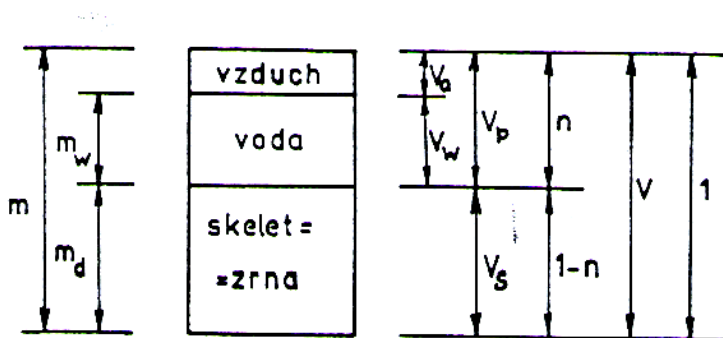
2. Vznik a vnitřní chování zeminy

Zemina se odlišuje od ostatních látek tím, že je složena ze tří fází: fáze pevné, fáze kapalná a fáze plynná. Tyto tři fáze se vzájemně ovlivňují a mají výsledný vliv na mechanicko-fyzikální vlastnosti zeminy.

Pevná fáze vytváří širokou škálu částic různých velikostí, tvaru zrn a různého složení. Velikost pevných částic dosahuje různých velikostí od nejmenších zrn pozorovatelných elektronovým mikroskopem, až po zrna velikosti balvanů. Tvar zrn může být oválný, kulový, ostrohranný v závislosti na druhu zvětrávání a transportu původní horniny. Zeminy mohou obsahovat libovolný element zemské kůry a to organického, nebo neorganického původu. Nejčastěji se vyskytujícími prvky jsou: křemík, hliník, kyslík a vodík. Atomy těchto prvků spolu s dalšími prvky tvoří různé druhy krystalických mřížek, které představují pevnou fázi zeminy.

Kapalná fáze je v zemině zastoupena vodou, která se může vyskytovat v různých formách skupenství jako: kapalina, vodní pára nebo led.

Plynnou fázi tvoří nejčastěji vzduch, v některých organických zeminách vyplňuje póry různý druh plynu.



- | | |
|------------------------------------|--|
| V - celkový objem | m - celková hmotnost |
| V_p - objem pórů | m_w - hmotnost vody |
| V_s - objem skeletu - pevné fáze | m_d - hmotnost vysušeného vzorku
/ vzorek se suší při teplotě
105° - 110°C / |

Obrázek 2-1: Trojfázové složení zeminy [1]

Vzájemný poměr a vztah výše uvedených fází má zásadní vliv na chování zeminy. Zeminy se skládají z jednotlivých zrn různých velikostí, které se vzájemně ovlivňují přímo nebo prostřednictvím kapalné a plynné fáze.

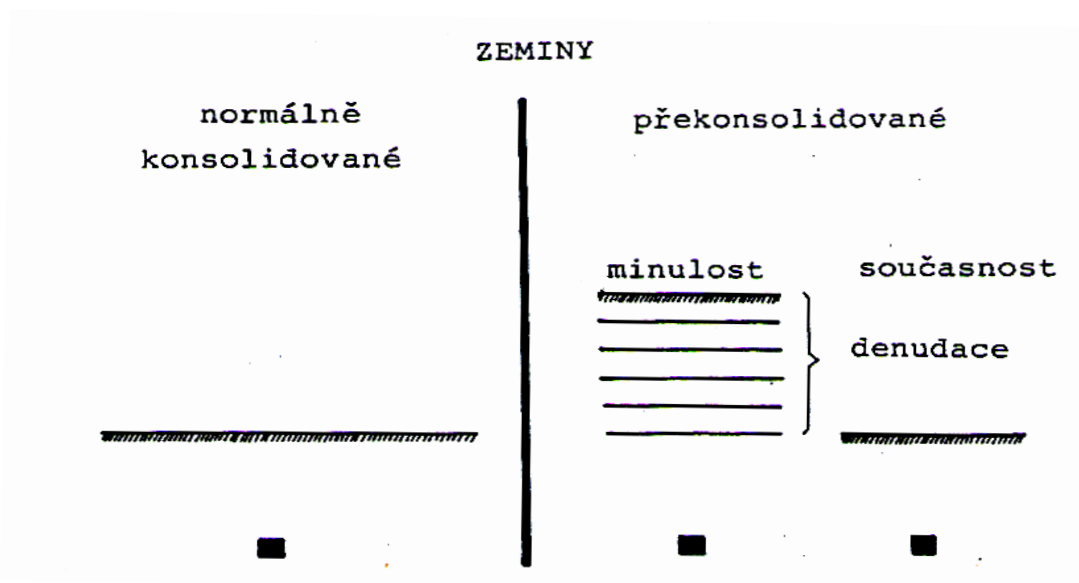
Z hlediska vzniku rozdělujeme zeminy na dvě základní skupiny: zeminy reziduální a zeminy sedimentární.

Reziduální zeminy: vznikají zvětráváním vrchní vrstvy zemského pláště a zůstávají na stejném místě vzniku. Jejich tloušťka je velmi značná, zvláště v tropickém pásu, kdy mocnost vrstev dosahuje i několika desítek metrů.

Sedimentární zeminy: vznikají taktéž působením klimatických vlivů, ale od zemin reziduálních se liší tím, že tyto zeminy byly transportovány na nové místo, většinou do nižších poloh kde probíhalo jejich usazování. Mocnost sedimentárních vrstev může dosáhnout několika stovek metrů. Podle způsobu přenosu rozeznáváme sedimenty: naplavené (říční), svahové (gravitační), váté, ledovcové a mořské usazeniny (sedimenty).

Zvětrávání je proces fyzikálních, chemických a biochemických přírodních pochodů, které mění stav, složení a vlastnosti původních hornin, jehož výsledkem je nové složení větší stability.

Dalším velmi důležitým činitelem mechanicko-fyzikálních vlastností zemin je historie zatížení. Rozdělujeme zeminy na normálně konsolidované a zeminy překonsolidované.



Obrázek 2-2: Historie zatížení zeminy [2]

Zeminy normálně konsolidované jsou takové zeminy, u kterých nebylo zatížení v historii odlišné od zatížení v současnosti. Na rozdíl zeminy překonsolidované jsou zeminy, u nichž bylo zatížení v historii větší než v době současné, to znamená, že proběhla tzv. denudace vrstvy.

Všechny druhy zemin lze nějakým způsobem upravovat. Upravují se zeminy, jejichž úprava je ekonomicky výhodná vzhledem k jiným možným opatřením. Výběr způsobu úpravy zemin závisí na mechanicko-fyzikálních vlastnostech dané zeminy a na jejích chemickém složení. Účelem úpravy zemin je dosažení určitých daných parametrů, které jsou předepsané projektovou dokumentací.

3. Technologie úpravy málo vhodných a nevhodných zemín

Z hlediska vhodnosti pro podloží, se zeminy zařazují do deseti skupin, kde zemina nejvhodnější pro podloží je skupina I. a nejméně vhodná, která se používá pouze k přechodným účelům, je zemina skupiny X.. Tyto uvedené skupiny slouží k předběžnému posouzení vhodnosti zeminy pro podloží, ke stanovení potřebných opatření, eventuálně k návrhu zlepšení zeminy. Rozdělení zemín používaných pro podloží do skupin dle ČSN 72 1002 uvádí tabulka 3-1.

Název zeminy	Symbol	Pro podloží (skupina zemín)									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
šterkovitá hlína	F1 MG					X	X	X			
šterkovitý jíł	F2 CG					X	X	X			
píščitá hlína I	F3 MS ₁			X	X	X					
píščitá hlína II	F3 MS ₂							X	X	X	
píščitý jíł I	F4 CS ₁				X	X					
píščitý jíł II	F4 CS ₂							X	X	X	
hlína s nízkou plasticitou	F5 ML							X	X	X	
hlína se střední plasticitou	F5 MI							X	X	X	
jíł s nízkou plasticitou	F6 CL								X	X	X
jíł se střední plasticitou	F6 CI								X	X	X
hlína s vysokou plasticitou	F7 MH							X	X	X	
hlína s velmi vys. plasticitou	F7 MV								X	X	X
hlína s extra vys. plasticitou	F7 ME									X	X
jíł s vysokou plasticitou	F8 CH								X	X	X
jíł s velmi vys. plasticitou	F8 CV								X	X	X
jíł s extra vys. plasticitou	F8 CE									X	X
písek dobře zrněný	S1 SW	X	X								
písek špatně zrněný	S2 SP		X	X							
písek s přím. jem. zeminy	S3 S-F			X	X	X					
písek hlinitý	S4 SM			X	X	X					
písek jíłovitý	S5 SC			X	X	X					
šterk dobře zrněný	G1 GW	X	X								
šterk špatně zrněný	G2 GP	X	X	X							
šterk s přím. jem. zeminy	G3 G-F	X	X	X							
šterk hlinitý	G4 GM	X	X	X							
šterk jíłovitý	G5 GC		X	X	X						

Tabulka 3-1: Zatřídění zeminy dle vhodnosti pro podloží [3]

I. skupina

Zeminy mají plynulou křivku zrnitosti, stabilní jílovou a prachovou složku a jsou i za nepříznivých podmínek stabilní. Velmi dobře a s vynaložením malého množství energie se zhutňují na vysoké objemové hmotnosti, které jsou stálé. Jsou nejen velmi dobrým podložím, ale i vhodným materiálem pro stabilizace, zejména cementové.

II. skupina

Zeminy mají obdobné vlastnosti jako u skupiny I., postrádají však jílovou a prachovou složku, nebo jsou méně stabilní. Zeminy bez jílové a prachové složky jsou nenamrzavé. Tyto zeminy jsou obtížněji zhutnitelné, ale přesto velmi dobrým podložím, stálým při odvodnění i za nejnepříznivějších povětrnostních změn. Jsou velmi dobře propustné.

III. skupina

Řadíme, jsem jemnozrnné písčité a šterkovité zeminy, jejichž jílová a prachová složka je méně stabilní vůči povětrnostním vlivům. Tato složka (zvláště prachová) má větší číslo plasticity a při jejím větším množství (u hlinitého šterku) je třeba uvažovat o zařazení do číselně vyšší skupiny. Tyto zeminy jsou vhodné pro stabilizace cementem. Zeminy písčité a šterkovité bez jílové a prachové složky, které nemají kostru hrubších zrn, se velmi nesnadno zhutňují. Zhutnění je prováděno s vynaložením značného množství energie.

IV. skupina

Zeminy mají jílovou a prachovou složku s ještě dobrými tmelícími vlastnostmi. Únosnost kostry šterkových zrn je podstatně snížena jílovou a prachovou složkou málo odolnou proti povětrnostním vlivům. Tyto zeminy tvoří přechodnou skupinu mezi dobrými a průměrně vyhovujícími zeminami pro podloží.

V. skupina

Zeminy této skupiny lze dobře zhutňovat na maximální objemovou hmotnost. Vyšší únosnosti brání celkem jemnozrnný charakter. Jsou zpravidla mírně namrzavé. Při vyšším obsahu jemných částic a při vysoké hladině podzemní vody je třeba zajistit vhodná opatření proti mrazu. Zeminy jsou ještě vyhovující pro podloží. Vhodně se dají stabilizovat cementem, případně vápnem a pomalu tuhnoucími pojivy.

VI. skupina

Zeminy patří mezi namrzavé, a proto je zpravidla třeba provést vhodná opatření proti mrazu. Lze je dobře zhutňovat, avšak vždy v úzkém intervalu, který je blízký optimální vlhkosti.

Tvoří přechod mezi vhodným a málo vhodným podložím. Případná zlepšení lze dosáhnout malou příměsí hydraulických nebo pomalu tuhnuoucích pojiv.

VII. skupina

Zeminy jsou méně stabilní a při napojení vodou klesá jejich pevnost až o 40 %. Jsou namrzavé až nebezpečně namrzavé a poskytují málo vhodná podloží. Zvýšení odolnosti podloží proti vodě je možno dosáhnout příměsí vápna. Při měkké konzistenci se tyto zeminy zařazují do číselně vyšší skupiny.

VIII. skupina

Převážná část se skládá z prachové složky jemných částic. Zeminy jsou namrzavé až nebezpečně namrzavé, při napojení vodou nestabilní a velmi rozbídné. Poskytují málo vhodné až nevhodné podloží. Do této skupiny je možno zařadit i některé jíly s pevnou a tvrdou konzistencí. Je nutno bezpodmínečně zamezit přístupu vody k podloží. U hlín je možné dosáhnout zlepšení podloží příměsí vápna.

IX. skupina

Vlastnosti těchto zemin jsou ovlivněny druhem jílové složky jemných částic. Zlepšení je možné jen v některých případech. Při velmi malé únosnosti je vhodné tyto zeminy z podloží odstranit.

X. skupina

Zeminy se nedají zlepšit a výjimečně jsou použity pouze pro podloží vozovek přechodného charakteru. Tyto zeminy se obvykle odstraňují.

Zlepšování málo vhodných a nevhodných zemin provádíme: zeminou zlepšenou mechanicky, použitím geosyntetik a pomocí příměsí hydraulického nebo jiného pojiva. Důvodem zlepšování zemin, je využití veškerého stávajícího vytěženého materiálu, snížení ekonomické a v některých případech i ekologické stránky stavby. Zlepšení vlastností zeminy se především doporučuje pro zeminy, které jsou zařazeny do V. – IX. skupiny vhodnosti pro podloží dopravních staveb.

3.1. Mechanicky zlepšená zemina

Mechanické zlepšení je takové zlepšení zeminy, které získáme mísením s jinou granulometricky odlišnou zeminou. Účelem je dosažení optimální únosnosti, vlhkosti, zhutnitelnosti a celkově lepších mechanicko-fyzikálních vlastností. Mechanicky zlepšená

zemina představuje jedno z vhodných řešení, kterým můžeme efektivně odstranit problémy vzniklé díky málo únosnému podloží. Nejčastějším případem je přidání hrubozrnné zeminy k zemině jemnozrnné, není ovšem vyloučené zlepšování zeminy sypké a to přidáním jemnozrnné frakce. Nejznámějším postupem je předpis podle Hegenboga, který doporučuje optimální složení směsi: 35 – 50 % zrna o průměru 2 až 20 mm, 50 – 65 % zrn o průměru menší než 2 mm, o minimální plasticitě W_p v rozmezí 4 až 9 % a meze tekutosti W_L 14 až 25 %. Mechanicko-fyzikální vlastnosti se odvíjí od množství, vyjádřené obvykle v procentech hmotnosti, jemnozrnné a hrubozrnné frakce. Pokud bude v zemině obsaženo větší množství hrubozrnných částic, pak se zemina blíží zemině sypké. Naopak pokud bude množství jemnozrnné zeminy větší, potom mluvíme o zemině podobné soudržným zeminám.

3.2. Zemina zlepšená s příměsí hydraulického pojiva

Vrstvy ze směsí stmelěných přidáním hydraulického pojiva se provádějí dvěma základními technologiemi:

- směs se mísí v míchacím centru, až poté se převeze nákladními vozy na stavbu a rozprostře vhodnou mechanizací. Tento způsob se obvykle používá v případě, že se směs vyrábí z dovážené zeminy
- směs se mísí na místě předpokládané stavby zemní frézou a následně zpracuje. Tento způsob je vhodný, když převážná část materiálu pro výrobu směsi pro zhotovení konstrukční vrstvy leží přímo v uvažované trase, nebo je-li vhodnější jej přímo do trasy navést

Podmínky provádění stabilizace, jsou závislé na klimatických podmínkách. Optimální podmínky pro pokládku jsou při teplotě ovzduší v rozmezí +5 °C až +25 °C. Pokud by teplota vzduchu při pokládce klesla pod +5 °C a při ošetřování pod 0 °C nebo překročila +30 °C, je třeba provést zvláštní opatření. Dále je zakázáno provádět stabilizaci za silného nebo dlouhotrvajícího deště. Směs musí být vyrobena a dodána tak, aby její vlhkost při pokládce a hutnění splňovala požadavky ČSN EN 14227-1, ČSN EN 14227-2, ČSN EN 14227-3, ČSN EN 14227-5, ČSN EN 14227-10, ČSN EN 14227-12, ČSN EN 14227-13 nebo ČSN EN 14227-14.

Při manipulaci se směsí z míchacího centra nebo na místě zemní frézou, nesmí být stabilizovaná směs znečištěna a zároveň nesmí dojít k takové změně vlhkosti, při které by směs nešlo zhutnit na požadovanou míru zhutnění. Doprava, zpracování a hutnění

stabilizované směsi musí být ukončeno do uplynutí doby zpracovatelnosti, aby nebylo narušeno tuhnutí směsi dle ČSN EN 13286-45.

Minimální tloušťka pokládané vrstvy stabilizace je z technologického hlediska 100 mm. Naopak maximální není nijak omezena, z toho vyplývá, že hutnění musí být dosaženo v celé tloušťce stabilizované vrstvy.

Pláň zemního tělesa musí vyhovovat minimální únosnosti zemní pláně, která není dle ČSN 72 1006 menší než 30 MPa. Povrh je měřen 4 m dlouhou latí a odchylka nesmí přesáhnout nerovnosti větší jak 30 mm.

K rozprostírání směsi z míchacího centra se používá stavební mechanizace (grejdry a finišery). Technologicky se může směs rozprostírat v jedné nebo ve více vrstvách. Pokud je práce malého rozsahu a ve stísněných prostorech využívá se menší vhodná mechanizace nebo lze směs pokládat ručně. Rozprostírání směsi je nutno zahájit neprodleně po jejím dovezení nebo promísení zemní frézou. V případě, že se směs pokládá ve dvou, či více vrstev musí být pokládka ukončena do 3 hodin po položení vrstvy první, z důvodů spojení všech vrstev. Při mísení zemní frézou nebo rozprostírání se musí sledovat výskyt případných poruch a segregovaných míst a ještě před začátkem hutnění je opravit. Zvláště se musí sledovat homogenita rozprostření pojiva při zpracování zemní frézou. Při mísení směsi na místě zemní frézou, je možné postupovat v několika etapách. V první etapě se fréza použije za účelem rozpojení materiálu a jeho srovnání, v následných etapách se fréza použije za účelem případného doplnění kameniva, dávkování pojiva, konečného urovnání a hutnění.

Po rozprostření upravené zeminy a urovnání povrchu, je nutné začít se zhutňováním a to v nejkratší možné době. Pokud se pokládá více vrstev, hutníme každou vrstvu samostatně. Pro provádění se užívají vibrační tandemové válce s oběma hladkými běhouny a pneumatikovými válci. Ve stísněných poměrech, při práci malého rozsahu, v blízkosti poklopů, hydrantů, hrnků a obrubníku se k hutnění používá drobná mechanizace (vibrační desky a pěchy).

Vrstva ze směsi stmelené hydraulickými pojivy musí být minimálně 7 dní udržována vlhká a nesmí být zbytečně pojížděna. Po této technologické přestávce mohou být kladeny následující vrstvy vozovky. Stabilizovaná vrstva hydraulickými pojivy, by neměla být ponechána přes zimu a musí se přikrýt vrstvou další. Pokud je situace přes zimu nevyhnutelná, vrstva se po určité době zhodnotí a provedou se její případné opravy.

Při stabilizaci se přímo na místě nebo v míchacím centru zlepšují mechanicko-fyzikální vlastnosti zemin přimísením vhodných látek. Podrobnější popis těchto látek si dále uvedeme.

3.2.1. Vápno

Mechanismus zlepšení zemin vápnem můžeme rozdělit na dva sledované efekty: krátkodobý a dlouhodobý. Při provádění úpravy zemin vápnem (LIM – lime improved mixtures) lze hovořit o sledování krátkodobého efektu, na rozdíl od toho jsou dlouhodobé efekty sledovány pro náročnější aplikace, nazývané u nás vápennou stabilizací (LSM – lime stabilized mixtures). Protože jsou tyto dva názvy často zaměňovány, uvedeme si jejich popis:

- LIM – zeminy zlepšené přidáním vápna nebo vápenného mléka do zemin za účelem zlepšení jejich zpracovatelnosti, či zvýšení přetvárných vlastností v násypu
- LSM – zeminy stabilizované, převážně používané jako stmelené vrstvy liniových dopravních staveb

Krátkodobé efekty

Krátkodobé efekty můžeme zařadit do dvou skupin:

1. Krátkodobé efekty, které snižují obsah vody ve směsi:

- hydratace vápna
- vypařování vody
- přidání suchého materiálu
- mísení směsi vápna se zeminou

Tyto výše uvedené efekty mohou, v závislosti na klimatických podmínkách, vyvolat snížení vlhkosti běžně o 1 – 2 % maximálně až o 5 % na 1 % příměsi vápna.

2. Krátkodobé efekty působící změny geotechnických vlastností zeminy

Při použití 1% příměsi vápna dochází k:

- snížení indexu plasticity I_p o 1,5 – 2,5 %
- zvýšení optimální vlhkosti w_{opt} při Proctorově zkoušce o cca 1 %
- snížení maximální objemové hmotnosti o 21 – 33 kg/m³

- zvýšení CBR_{opt} o 4,1 – 6,2 % CBR
- zvýšení CBR_{sat} o 4,7 – 6,3 % CBR
- zvýšení meze plasticity w_p
- zlepšení hodnot Proctorovy křivky - zpolštění
- snížení namrzavosti směsi

Dlouhodobé efekty

Zemina reaguje spolu s přidaným vápnem pomalu, vytváří ve směsi nový druh minerálů a váže interní částice. Tyto změny vedou ke zlepšení těchto mechanicko-fyzikálních vlastností:

- zvýšení pevnosti v prostém tlaku
- zvýšení indexu CBR
- stabilita směsi po saturaci
- zvýšení odolnosti proti mrazu



Obrázek 3-1: Mísení zeminy s hydraulickým pojivem [4]

Pro použití vápna přidáním a stabilizací zemin je podstatné, již v rámci geotechnického průzkumu, provádět průkazní laboratorní zkoušky, které určí množství přidávání vápna potřebného k dosažení hodnoty $CBR > 10$ %. Pokud se laboratorní zkoušky neprovedou

v potřebném rozsahu a kvalitě, může mít úprava zemin nedostatečný a v krajním případě až naprosto opačný efekt, než jaký byl od úpravy požadován a očekáván.

Zkoušky je potřeba realizovat s takovým vápnem, které se pro stavbu uvažuje. Používané vápno by nemělo být starší než dva týdny, důležité je i používání stejně starého vápna na staveništi. Laboratoř by měla být zařízena podobným míchacím zařízením, které alespoň přibližně kopíruje pohyb frézy po staveništi. Při ručním míchání dochází k nekvalitnímu promíchávání směsi a výsledky zkoušek jsou pak víceméně nepoužitelné.

Při zpracování stabilizované vrstvy v laboratoři a na staveništi, je důležitým faktorem vlhkost směsi. Pro dosažení optimální zhutnitelnosti, je v některých případech nutné směs dovlhčovat. Po provedení promísení vrstvy zeminy s vápnem, je rozhodujícím kritériem deformační modul přetvárnosti $E_{def,2}$. Měření se provádí zpravidla 24 hodin po aplikaci vápna. V následujícím časovém období je nárůst modulu přetvárnosti, v důsledku dozrávání, vyšší o 20 až 30 %. Celková doba zrání vápenné stabilizace je asi 30 dní po položení vrstvy.

Přestože se všechna výše popisovaná opatření před vlastní úpravou mohou zdát složitá a zdlouhavá, vyplatí se tyto zkoušky provádět v potřebném rozsahu a určitém nutném časovém období. Překážky, které mohou nastat nesprávnými laboratorními zkouškami, mohou celou stavbu značně časově zdržet a finančně prodražit. Pro stabilizaci vrstev se používá vápno, které vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 459-1.

3.2.2.Cement

Základním principem stabilizace zemin cementem je zpevnění strukturních vazeb, které vzniknou mezi cementem a zeminou. Rozeznáváme dva základní druhy stabilizace cementem: cementovou zeminu a zemní beton. Cementová zemina je charakterizována jako zemina zpevněná cementem, tudíž se zlepšují mechanicko-fyzikální vlastnosti zeminy, oproti tomu zemní beton má povahu betonové desky. Obsah cementu se volí v závislosti na druhu zeminy a pohybuje se v hodnotách od 3 % do 15 % suché hmotnosti zeminy.

Pro cementovou stabilizaci platí stejné pravidlo, jako pro stabilizaci vápnem. Je potřeba dostatečné zatřídění zeminy a provedení potřebných laboratorních zkoušek. Staří používaného cementu by nemělo být delší než 125 dní, po této době dochází k výraznému poklesu pevnosti cementu.

Zlepšování zemin cementem je používanější metodou, oproti metodě vápenné, protože je levnějším a snadno dostupným materiálem. Nárůst modulu přetvárnosti $E_{\text{def},2}$ je velmi rychlý v časných stádiích zrání, poté hodnota modulu růstu klesá.

Stabilizace zemin cementovým pojivem se nejčastěji používá pro stabilizaci spodních vrstev nebo pro podloží dopravních staveb.

Pro stabilizaci jsou vhodné cementy portlandské třídy 22,5 a 32,5, portlandské cementy vysokopecní třídy 32,5 a cementy struskové. Vysokopecní a struskové cementy jsou vhodné pro stabilizaci zemin obsahujících málo hlinitých částic a pro zeminy s plasticitou menší než $I_p = 6$.



Obrázek 3-2: Mechanizace pro úpravu stabilizovaných vrstev [5]

Orientační hodnoty změn vlastností zeminy, které jsou vztažené na 1% příměsi pojiva, uvádí tabulka 3-2.

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

Tabulka 3-2: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [6]

3.2.3. Doroport TB 25

Stabilizace vápnem je v dnešní době poměrně finančně náročná a stabilizace cementem má zřetelnou tendenci vzniku trhlin a to z důvodu rychlého náběhu pevnosti. Proto bylo třeba najít nové vyhovující řešení, které by splňovalo několik zásadních požadavků:

- mělo by mít pomalejší náběh pevnosti
- snaha o vyloučení trhlin
- dobrá odolnost proti klimatickým vlivům
- trvanlivost vůči síranům, na které je vápno velmi citlivé
- cenová výhodnost oproti ostatním výrobkům

Doroport TB 25 je vzhledem ke svým vlastnostem dokonalým pojivem pro podkladní vrstvy. Použitím tohoto materiálu vzniká zhutnitelná struktura, která neobsahuje spoje, netvoří se trhliny, má dostačující únosnost a je odolný proti mrazu. První použití tohoto pojiva se datuje do roku 2002, kdy byl použit na stavbě mimoúrovňové křižovatky v Praze 8.

Doroport TB 25 se vyrábí kombinací slínku a hydraulických komponent. Skládá se pouze ze složek s hydraulickou reakcí. Chování pojiva při náběhu pevnosti je přizpůsobeno požadavkům na konečné vlastnosti stabilizovaných vrstev. Doroport TB 25 vykazuje velmi dobrou odolnost vůči chemickým vlivům, zvláště je velmi odolný vůči síranům.

Technologicky se směs mísí zemní frézou in situ. Aplikace je velmi snadná a nepotřebuje zvláštní pracovní ani mechanické stroje. Doroport TB 25 reaguje s vlhkostí alkalicky, proto musí být při zasažení pokožky, nebo jiné části těla dokonale propláchnut vodou. Pokud by byly zasaženy oči, doporučuje se okamžité lékařské ošetření. V tabulce 3-3 je uvedeno srovnání cementového pojiva s Doroportem TB 25.

Doba zrání	Cement 32,5 – 6 % (MPa)	Doroport TB 25 – 7 % (MPa)
7 dní	2,48	1,38
28 dní	2,65	1,69
28 dní + 13 cyklů mrazu	---	1,95
60 dní	3,89	2,15
60 dní + 13 cyklů mrazu	4,28	2,43

Tabulka 3-3: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [7]

Provedené praktické zkoušky prokázaly, že nárůst pevnosti není přerušeno ani působením nepříznivých klimatických vlivů. Nárůst pevnosti je velmi pomalý, z tohoto důvodu někdy dochází, že není pevnost po 28 dnech dostačující. Naopak zkoušky po 60 dnech vychází zpravidla vždy.

3.2.4. Dorosol C xx

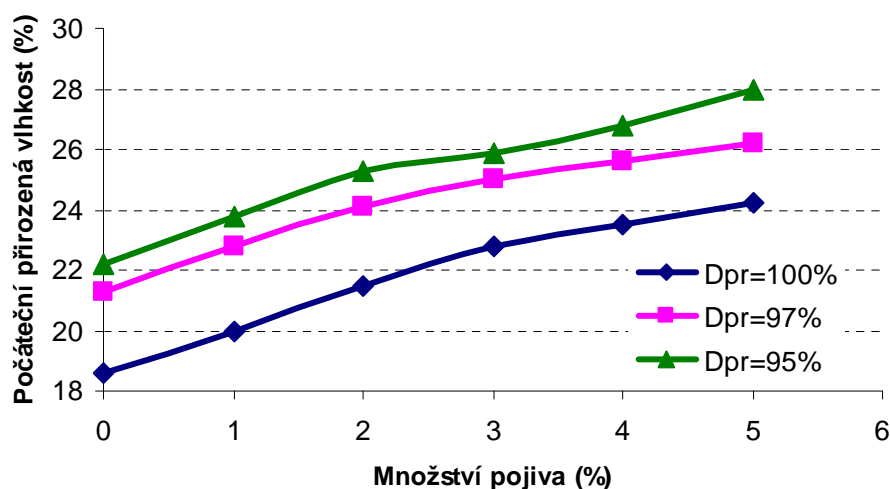
Pojivo Doroport TB 25 neřeší možnost používání kombinace pojiv spojený s dvojitým dávkováním a dvojitým mícháním. V roce 2004 přišla firma Holcim a.s. s novým druhem pojiva, který dostal název Dorosol C xx (xx – podíl vápna ve směsi). Dorosol C xx je směsné pojivo na bázi kombinace: cementu, vápna a dalších cementářských surovin. Podíl hlavních složek je v závislosti na druhu a chování zeminy libovolně měnitelný a tím je možné zvolit optimální variantu pro danou stavbu. Zásluhou složení Dorosolu C xx odpadá dvojitý míchání a dvojitý dávkování směsi.

Hlavní rysy Dorosolu C xx jsou:

- snížení vlhkosti všech druhů zemin
- zvýšená odolnost proti mrazu
- struktura vytvářející zhutnitelný podklad vysoké únosnosti
- odstupňovaná zrnitost s vysokou jemností zrna

Výroba Dorosolu C xx je uskutečňována v mísících stanicích, kde lze vlastnosti výrobku měnit a přizpůsobit požadavkům stavby. Snadná aplikace a manipulace na staveništi za použití běžných technologických zařízení a pracovních postupů. Dorosol C xx je rozprostírán přímo na povrch zeminy a poté se nájezdem techniky mísí. Hutnění zeminy se rozlišuje v závislosti na druhu zeminy a může následovat ihned nebo i po několika hodinách. Dávkování se volí v rozsahu 2 až 6 % dle druhu upravované zeminy. U tohoto pojiva platí bezpečnostní a zdravotní opatření stejné jako u pojiva Doroport TB 25.

Příklad použití Dorosol C xx



Obrázek 3-3: Použití Dorosolu C xx v závislosti na vlhkosti zeminy [8]

3.2.5. Popílek

Popílek je produkt, který vzniká vysokopecním spalováním uhlí. Tento jemný prášek skládající se z jemných částic má pucolánové vlastnosti. Tímto zjištěním se začalo využíváním popílků pro zlepšování mechanicko-fyzikálních vlastností zemin. Výrobky z popílku musí splňovat nejpřísnější předepsaný technologický postup přípravy a použití. Pro stabilizaci zemin popílkem rozeznáváme:

- PP – popílek a popel, který vzniká při vysokopecním spalováním uhlí
- FPP – fluidní popílek a popel, vzniká při fluidním spalování mletého uhlí
- PSU – popílková suspenze, směs popílku, vody a zpravidla i jiného pojiva
- PST – popílek stabilizovaný, zvlhčená směs popílku a jiného pojiva (cement, vápno)

Technologie stabilizace popílkem má jednu zásadní výhodu a to používání druhotného odpadního materiálu. Uplatňování popílkových stabilizátů již prošlo fází pilotních projektů a v současné době byla vytvořena technologická a předpisová základna pro stále častější používání tohoto pojiva.

Volba druhu pojiva pro úpravu určité zeminy je závislá na aktuálních vlastnostech zeminy. Zpravidla se vychází z vlastností, kterými jsou: zrnitost, index plasticity, vlhkost,

objemová hmotnost apod. Velmi důležitým parametrem pro volbu určitého pojiva je ekonomická výhodnost a jeho dostupnost.

3.3. Geosyntetika

Geosyntetika jsou již po několik desetiletí ve stavebnictví často používaným materiálem. Jejich použití je velmi rozmanité: velmi dobrá separační funkce, drenážní funkce, ochranná funkce a v neposlední řadě i funkce výztužná. Výztužná funkce je nesporná při vyztužování svahů a stěn zemních konstrukcí, na rozdíl v konstrukčních vrstvách není účinnost výztuže zcela evidentní. Geosyntetika dělíme:

- tkané geotextilie – vyrábí se tkaním na osnovu a útek
- netkané geotextilie – výroba z nekonečně dlouhých vláken
- pletené geotextilie – vyrábí se speciální technikou
- geomembrána – nepropustná fólie o tl. 0,5 – 2,5 mm
- geomříž – vznik z geomembrány proděravěním a předeptnutím
- geosít² – výroba chemickým, teplotním nebo mechanickým spojením pásků
- geobuňky – trojrozměrné prvky vyráběné z pásků lokálně pospojované
- geokompozita (geomatrace) – výrobek z více druhů komponentů



Obrázek 3-4: Pokládka filtrační a separační geotextilie na zemní pláň [9]

Výroba je nejčastěji uskutečňována z polyesteru, který má velmi dobrou pevnost v tahu, polypropylénu nebo polyetylénu, jež mají naopak vysokou odolnost vůči organickým sloučeninám a organickým kyselinám. Životnost není prakticky nijak omezená, pokud je však

geosyntetikum vystaveno klimatickým vlivům, zejména nebezpečnému UV záření, nastává degradace materiálu.

Funkce a užití geosyntetik v zemním tělese:

- ochranná funkce – zajištění vlastností původního materiálu při pokládce druhého
- filtrační funkce – zaručuje proudění vody v kolmém směru na geosyntetikum a současně zabraňuje pohybu pevných částic ve směru proudění vody
- drenážní funkce – odvádí vodu z drenážní konstrukce v požadovaném množství po celou dobu životnosti konstrukce
- separační a protierozní funkce – zabraňuje mísení dvou sousedních podkladních vrstev, zajišťuje ochranu vrstev proti klimatickým vlivům
- výztužná funkce – zvýšení stability násypu, budování strmějších svahů, zlepšení tahových vlastností konstrukce

Vyztužování zemin geosyntetickými materiály je někdy rozdělováno na dva systémy:

1. Mikrovystužování zemin

Technologie je založena na promísení zeminy s malými, obvykle náhodně orientovanými výztužnými prvky, kterými jsou tenká vlákna nebo nastříhané geotextilie. Množství geosyntetických prvků závisí na velikosti a druhu použitých geosyntetik, avšak nepřesahuje 1 % hmotnosti upravované zeminy. Jednotlivé prvky ovlivňují pouze malý objem zeminy, proto je potřeba velkého množství prvků.

2. Makrovystužování zemin

Na rozdíl od výše uvedené technologie se makrovystužování rozprostírá do zemního tělesa jako celek. Nejčastějšími výrobky jsou: tkané a netkané geotextilie, geomříže, geosítě, geobuňky, georohože a několik dalších geokompozit. Tyto prvky ovlivňují velký podíl objemu zeminy v porovnání k celkovému objemu zemního tělesa. Počet makrovýztužných prvků se odvíjí od velikosti násypu a druhu zeminy od 1 do 20 vrstev.

Problematika výztužné funkce, ve vztahu únosnosti podloží, není v současné době stále objasněna. Tímto problémem se zabývá velké množství českých i zahraničních pracovišť.

4. Návrh úpravy zemin

Pro stanovení základních mechanicko-fyzikálních vlastností se zemina podrobí laboratorním zkouškám. Orientační zkoušky jsou provedeny již v etapě podrobného geotechnického průzkumu a to z důvodů určení materiálových požadavků stavby.

Základní parametry zemin, které se určují v laboratořích:

- Attebergovy meze – konzistenční meze (mez tekutosti, mez plasticity, index plasticity)
- zatřídění zeminy
- stanovení zkoušky Proctor Standard
- stanovení poměru únosnosti CBR

Další podrobný průzkum je proveden v průběhu realizace stavby, nejčastěji před zahájením stavebních prací. Vedle výše uvedených základních parametrů se stanovuje okamžitý poměr únosnosti – IBI. Laboratorní stanovení IBI a CBR je provedeno dle ČSN EN 13 286-47. Pro aktivní zónu jsou požadavky uvedené v tabulce 4-1.

Způsob použití		Požadované hodnoty ¹⁾		
		CBR ³⁾	Minimální vlhkost směsi	Okamžitý index únosnosti
Aktivní zóna ²⁾	Podloží PIII	CBR ₁₅	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží PII	CBR ₃₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží PI	CBR ₅₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
¹⁾ Kategorie podle ČSN EN 14 227-10, 11, 12, 13 a 14				
²⁾ PI, PII, PIII jsou typy podloží podle předpisu TP 170				
³⁾ Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14 227-10 až 14				

Tabulka 4-1: Požadované hodnoty únosnosti CBR a IBI pro upravované zeminy pro aktivní zónu [10]

Zemina v aktivní zóně se musí posoudit z hlediska namrzavosti. Zeminy klasifikované jako GW, GP, SW, SP, G-F, S-F jsou zeminy nenamrzavé, ostatní zeminy se musí posoudit podle zrnitosti. Zeminy, které upravujeme pojivý, se musí posoudit dle ČSN 72 1191. V aktivní zóně není možné použití namrzavé zeminy.

Pro násypová tělesa jsou požadované hodnoty uvedené v tabulce 4-2.

Způsob použití	Požadované hodnoty ¹⁾	
	Okamžitý index únosnosti	CBR
Podloží násypu	min IBI ₅	---
Každá technologická vrstva násypu	min IBI ₁₀	---
Zhutňující vrstva násypu vrstevnatého, z vátého písku, z popílku upraveného pojivy	---	min CBR ₁₅ ²⁾
¹⁾ Podle ČSN EN 14 227-10, 11, 12, 13 a 14, stanovené při vlhkosti W_{opt} ²⁾ Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14 227-10 až 14		

Tabulka 4-2: Požadované hodnoty poměru únosnosti upravených zemin v násypu a podloží násypu [11]

Těleso násypu je zhotovováno po vrstvách, jejichž tloušťka závisí na technologii hutnění. Z hlediska provádění můžeme budovat těleso mimo vlastní násyp, kdy se upravená zemina dováží na místo určení a poté se rozprostře, nebo se nejdříve zemina doveze na požadovanou pozici a až poté se provede promísení např. zemní frézou.

Před úpravou zemin v podloží násypu se musí odstranit veškerá vegetace a je nutné odstranit ornici. Povrch podloží násypu je vyspádován a je provedeno odvodnění dle projektové dokumentace. Úprava zemin se provádí obvykle o jedné vrstvě v tloušťce dané mechanizací. Po úpravě se prokazuje zhutnění a měření hloubky promísení.

Jak už bylo výše uvedeno, volba technologie úpravy zemin závisí na vlastnostech používané zeminy. Pro úpravu spraší, jílovitých zemin, které mají střední nebo vysokou plasticitu, se doporučuje použít vápno. Naopak pro zeminy s nízkou plasticitou se používá cement nebo jiné hydraulické pojivo. Uvedená doporučení jsou pouze teoretická. Vždy je důležité vycházet ze stanovení a zařídění zemin. V další části jsou na vybrané zemině provedeny laboratorní zkoušky, kdy je zemina zaříděna a z dosažených výsledků, bude stanoven druh a množství s určitého pojiva.

ČÁST 2. – LABORATORNÍ ČÁST

5. Klasifikace zemin

Daná zemina bude podrobena laboratorním zkouškám, které budou v této kapitole popsány a provedeny. Dle zjištěných mechanicko-fyzikálních vlastností, můžeme určit, jak se daná zemina bude chovat. Po vyhodnocení zeminy, zlepšíme zeminu vybraným druhem pojiva a na směsi budou provedeny zkoušky.

5.1. Stanovení přirozené vlhkosti zemin

Přirozená vlhkost zeminy se stanovuje jako hmotnostní poměr pórové nebo volné vody ze známé hmotnosti vzorku, k hmotnosti vysušené zeminy zkušební vzorku. Vysoušený vzorek je uložen do vysoušecí nádoby známé hmotnosti. Nádoba je zcela očištěna od nečistot a zvážena. Poté se do nádoby vloží zkušební vzorek a je ihned zvážen s přesností ± 3 g. Tato nádoba se umístí spolu se vzorkem do sušárny s nucenou cirkulací vzduchu, která je schopna zaručit stálou teplotu $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v celém sušícím přístroji. Požadovaná doba vysoušení se liší v závislosti na druhu zeminy, velikosti zkušební vzorku, typu a kapacitě sušárny. Za dostatečnou dobu považujeme vysoušení od 16 do 24 hodin.

Vlhkost zeminy je poté vypočtena dle vzorce:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} * 100 = \frac{m_w}{m_s} * 100$$

m_c – hmotnost prázdné nádoby (g)

m_1 – hmotnost nádoby a vlhkého zkušební vzorku (g)

m_2 – hmotnost nádoby a suchého zkušební vzorku (g)

m_w – hmotnost odpařené vody (g)

m_s – hmotnost suché zeminy (g)

w – vlhkost (%)

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M

Přesnost: 0,01 g.

Max. kapacita: 600 g.



Obrázek 5-1: Digitální váhy typ KERN 600-2M [0]

Sušárna: VENTICELL 111

Regulace teploty: 15 – 250 °C.

Vnitřní objem sušárny: 111 l.



Obrázek 5-2: Sušárna s nucenou recyklací vzduchu VENTICELL 111 [0]

Výsledky zkoušky:

Vzorek č.	m_c (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_s (g)	m_w (g)	W (%)
1	95,46	269,61	236,98	141,52	32,63	23,06
2	115,87	360,13	313,61	197,74	46,52	23,53
3	115,42	411,97	355,67	240,25	56,30	23,43
průměr	---	---	---	---	---	23,34

Tabulka 5-1: Stanovení přirozené vlhkosti dané zeminy [0]



Obrázek 5-3: Vysušené vzorky pro stanovení přirozené vlhkosti [0]

5.2. Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic pomocí pyknometru

Před začátkem zkoušky musí být provedena kalibrace hmotnosti pyknometru s velmi vysokou přesností 0,01 g. Kalibrace pyknometru je provedena pomocí kapaliny, u které známe hustotu, v našem případě vodou. V pyknometru nesmí zůstat žádný vzduch

a hladina má dosahovat do úrovně dané rysky nebo na vršek kapiláry. Po tomto doplnění se stanoví hmotnost pyknometru s pomocnou kapalinou (vodou). Tímto získáme člen m_1 do níže uvedeného vzorce. Po kalibraci nastává příprava vzorku. Použitý vzorek je vysušen v sušárně při teplotě $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ v požadované délce. Minimální hmotnost (m_4) vysušeného vzorku je 10 g a vzorek je rozemlet, aby v zemině nezůstaly žádné nežádoucí póry. Po těchto výše uvedených přípravách můžeme začít se zkouškou. Nejdříve si zvážíme prázdný pyknometr s přesností 0,01 g (m_0). Následuje další vážení pyknometru s vysušenou zeminou (m_2). Část pyknometru, cca do výšky 10 – 20 mm nad povrch zeminy, je doplněna pomocnou kapalinou (vodou). Veškerý uzavřený vzduch je odstraněn 10 až 15 minutovým provařením v pískové lázni s občasným protřepáním. Následuje zchlazení pyknometru na okolní teplotu a po tomto ochlazení je stanovena hmotnost vzorku zeminy a pyknometru spolu s pomocnou kapalinou (vodou) a to s přesností na 0,01 g (m_3).

Hustota pevných částic je vypočtena dle vzorce:

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

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 zkušebním vzorkem a pom. kapalinou (g)

m_4 – hmotnost vysušeného zkušebního vzorku (g)

ρ_w – hustota pomocné kapaliny (g/cm^3)

ρ_s – hustota pevných částic (g/cm^3)

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M

Sušárna: VENTICELL 111

Pyknometr:

Objem 100 ml

Skleněná zabroušená zátka a kapilární trubička

Písková lázeň:

Pro provaření a odstranění vzduchu

Výsledky zkoušky:

Vzorek č.	Teplota °C	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	ρ _w (g/cm ³)	ρ _s (g/cm ³)
1	26,00	33,31	135,47	44,19	142,04	10,88	0,99681	2,518
2	26,40	44,43	145,70	54,88	152,04	10,45	0,99670	2,534
3	26,50	26,81	133,68	37,45	140,18	10,64	0,99668	2,562
průměr	---	---	---	---	---	---	---	2,538

Tabulka 5-2: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic [0]

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

Tabulka 5-3: Hustota vody při různých teplotách opravená o vztlak [12]

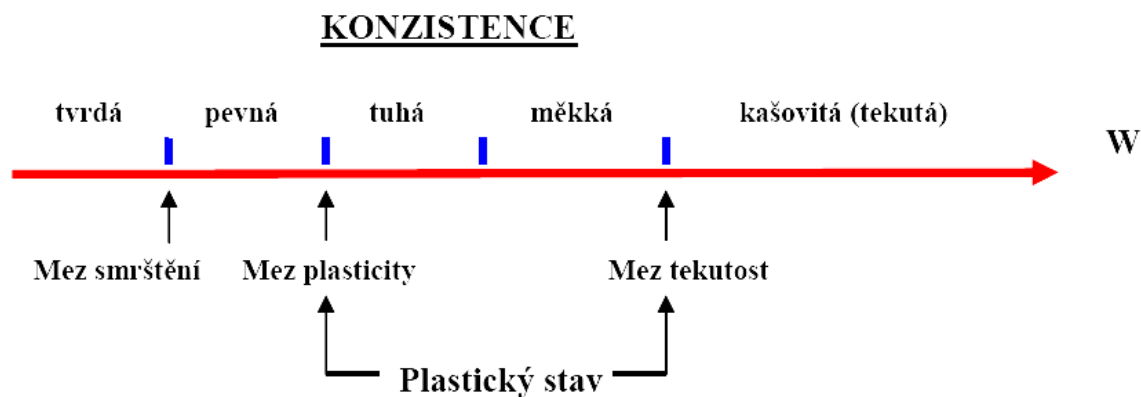


Obrázek 5-4: Pycnometry v pískové lázni [0]

5.3. Konzistenční meze

Vlhkost má na jílovité a prachovité zeminy daleko větší vliv než na zeminy nesoudržné a to zejména z důvodů velikosti zrn a vzájemné vazby soudržných zemin. Zemina se při určitém obsahu vody začne chovat plasticky. Tento stav je definován tak, že zemina vykazuje určitou smykovou pevnost, po jejíž překročení se zemina začne přetvářet, aniž by rostlo napětí. Plastický stav je ohraničen mezí plasticity W_P a mezí tekutosti W_L . Rozdílem mezí tekutosti a plasticity dostaneme tzv. index plasticity I_p .

Rozsah indexu plasticity je různý a závisí na druhu zeminy. Z tohoto důvodu je velmi důležitou vlastností zejména soudržných zemín. Dalšími stavy, které u zemín zjišťujeme, jsou uvedeny na následujícím obrázku 5-5.



Mez tekutosti (W_L)

V minulosti se pro stanovení meze tekutosti používal Casagrandeho přístroj, který je v současné době nahrazován přístrojem kuželovým. Ten musí být vybaven měřicím zařízením, pro stanovení hloubky penetrace kužele a obsahovat nastavení kužele do kontaktu s povrchem zkoušeného vzorku s přesností $\pm 0,1$ mm. Pro zkoušku se používá homologovaný kužel váhy 80 g při úhlu zkosení 30° nebo 60 g/ 60° . Před začátkem zkoušky si nejdříve připravíme zeminu dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12. V případě nutnosti se přidá takové množství destilované vody, aby první penetrace kužele dosahovala hodnot uvedené v tabulce 5-4.

Kužel – rozměry a hmotnost	80 g/ 30°	60 g/ 60°
První penetrace	okolo 15 mm	okolo 7 mm
Penetrační rozsah	15 až 20 mm	7 až 15 mm
Hloubka penetrace při W_L :	20 mm	10 mm

Tabulka 5-4: Požadavky kuželové penetrace [14]

Připravená pasta se umístí do připravené nádoby za snahy nepromíchat zkušební vzorek s okolním vzduchem. Z vrchní části musí být odstraněna přebytečná zemina srovnávacím pravítkem, aby byl vytvořen hladký povrch. Poté se nádoba se vzorkem přemístí pod kužel, který je spuštěn a zastaven těsně při dotyku se zeminou. Po této přípravě následuje uvolnění kužele a ponechán ve spuštěné pozici 5 s ± 1 s. Konečná pozice je zaznamenána s přesností

0,1 mm a penetrace je vypočtena, jako rozdíl původní a konečné polohy kužele. Ze vzorku se odebere zemina o hmotnosti cca 10 g a stanoví se hmotnostní vlhkost dle normy ČSN ISO /TS 17892-1.

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M

Sušárna: VENTICELL 111

Penetrometr (kuželový přístroj):

Penetrační rozsah: 0 – 360 mm

Kužel: nerezová ocel

Hmotnost kužele: 80 g

Vrcholový úhel: 30°

**stěrka, stříčka s destilovanou vodou,
odpařovací miska, stopky, vzduchotěsná
nádoba.**



Obrázek 5-6: Penetrometr [0]

Výsledky zkoušky:

Vzorek č.	m_c (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_{wz} (g)	m_z (g)	m_w (g)	Penetrace (mm)	W (%)
1	31,34	47,31	41,94	15,97	10,60	5,37	15,10	50,660
2	29,95	46,87	41,09	16,92	11,14	5,78	15,85	51,885
3	30,75	46,33	40,93	15,58	10,18	5,40	17,00	53,045
4	34,31	49,34	44,06	15,03	9,75	5,28	17,90	54,154
5	44,13	62,38	55,82	18,25	11,69	6,56	18,90	56,116
6	46,08	65,91	58,67	19,83	12,59	7,24	20,20	57,506
7	44,29	63,19	56,16	18,90	11,87	7,03	22,30	59,225
8	47,64	65,22	58,67	17,58	11,03	6,55	23,00	59,383
W_L	---	---	---	---	---	---	20,00	56,634

Tabulka 5-5: Určení meze tekutosti [0]

m_c – hmotnost prázdné nádoby (g)

m_1 – hmotnost nádoby a vlhkého zkušební vzorku (g)

m_2 – hmotnost nádoby a suchého zkušební vzorku (g)

m_{wz} – hmotnost vlhké zeminy (g)

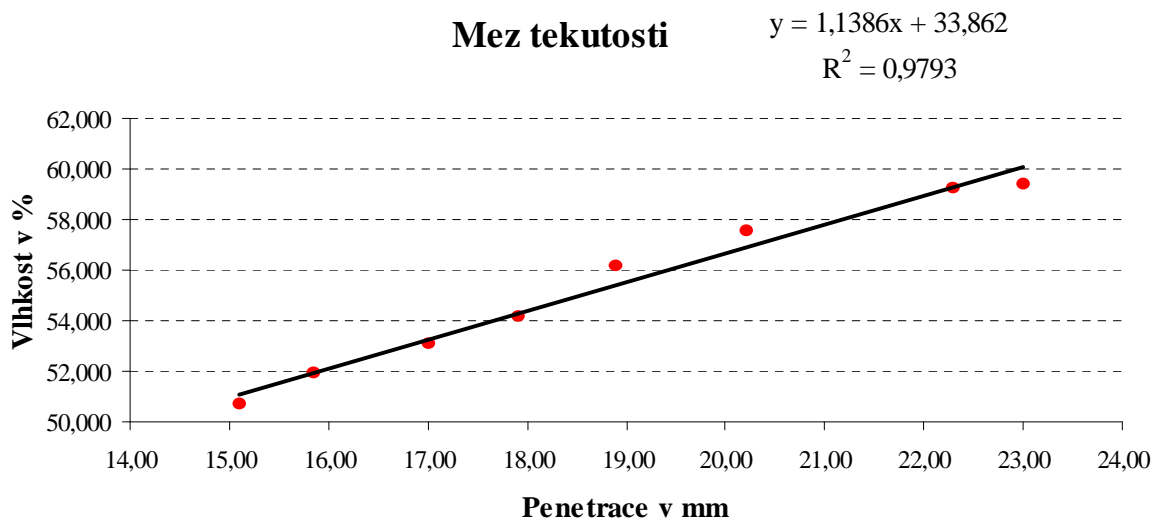
m_z – hmotnost suché zeminy (g)

m_w – hmotnost odpařené vody (g)

W – vlhkost (%)

W_L – mez tekutosti (%)

Vztah mezi vlhkostí (%) a penetrací kužele (mm) se vynese v lineárním měřítku s vlhkostí na lineární ose jako souřadnicí a penetrací kužele jako pořadnicí. Po vynesení bodů se graf proloží přímkou. Ze sestrojeného grafu se odečte vlhkost, která odpovídá 20 mm penetrace a stanovíme mez tekutosti ($W_L = 56,634 \%$).



Obrázek 5-7: Grafické znázornění meze tekutosti [0]

Mez plasticity (W_L)

Nejprve se vytvoří pasta, která vznikne sloučením suché a rozemleté zeminy a vody. Následuje odebrání zkušební vzorku o hmotnosti cca 20 g, jenž se umístí na desku, kde se nechá schnout, dokud nebude dostatečně plastická, aby byla formovatelná do tvaru koule. Koule se převaluje mezi prsty a válí v dlaních po tak dlouhou dobu, nežli teplo rukou nevysuší zeminu natolik, aby se na zkušebním vzorku objevily jemné trhlinky. Vzorek zeminy se rozdělí přibližně na dva díly (cca po 10 g) a na každém zvlášť se provede stanovení meze plasticity. Z těchto stejných dílců jsou pomocí ukazováčku a palce vyrobeny válečky o průměru zhruba 6 mm.



Obrázek 5-8: Příprava válečků o průměru cca 6 mm [0]

Tyto válečky se poté začnou válet mezi prsty ruky a dřevěnou podložkou, která umožňuje vsáknutí přebytečné vody. Válečky se za stejného tlaku při 10 až 15 pohybech zmenší na 3 mm při rychlosti 1 pohybu ruky vpřed a vzad za 1 s. Části rozpraskaných válečků se ihned přemístí do sušárny, aby byla stanovena vlhkost zkušebních vzorků.



Obrázek 5-9: Zkušební vzorky před vložením do sušárny VENTICELL 111 [0]

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M

Sušárna: VENTICELL 111

stěrka, stříčka s destilovanou vodou, odpařovací miska, dřevěná deska

Výsledky zkoušky:

Vzorek č.	m_c (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_{wz} (g)	m_z (g)	m_w (g)	W (%)
1	11,73	13,36	13,05	1,63	1,32	0,31	23,485
2	10,79	12,52	12,19	1,73	1,40	0,33	23,443
W_p	---	---	---	---	---	---	23,464

Tabulka 5-6: Určení meze plasticity [0]

Vlhkost se vypočítá z obou zkušebních vzorků a nesmí se lišit o 0,5 %. Pokud by byla tato odchylka větší, musí se zkouška opakovat. Ze získaných hodnot vypočítáme aritmetický průměr a prohlásíme za mez plasticity ($W_p = 23,464$ %).

Po získání mezí tekutosti a plasticity může přikročit k výpočtu indexu plasticity (I_P) a následně i ke stanovení stupně tekutosti a stupně konzistence. Zmíněné charakteristiky vypočítáme dle vzorců:

- index plasticity $I_P - I_P = W_L - W_P$; stupeň tekutosti $I_L - I_L = \frac{W - W_P}{I_P}$

- stupeň konzistence $I_C - I_C = \frac{W_L - W}{I_P}$

Po dosazení do výše uvedených vzorců byl spočítán index plasticity $I_P = 33,17$, stupeň tekutosti $I_L = -0,00377$ a stupeň konzistence $I_C = 1,00377$.

5.4. Stanovení zrnitosti

Existují dva postupy zjišťování zrnitosti zemin, které jsou založené na velikosti zrn. Síťový rozbor použijeme, pokud bude 90 % nebo více procent zrn větší nežli 0,063 mm. Naopak hustoměrnou zkoušku provádíme, je-li více než 10 % zrn menšího průměru jak 0,063 mm. Stanovení zrnitosti se provádí pomocí sít různé velikosti, kdy se zemina nasype na síto s největšími otvory a vibracemi propadávají zrna stále menšími otvory. Pokud na nejmenším síti (0,063 mm) zůstane zbytek zeminy o hmotnosti větší než 10 % je provedena hustoměrná zkouška, která je založená na sedimentaci částic (Stokesův zákon).

Síťový rozbor

Pro provedení zkoušky je třeba vysušeného vzorku známé hmotnosti. Vzorek zeminy se postupně po dobu minimálně 10 minut prosévá na sadě sít. Hmotnosti zachycené na jednotlivých sítích se zváží a určí procentuální zastoupení jednotlivých frakcí zeminy. Pokud by hmotnost zkoušeného vzorku před začátkem a po konci zkoušky vykazovala rozdíl větší než 1 %, pak se musí zkouška opakovat.

Frakce zeminy propadlé jakýmkoliv sítem je vypočítána následovně:

$$F_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} * 100(\%)$$

F_n – frakce zeminy propadlé sítem (%)

m_1 – hmotnost zeminy propadlé sítem s nejmenším otvorem (g)

m_2, m_n – hmotnost zeminy propadlé síty po sobě jdoucími až do zvolené vel. oka (g)

m – celková hmotnost vysušeného zkušební vzorku (g)

Hustoměrná zkouška

Nejdříve začneme přípravou suspenze, která musí být řádně promíchána. Promísení, např. přetáčením odměrného válce o 360°, probíhá po dobu dokonalého smíšení vody a částic zeminy o průměru menší než 0,063 mm. Válec je umístěn na rovnou podložku a ještě před zahájením odpočtu času je do suspenze ponořen hustoměr, tak aby se mohl volně vznášet. V předem zvolených intervalech je provedeno čtení na hustoměru R'_h s přesností na 0,001 g/ml. Během měření musí být hustoměr vyjmut a opláchnut vodou. Pro moje vlastní měření byly předem určeny tyto intervaly: 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 240, 480, 960 a 1140 s. Dále musí být zaznamenána teplota suspenze s přesností na 0,5 °C. O tuto teplotu se opraví čtení na hustoměru a získáme pravé čtení na hustoměru.

Teplota °C	t_m (mm)	Teplota °C	t_m (mm)	Teplota °C	t_m (mm)
8	-0,0013	16	-0,0006	24	+0,0008
9	-0,0013	17	-0,0005	25	+0,0010
10	-0,0013	18	-0,0003	26	+0,0013
11	-0,0012	19	-0,0002	27	+0,0015
12	-0,0012	20	+0,0000	28	+0,0018
13	-0,0011	21	+0,0002	29	+0,0020
14	-0,0009	22	+0,0004	30	+0,0023
15	-0,0008	23	+0,0006	31	+0,0026

Tabulka 5-7: Oprava hustoměru o teplotu [15]

Oprava hustoměru se provede dle vzorce:

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

H_{op} – pravé čtení hustoměru (mm)

R'_h – odečtená hodnota na hustoměru (g/ml)

t_m – oprava o teplotu (mm)

Po stanovení pravého čtení hustoměru lze vypočítat efektivní hloubku H_r . Efektivní hloubka má být vypočtena, pro každou kalibrační značku dle níže uvedené rovnice. Tato rovnice se mění v závislosti na druhu hustoměru.

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

H_r – efektivní hloubka hustoměru (mm)

Po těchto výpočtech můžeme přikročit ke stanovení náhradního průměru zrna d_i , ten se vypočítá dle Stokesova zákona a hmotnostního podílu frakce menšího než náhradní průměr zrna K (%).

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

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

Teplota °C	η
10	1,3040
15	1,1370
20	1,0020
24,5	0,9021
25	0,8910
30	0,7980

Tabulka 5-8: Dynamická viskozita vody [0]

H_r – efektivní hloubka hustoměru (mm)

η – dynamická viskozita vody (Pas)

ρ_s – zdánlivá hustota pevných částic (g/cm^3)

t – čas (s)

d_i – náhradní průměr zrna (mm)

K – hmotnostní podíl frakce menší než náhradní průměr zrna (%)

m – hmotnost zkušební vzorku (g)

H_{op} – pravé čtení hustoměru (mm)

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M

Sušárna: VENTICELL 111

Hustoměr, skleněné odměrné válce, stopky, teploměry

Sada sít



Obrázek 5-10: Sada sít a výsledky sítového rozboru [0]

Výsledky zkoušky:

Čas (s)	R'_h (g/ml)	t_m (mm)	H_{op} (mm)	H_r (mm)	η (Pas)	ρ_s (g/cm ³)	m (g)	d_i (mm)	K (%)
0	1,0300	0,0009	30,90	80,17	0,9021	2,538	75,65	---	---
5	1,0298	0,0009	30,70	81,11	0,9021	2,538	75,65	0,01706	66,968
10	1,0290	0,0009	29,90	84,87	0,9021	2,538	75,65	0,01234	65,223
20	1,0272	0,0009	28,10	93,33	0,9021	2,538	75,65	0,00915	61,296
40	1,0260	0,0009	26,90	98,97	0,9021	2,538	75,65	0,00666	58,678
60	1,0252	0,0009	26,10	102,73	0,9021	2,538	75,65	0,00554	56,933
90	1,0236	0,0009	24,50	110,25	0,9021	2,538	75,65	0,00469	53,443
120	1,0228	0,0009	23,70	114,01	0,9021	2,538	75,65	0,00413	51,698
240	1,0196	0,0009	20,50	129,05	0,9021	2,538	75,65	0,00311	44,718
480	1,0130	0,0009	13,90	160,07	0,9021	2,538	75,65	0,00245	30,321
960	1,0028	0,0009	3,70	208,01	0,9021	2,538	75,65	0,00197	8,071
1140	1,0008	0,0009	1,70	217,41	0,9021	2,538	75,65	0,00185	3,708

Tabulka 5-9: Stanovení hodnot d_i a K [0]

Pro zkoušku zrnitosti bylo použito 578,12 g vysušené zeminy. Vzorek byl nejdříve rozdělen na zrna pro hustoměrnou zkoušku a síťový rozbor. Na takto rozděleném množství bylo provedeno následující:

Suchý vzorek (g)	578,12
prosévací zkouška (g)	31,63
vyplaveno < 0,063 (g)	546,49
hustoměr (%)	94,529

Tabulka 5-10: Rozdělení hmotnosti vzorku [0]

síto - velikost (mm)	vzorek	31,63 g	%
0,500	2,32	29,31	92,67
0,250	2,49	26,82	84,79
0,063	26,82	0,00	0,00
zbytek	0,00	0,00	0,00

5-11: Síťový rozbor [0]



Obrázek 5-11: Průběh hustoměrná zkoušky [0]

Velikost zrn (mm)	Zbytková hmotnost zeminy (g)	Hodnoty pro křivku zrnitosti (%)
0,500	575,800	99,599
0,250	573,310	99,168
0,063	546,490	94,529
0,01706	66,968	63,304
0,01234	65,223	61,655
0,00915	61,296	57,942
0,00666	58,678	55,468
0,00554	56,933	53,818
0,00469	53,443	50,519
0,00413	51,698	48,870
0,00311	44,718	42,271
0,00245	30,321	28,662
0,00197	8,071	7,629
0,00185	3,708	3,505

Tabulka 5-12: Průměr zrn v závislosti na hmotnosti [0]

Na základě vypočtených průměrů zrn a jejich procentuálních zastoupení bude sestrojena křivka zrnitosti, která se zásadně znázorňuje v semilogaritmických nebo logaritmických souřadnicích. Důležitými body, jež budou vyznačeny, jsou d_{10} , d_{30} , d_{60} . Pomocí těchto bodů stanovíme charakteristiky:

- účinný průměr – $d_{ef} = d_{10}$
- číslo nestejnozrnitosti – $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
- číslo křivosti – $C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{10} * d_{60})}$

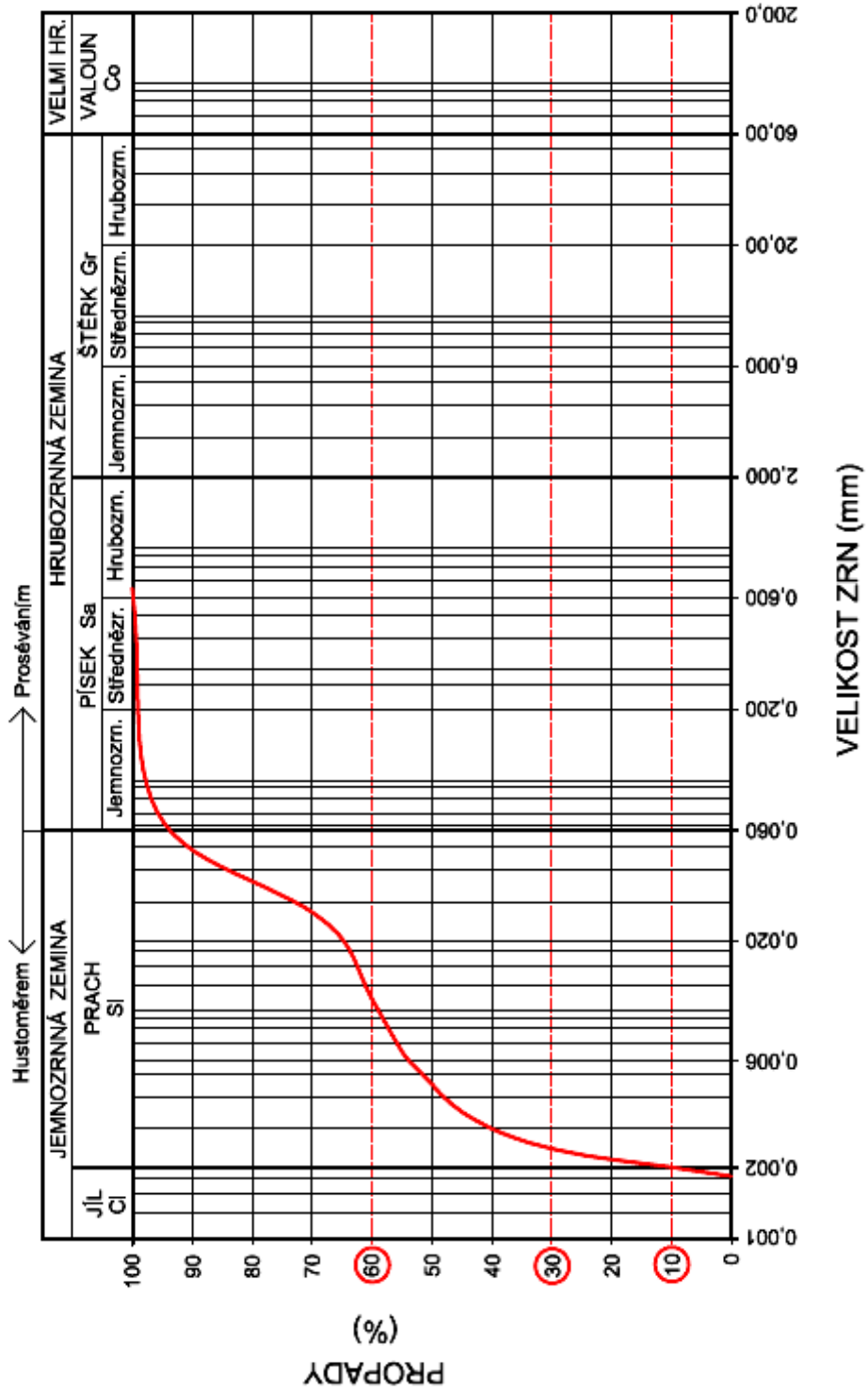
Účinný průměr d_{ef} , je průměr stejně velkých kulovitých zrn myšlené ideální zeminy tzn., že má v určitém ohledu stejné vlastnosti jako skutečná zemina. Účinný průměr má využití, zejména ke stanovení propustnosti zeminy. Pro zkoumanou zeminu bylo **$d_{ef} = 0,002024$ mm.**

Číslo nestejnozrnitosti C_u , charakterizuje sklon střední části křivky. Podle velikosti C_u rozdělujeme zeminy na stejnozrné ($C_u < 6$), středně zrněné ($6 < C_u < 15$) a dobře zrněné ($C_u > 15$). Stejnozrné zeminy oproti dobře zrněným vykazují vyšší pórovitost, větší propustnost, menší zhutnitelnost a nižší smykovou pevnost. Velikost **C_u zeminy je 5,394.**

Číslo křivosti C_c , je pomocná hodnota ke stanovení klasifikace zeminy. Číslo křivosti zeminy **$C_c = 0,286$.**

Z výše patrných vypočítaných vztahů vyplývá, že zemina je stejnozrná. Celá křivka zrnitosti je zobrazena na následujícím listu.

KŘIVKA ZRNITOSTI



Tvar křivky zrnitosti	C _s
dobře změněná	> 15
středně změněná	6 - 15
stejnozrná	< 6
přerušovaně změněná	vyšší

Tvar křivky zrnitosti	C _v
dobře změněná	1 < C _v < 3
středně změněná	< 1
stejnozrná	< 1
přerušovaně změněná	blízký 0

$$C_s = \frac{d_w}{d_v} = \frac{0,010918}{0,002024}$$

$$C_v = 5,394 < 6$$

stejnozrná zemina

Obrázek 5-12: Křivka zrnitosti [0]

5.5. Popis, pojmenování a zatřídění zeminy

Zatřídění zemin do různých tříd a skupin se používá proto, aby se určité zemině přisoudily určité, velmi blízké vlastnosti. Tato klasifikace zemin nám umožňuje například návrh založení, nebo posouzení stability svahu na základě vlastností přisouzené určité skupině bez dalších, v některých případech velmi náročných zkoušek. V poslední době je snahou provádět zatřídění zemin na základě jednoduchých a časově nenáročných zkouškách. V současnosti je snaha o vytvoření jednotného klasifikačního systému pro inženýrské účely. Jako nejuniverzálnějším systémem se osvědčil systém USCS (Unified Soil Classification System). Dalšími systémy pro zatřídění zemin jsou AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) a systém USDA (U. S. Department of Agriculture), jejichž využití je především v USA a zahraničí. Klasifikační systém používaný v České Republice je definován v normě ČSN EN ISO 14688-2, který vychází s výše uvedeného systému USCS.

Systém USCS

Původně vznikl pro potřebu americké armády ve druhé světové válce. Systém vytvořil Arthur Casagrande, avšak od té doby byl již několikrát pozměněn a aktualizován. USCS je všestranný nástroj pro zatřídění zemin a narozdíl od systému AASHTO není omezen přesně definovanými skupinami.

Zatřídění zemin dle ČSN EN ISO 14688-2 do příslušných skupin musí probíhat na základě složení dané zeminy. Na zatřídění nemá vliv vlhkost ani ulehlost zeminy. V úvahu pro zatřídění se berou následující vlastnosti:

- zrnitost (granulometrické složení zeminy)
- plasticita
- obsah organických látek
- geneze
- index konzistence

Zrnitost

Stanovení velikostí jednotlivých zrn v zemině je uvedeno v předešlé kapitole. Výsledky prosévací a hustoměrné zkoušky jsou vyneseny do grafu – křivky zrnitosti. Je stanoven charakter zrnění zeminy dle parametrů C_u a C_c viz tabulka 5-13.

Tvar křivky zrnitosti	C_u	C_c
Dobře zrněná	> 15	1 < C _c < 3
Středně zrněná	6 – 15	< 1
Stejnozrná	< 6	< 1
Přerušovaně zrněná	většinou vysoký	blízký nule (většinou < 0,5)

Tabulka 5-13: Tvar křivky zrnitosti [16]

Plasticita

Jemná frakce zeminy zastoupená (jílem, silem a dalšími jílovými minerály) se nejčastěji klasifikuje dle plasticity. Plasticita se stanovuje laboratorními zkouškami. Stupeň plasticity má být pojmenován dle uvedeného názvosloví: neplastické, nízká plasticita, střední plasticita, vysoká plasticita.

Obsah organických látek

Pokud je zařídování zemin s organickými složkami prováděno na základě obsahu organických látek v zemině, musí být rozlišeno, zda se jedná o organickou nebo minerální zeminu.

Zemina	Obsah organických látek (< 2 mm) v % hmotnosti suché navážky
Nízko – organická	2 – 6
Středně – organická	6 – 20
Vysoko – organická	> 20

Tabulka 5-14: Zařídování zemin s organickou složkou [17]

Index konzistence

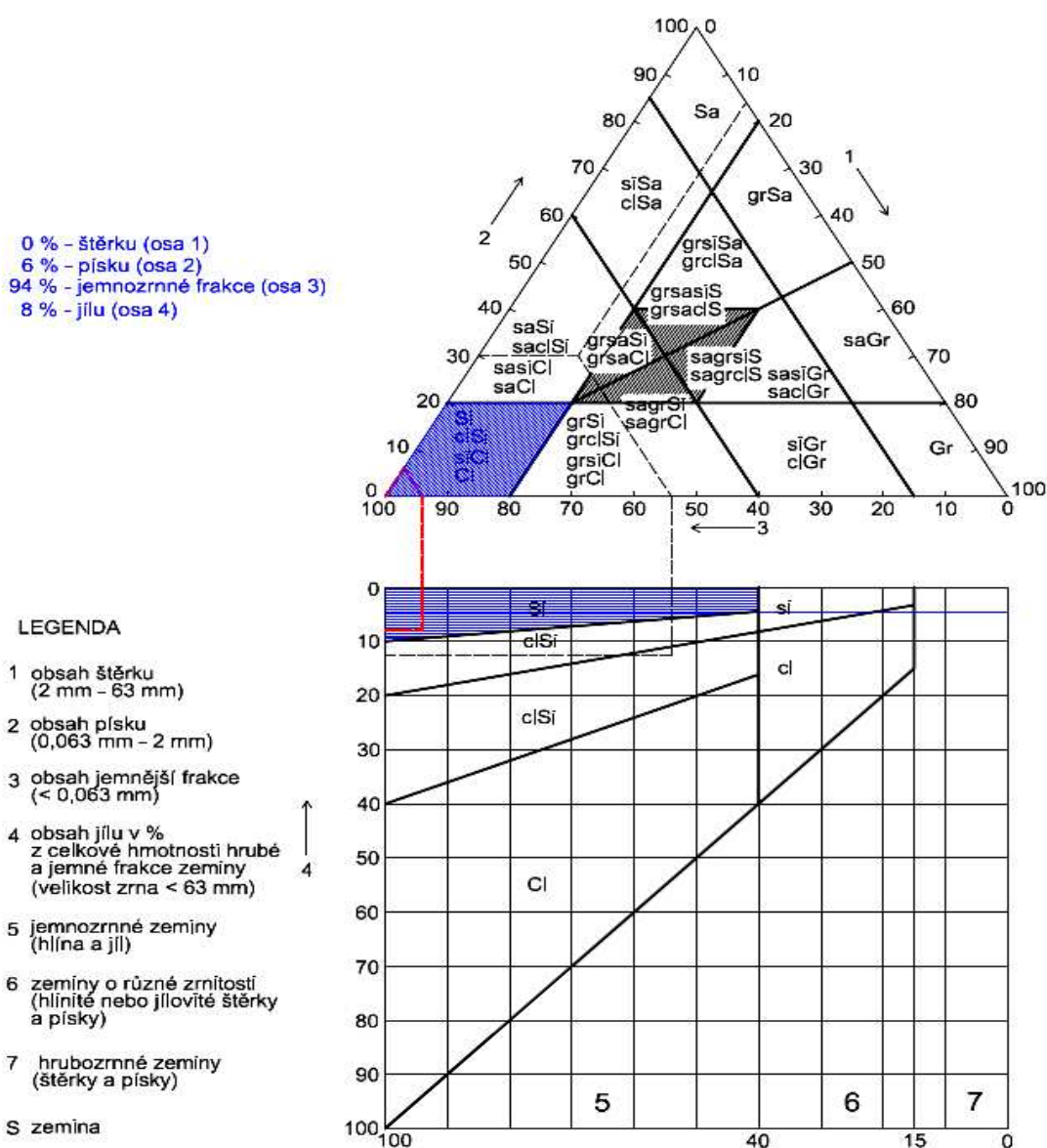
Pojmenování stupně konzistence zemin stanovuje tabulka 5-15. Tato rozdělení mohou být pouze orientační, zvláště u zemin s nízkou plasticitou.

Konzistence hlín a jílu	Index konzistence
Velmi měkké	< 0,25
Měkké	0,25 – 0,50
Tuhé	0,50 – 0,75
Pevné	0,75 – 1,00
Velmi pevné	> 1,00

Tabulka 5-15: Index konzistence I_c prachů a jílu [18]

Zkoumaná zemina byla zatříděna dle ČSN EN ISO 14688-2 na základě zrnitosti a indexu konzistence.

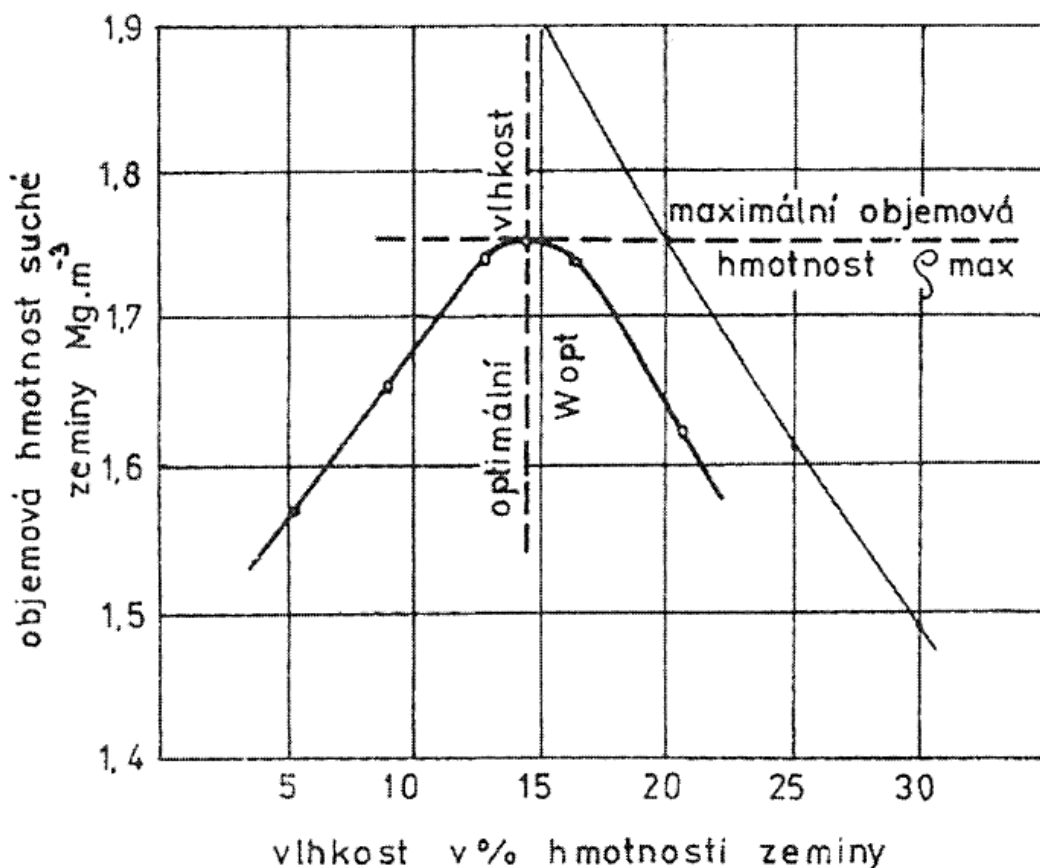
Podle ČSN EN ISO 14688-2 tvoří hlavní frakci zeminy prach (Si), který je zastoupen 86 %. Dalšími vyskytujícími se frakcemi jsou jíla (Cl) zastoupený cca 8 % a písek (Sa) zastoupený 6 %. Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o **zemínu prachovitou (Si)**. Konzistence zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2 byla shledána jako velmi pevná, hodnota **Ic = 1,00377**.



Obrázek 5-13: Zatřídění zeminy na základě křivky zrnitosti [0]

5.6. Stanovení zhutnitelnosti zemin

Zkouška zhutnitelnosti zemin, též Proctorova zkouška, je prováděna dle ČSN EN 13286-2. Zhutnitelnost zemin zobrazuje maximální objemovou hmotnost ρ_{dmax} , které se dosáhne zhutněním v moždíři, za použití normou stanoveného pěchu při optimální vlhkosti w_{opt} . K provedení zkoušky je předepsána válcová nádoba (moždíř) známého objemu (V) a známé hmotnosti (m_v). Norma ČSN 72 1015 předepisuje dva druhy zkoušek a to Proctorovu zkoušku standardní a Proctorovu zkoušku modifikovanou. Pro Proctorovu zkoušku standardní se užívá pěch o hmotnosti 2500 g, který dopadá na zeminu z výšky 300 mm. U Proctorovy zkoušky modifikované se používá pěch o hmotnosti 4500g dopadající na zhutňovanou zeminu z výšky 450 mm.



Obrázek 5-14: Grafické určení zhutnitelnosti zemin [0]

Pro zkoušku je potřeba zkušební vzorek zemin o hmotnosti cca 20 kg, který je vysušen v potřebném rozsahu v sušárně a rozemlet na hrudky prosáté sítem o průměru minimálně 5 mm. Zemina je následně rozdělena na dílčí vzorky o hmotnosti cca 2 kg. Dílčí vzorky se následně promísí s předem určeným množstvím vody a ponechají se ve vzduchotěsné

nádobě nejméně 12 hodin. Poté se do předem sestaveného moždíře začne postupně ukládat zemina ve 3 vrstvách, tak aby výsledná výška zeminy byla asi 25 mm nad okrajem základního dílu zeminy. Každá vrstva je hutněna normovaným pěchem 25-ti rovnoměrně rozdělenými údery pěchu. Po dokončení hutnění se vrchní díl moždíře odejme a přebytečná zemina je stržena ocelovým pravítkem. Moždíř včetně zeminy se zváží a poté je ze zeminy odebrán vzorek pro stanovení vlhkosti dle ČSN 72 1012. Po stanovení charakteristik vyneseme měření do grafu objemové hmotnosti v závislosti na vlhkosti a vyneseny body proložíme křivku.



Obrázek 5-15: Průběh zkoušky stanovení zhutnitelnosti [0]

Použité přístroje:

Váhy: KERN DE60K20
Sušárna: VENTICELL 111
stříčka s destilovanou vodou
odpařovací miska
skleněný kalibrovaný válec 100 ml
ocelové pravítko
pěch o hmotnosti 2500 g
moždíř o objemu 946,69 cm³
lopatky a lžíce



Obrázek 5-16: Sestava pro stanovení zhutnitelnosti [0]

Výsledky zkoušky:

Vz. č.	V_n (cm ³)	m_n (g)	m_s (g)	m_z (g)	ρ_m (kg/m ³)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_c (g)	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
1	946,69	4 300	5 980	1 680	1 774,60	134,81	132,68	115,87	12,67	1 575,03
2	946,69	4 300	6 030	1 730	1 827,42	137,03	135,24	123,04	14,67	1 593,60
3	946,69	4 300	6 100	1 800	1 901,36	133,18	130,76	116,25	16,68	1 629,58
4	946,69	4 300	6 130	1 830	1 933,05	136,90	134,15	119,68	19,00	1 624,35
5	946,69	4 300	6 150	1 850	1 954,18	112,79	109,75	95,46	21,27	1 611,38
6	946,69	4 300	6 150	1 850	1 954,18	136,03	132,38	115,41	21,51	1 608,26
7	946,69	4 300	6 140	1 840	1 943,61	135,61	132,15	116,99	22,82	1 582,45
8	946,69	4 300	6 120	1 820	1 922,49	144,84	140,55	124,03	25,97	1 526,17

Tabulka 5-16: Stanovení objemové hmotnosti zeminy při určité vlhkosti [0]

Objemová hmotnost vlhké zeminy ρ_m (kg/m³):

$$\rho_m = \frac{m_s - m_n}{V_n} * 1000$$

V_n – objem moždíře (cm³)

m_n – hmotnost prázdného moždíře (g)

m_s – hmotnost zeminy po zhutnění a hmotnost moždíře (g)

m_z – hmotnost vlhké zeminy (g)

ρ_m – objemová hmotnost vlhké zeminy (kg/m³)

Vlhkost zeminy při zhutnění w (%):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} * 100$$

m_1 – hmotnost misky a vlhkého vzorku (g)

m_2 – hmotnost misky a suchého vzorku (g)

m_c – hmotnost misky (g)

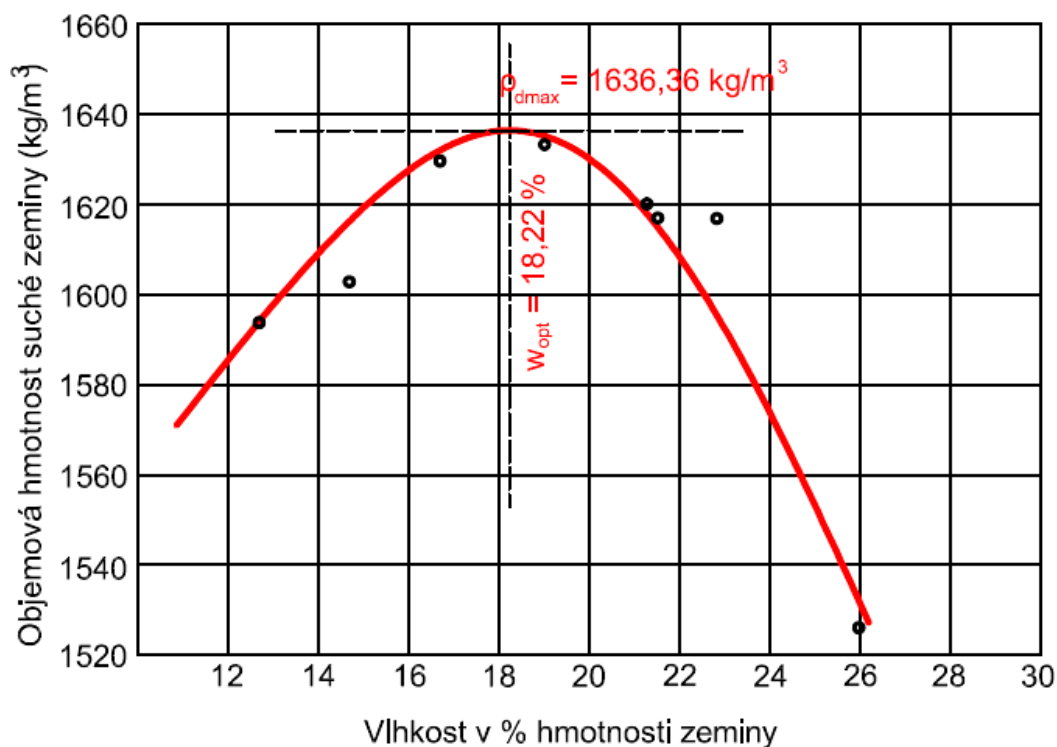
w – vlhkost (%)

Objemová hmotnost suché zeminy ρ_d (kg/m³):

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + w}$$

ρ_d – objemová hmotnost suché zeminy (kg/m³)

Podle výše uvedených vzorců je sestaven graf. Tento graf zobrazuje závislost objemové hmotnosti suché zeminy na vlhkosti. Maximální objemová hmotnost suché zeminy je **1636,36 kg/m³** při optimální vlhkosti **18,22 %**.



Obrázek 5-17: Grafické znázornění Proctorovy zkoušky [0]

5.7. Určení pevnosti v prostém tlaku

Napětí je definováno podílem síly a plochy, na kterou tato síla působí. Pro určení velikosti napětí v daném bodě uijeme vzorec:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

σ – napětí (Pa)

F – síla působící na průřezovou plochu (N)

S – průřezová plocha (m²)

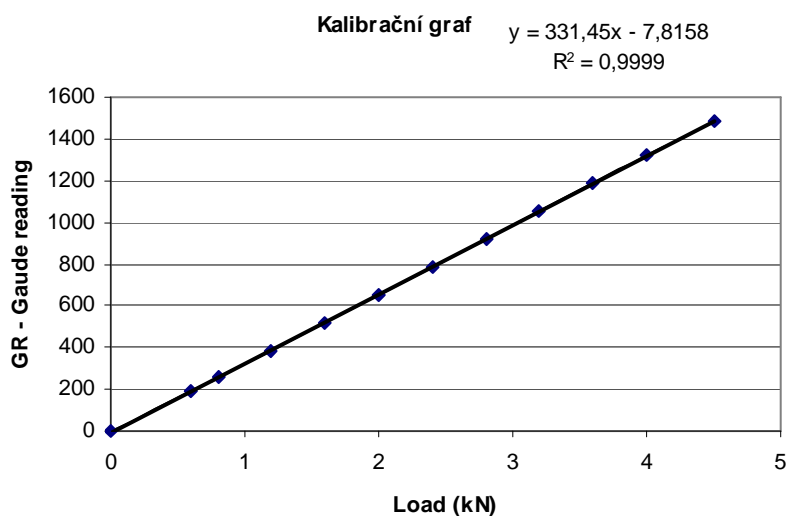
Dosadíme-li do tohoto vztahu měřené hodnoty, dostaneme následující vzorec:

$$\sigma = \left(\frac{GR + 7,8158}{331,45} \right) / \pi^2$$

GR – čtení zatížení (dílky)

Následující tabulka 5-17 a obrázek 5-18 zobrazují převod jednotek GR (Gauge reading) na jednotky zatížení v kN.

Load kN	Gauge reading
0	0
0,6	191,4
0,8	257,7
1,2	387,8
1,6	519,4
2	652,1
2,4	783
2,8	918,1
3,2	1050,5
3,6	1186,4
4	1320,6
4,5	1489



Tabulka 5-17: Převod hodnot zatížení [0]

Obrázek 5-18: Kalibrační graf [0]

Před začátkem zkoušky jsou nejdříve připraveny zkušební vzorky. Průřezová plocha zkušebního vzorku může být kruhová nebo čtvercová o minimální hodnotě 1000 mm². Poměr mezi výškou a průměrem se musí pohybovat v rozmezí 1,8 až 2,5. Největší zrna ve zkušebním vzorku nesmí přesahovat 1/6 průměru u válcových vzorků a 1/6 délky strany u čtvercových vzorků. Vzorek musí být umístěn na střed stlačované desky pro stejnoměrné rozložení zatížení. Rychlost posunu horní tlačené desky by měla být taková, aby zkouška proběhla v době od 2 do 15 minut. Po zahájení zkoušky je odečítáno zatížení v předem daných intervalech deformace a je provedeno minimálně 15 čtení. Stlačování je zastaveno, pokud svislé přetvoření překročí 15% přetvoření zkušebního vzorku, nebo překročí o 5 % přetvoření na vrcholu deviátoru napětí.

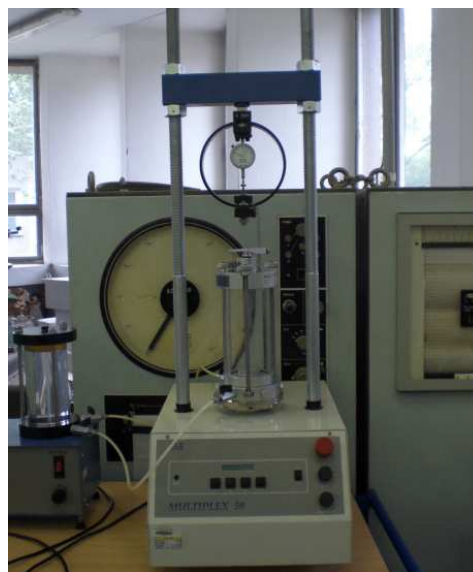


Obrázek 5-19: Příprava zkušebního vzorku [0]

Použité přístroje:

Váhy: KERN 600-2M
Sušárna: VENTICELL 111
odpařovací miska
ocelové pravítko
pěch o hmotnosti 2500 g
moždír o objemu 946,69 cm³
lopatky a lžíce
Zatěžovací přístroj Multiplex 50

Rozměry – 550 x 400 x 1230 mm
Max. světlá výška – 795 mm
Min. světlá výška – 210 mm
Hmotnost – 71 kg
Rychlost: 1,0; 1,27; 1,42; 4,0; 50,0 mm/min



Obrázek 5-20: Zatěžovací přístroj Multiplex 50 [0]

Výsledky zkoušky:

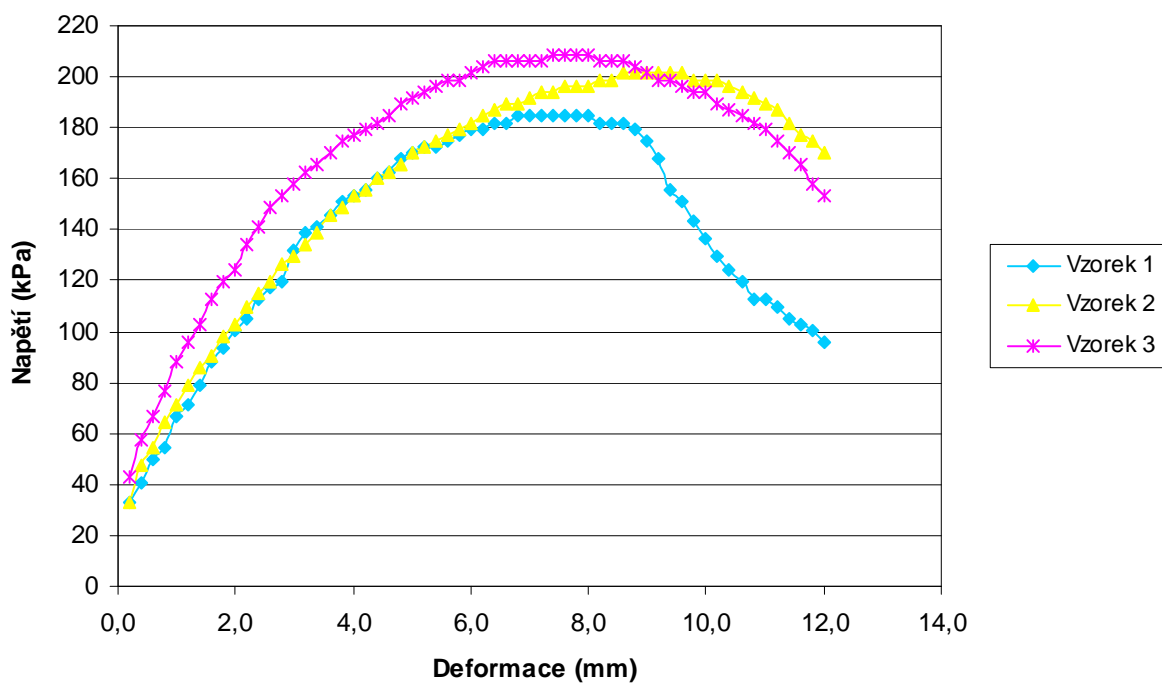
Posun (mm)	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
	GR (dílký)	σ (kPa)	GR (dílký)	σ (kPa)	GR (dílký)	σ (kPa)
0,2	6,0	33,17020	6,0	33,17020	10,0	42,77376
0,4	9,0	40,37287	12,0	47,57554	16,0	57,17910
0,6	13,0	49,97643	15,0	54,77821	20,0	66,78265
0,8	15,0	54,77821	19,0	64,38176	24,0	76,38621
1,0	20,0	66,78265	22,0	71,58443	29,0	88,39066
1,2	22,0	71,58443	25,0	78,78710	32,0	95,59332
1,4	25,0	78,78710	28,0	85,98977	35,0	102,79599
1,6	29,0	88,39066	30,0	90,79154	39,0	112,39955
1,8	31,0	93,19243	33,0	97,99421	42,0	119,60221
2,0	34,0	100,39510	35,0	102,79599	44,0	124,40399
2,2	36,0	105,19688	38,0	109,99866	48,0	134,00755
2,4	39,0	112,39955	40,0	114,80044	51,0	141,21022
2,6	41,0	117,20133	42,0	119,60221	54,0	148,41288
2,8	42,0	119,60221	45,0	126,80488	56,0	153,21466
3,0	47,0	131,60666	46,0	129,20577	58,0	158,01644
3,2	50,0	138,80933	48,0	134,00755	60,0	162,81822
3,4	51,0	141,21022	50,0	138,80933	61,0	165,21911
3,6	53,0	146,01200	53,0	146,01200	63,0	170,02089
3,8	55,0	150,81377	54,0	148,41288	65,0	174,82267
4,0	56,0	153,21466	56,0	153,21466	66,0	177,22355
4,2	57,0	155,61555	57,0	155,61555	67,0	179,62444
4,4	59,0	160,41733	59,0	160,41733	68,0	182,02533
4,6	60,0	162,81822	60,0	162,81822	69,0	184,42622
4,8	62,0	167,62000	61,0	165,21911	71,0	189,22800
5,0	63,0	170,02089	63,0	170,02089	72,0	191,62889

Posun (mm)	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
	GR (dílký)	σ (kPa)	GR (dílký)	σ (kPa)	GR (dílký)	σ (kPa)
5,2	64,0	172,42178	64,0	172,42178	73,0	194,02978
5,4	64,0	172,42178	65,0	174,82267	74,0	196,43067
5,6	65,0	174,82267	66,0	177,22355	75,0	198,83156
5,8	66,0	177,22355	67,0	179,62444	75,0	198,83156
6,0	67,0	179,62444	68,0	182,02533	76,0	201,23245
6,2	67,0	179,62444	69,0	184,42622	77,0	203,63334
6,4	68,0	182,02533	70,0	186,82711	78,0	206,03422
6,6	68,0	182,02533	71,0	189,22800	78,0	206,03422
6,8	69,0	184,42622	71,0	189,22800	78,0	206,03422
7,0	69,0	184,42622	72,0	191,62889	78,0	206,03422
7,2	69,0	184,42622	73,0	194,02978	78,0	206,03422
7,4	69,0	184,42622	73,0	194,02978	79,0	208,43511
7,6	69,0	184,42622	74,0	196,43067	79,0	208,43511
7,8	69,0	184,42622	74,0	196,43067	79,0	208,43511
8,0	69,0	184,42622	74,0	196,43067	79,0	208,43511
8,2	68,0	182,02533	75,0	198,83156	78,0	206,03422
8,4	68,0	182,02533	75,0	198,83156	78,0	206,03422
8,6	68,0	182,02533	76,0	201,23245	78,0	206,03422
8,8	67,0	179,62444	76,0	201,23245	77,0	203,63334
9,0	65,0	174,82267	76,0	201,23245	76,0	201,23245
9,2	62,0	167,62000	76,0	201,23245	75,0	198,83156
9,4	57,0	155,61555	76,0	201,23245	75,0	198,83156
9,6	55,0	150,81377	76,0	201,23245	74,0	196,43067
9,8	52,0	143,61111	75,0	198,83156	73,0	194,02978
10,0	49,0	136,40844	75,0	198,83156	73,0	194,02978
10,2	46,0	129,20577	75,0	198,83156	71,0	189,22800
10,4	44,0	124,40399	74,0	196,43067	70,0	186,82711
10,6	42,0	119,60221	73,0	194,02978	69,0	184,42622
10,8	39,0	112,39955	72,0	191,62889	68,0	182,02533
11,0	39,0	112,39955	71,0	189,22800	67,0	179,62444
11,2	38,0	109,99866	70,0	186,82711	65,0	174,82267
11,4	36,0	105,19688	68,0	182,02533	63,0	170,02089
11,6	35,0	102,79599	66,0	177,22355	61,0	165,21911
11,8	34,0	100,39510	65,0	174,82267	58,0	158,01644
12,0	32,0	95,59332	63,0	170,02089	56,0	153,21466

Tabulka 5-18: Naměřená a vypočtená data pro stanovení napětí [0]

Zjištěné hodnoty napětí jsou uvedeny v tabulce 5-18. Dosažené nejvyšší napětí je barevně vyznačeno. Získaná data byla zobrazena v níže uvedeném grafu 5-21.

Velikost napětí v závislosti na deformaci



Obrázek 5-21: Graf velikosti napětí v závislosti na deformaci [0]

6. Zlepšení zeminy vybraným pojivem

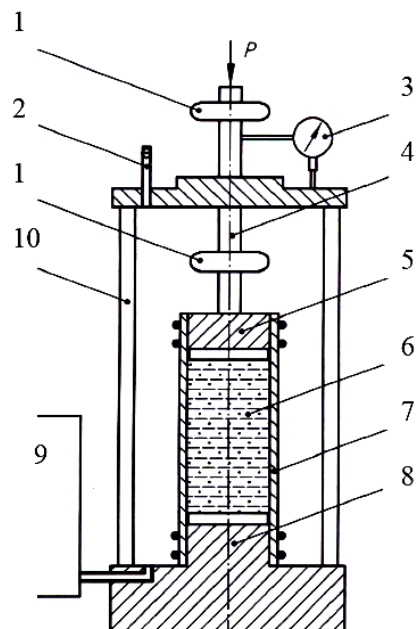
V předcházející kapitole jsme se zabývali určením základních mechanicko-fyzikálních vlastností dané zeminy. V této kapitole přidáme do zeminy určitý druh pojiva v různém hmotnostním množství. Poté bude provedena zkouška pevnosti zkušebních vzorků v triaxiálním přístroji. Výsledky budou vyneseny v napěto-deformačním grafu a zobrazeny pomocí Mohrových kružnic, které jsou nejpoužívanějším prostředkem pro zobrazení napjatosti v bodě.

6.1. Zkoušky vzorků v triaxiální přístroji

Zkoušky v triaxiálním přístroji rozdělujeme na zkoušky pravé ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), kdy je zkušební vzorek stlačován ve třech různých směrech, a na nepravé ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{komorové}}$), které se používají častěji, kdy je zkušební vzorek zatížen stejným zatížením. Princip nepravé zkoušky spočívá ve vyvození komorového tlaku a postupnému zvyšování svislého zatížení až do stavu porušení zkušebního vzorku. Výhodou používání triaxiálního přístroje od jednoosého je ten, že nepředurčuje plochu porušení vzorku a pomocí toho získáme plochu, ve které má materiál nejmenší pevnost. Na následujícím obrázku je uveden schématický náčrt triaxiálního přístroje:

Legenda

- 1 možná pozice měřidla zatížení
- 2 vypouštění vzduchu
- 3 zařízení pro měření osového stlačení
- 4 píst
- 5 zatěžovací hlava vzorku
- 6 zkušební vzorek
- 7 gumová membrána
- 8 podstavec
- 9 zařízení pro měření a řízení pórového tlaku
- 10 plášť triaxiální komory
- P osové zatížení



Obrázek 6-1: Základní schéma triaxiálního přístroje [19]

Zkoušky ve standardním triaxiálním přístroji rozdělujeme do dvou fází. V první fázi je zkušební vzorek všesměrně zatížen a ve druhé fázi nastává stlačování vzorku svislou silou tzv. deviátorem napětí σ_1 - σ_3 , který obdržíme po vydělení síly průřezovou plochou. Tento typ zkoušek se nazývá triaxiální zkouškou stlačitelnosti. Typy zkoušek jsou uvedeny v tabulce 6-1.

Podmínky konsolidace	Podmínky smýkání		
	Zkušební vzorek neodvodněný		Zkušební vzorek odvodněný
	bez měření pórového tlaku	s měřením pórového tlaku	
bez konsolidace	UU	---	---
konsolidace izotropní	CIU	CIP	CID
konsolidace anizotropní	CAU	CAP	CAD

Tabulka 6-1: Standardní triaxiálové zkoušky [20]

Pro laboratorní stanovení deviátoru napětí, byla použita zkouška typu UU (nekonsolidovaná neodvodněná zkouška). Při této zkoušce se používají nepropustné destičky a vzorek je dále oddělen nepropustnou elastickou membránou od svého okolí. Triaxiální komora musí být schopná udržet tlak bez významnější ztráty pomocné kapaliny. Po napuštění pomocné kapaliny do komory je navozen komorový tlak (σ_3). Po ustálení komorového tlaku cca 10 minut, je zahájeno zatížení. Zatížení probíhá takovou rychlostí, aby svislá deformace nepřekročila 0,5 % až 2,0 % původní výšky vzorku za minutu. U zkoušky musí být sledováno a zaznamenáno osově zatížení, osově stlačení a totální komorový tlak. Zjištěné hodnoty musí být zaznamenány v takových intervalech, aby bylo možné vynést závislost napětí na přetvoření. Zkouška je zastavena pokud osově přetvoření dosáhne 15 %, nebo překročí o 5 % přetvoření na vrcholu deviátoru napětí. Použité přístroje jsou shodné jako u zkoušky pro stanovení normálového napětí, s tím rozdílem, že do zkušební komory navodíme komorový tlak. Pro laboratorní zkoušky byl použit komorový tlak o hodnotách: 200, 400, 600 kPa.

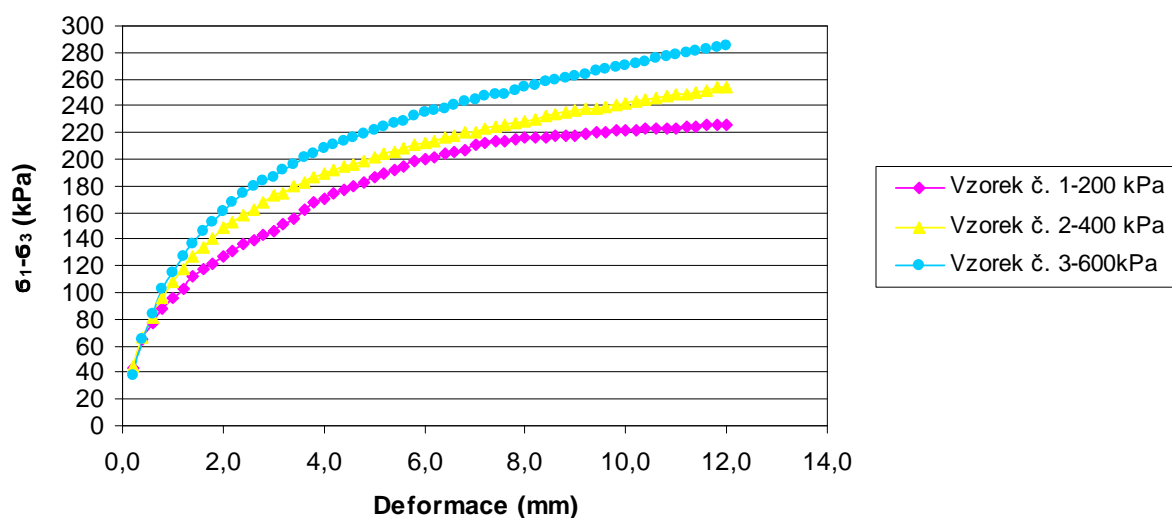
Výsledky zkoušky:

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0,2	10,0	42,77376	11,0	45,17465	8,0	37,97198
0,4	19,0	64,38176	20,0	66,78265	19,0	64,38176
0,6	24,0	76,38621	26,0	81,18799	27,0	83,58888
0,8	29,0	88,39066	32,0	95,59332	35,0	102,79599
1,0	32,0	95,59332	37,0	107,59777	40,0	114,80044
1,2	35,0	102,79599	41,0	117,20133	45,0	126,80488
1,4	39,0	112,39955	45,0	126,80488	49,0	136,40844
1,6	41,0	117,20133	48,0	134,00755	53,0	146,01200
1,8	43,0	122,00310	51,0	141,21022	56,0	153,21466
2,0	45,0	126,80488	54,0	148,41288	59,0	160,41733
2,2	47,0	131,60666	56,0	153,21466	62,0	167,62000
2,4	49,0	136,40844	58,0	158,01644	65,0	174,82267
2,6	50,0	138,80933	60,0	162,81822	67,0	179,62444
2,8	52,0	143,61111	62,0	167,62000	69,0	184,42622
3,0	53,0	146,01200	64,0	172,42178	70,0	186,82711
3,2	55,0	150,81377	65,0	174,82267	72,0	191,62889
3,4	57,0	155,61555	67,0	179,62444	74,0	196,43067
3,6	60,0	162,81822	68,0	182,02533	76,0	201,23245
3,8	62,0	167,62000	70,0	186,82711	77,0	203,63334
4,0	63,0	170,02089	71,0	189,22800	79,0	208,43511
4,2	65,0	174,82267	72,0	191,62889	80,0	210,83600
4,4	66,0	177,22355	73,0	194,02978	81,0	213,23689
4,6	67,0	179,62444	74,0	196,43067	82,0	215,63778
4,8	68,0	182,02533	75,0	198,83156	83,5	219,23912
5,0	70,0	186,82711	76,0	201,23245	84,5	221,64000
5,2	71,0	189,22800	77,0	203,63334	85,5	224,04089
5,4	72,0	191,62889	78,0	206,03422	86,5	226,44178
5,6	73,0	194,02978	79,0	208,43511	87,5	228,84267
5,8	75,0	198,83156	80,0	210,83600	89,0	232,44401
6,0	75,5	200,03200	80,5	212,03645	90,0	234,84489
6,2	76,0	201,23245	81,0	213,23689	90,5	236,04534
6,4	77,0	203,63334	82,0	215,63778	91,5	238,44623
6,6	78,0	206,03422	83,0	218,03867	92,5	240,84712
6,8	78,5	207,23467	84,0	220,43956	93,5	243,24801
7,0	80,0	210,83600	84,0	220,43956	94,0	244,44845
7,2	80,5	212,03645	85,0	222,84045	95,0	246,84934
7,4	81,0	213,23689	85,5	224,04089	95,5	248,04979
7,6	81,0	213,23689	86,0	225,24134	96,0	249,25023
7,8	81,5	214,43734	87,0	227,64223	97,0	251,65112
8,0	82,0	215,63778	87,5	228,84267	98,0	254,05201

	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
Posun (mm)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
8,2	82,0	215,63778	88,0	230,04312	98,5	255,25245
8,4	82,5	216,83823	89,0	232,44401	99,5	257,65334
8,6	83,0	218,03867	89,5	233,64445	100,0	258,85379
8,8	83,0	218,03867	90,0	234,84489	101,0	261,25468
9,0	83,0	218,03867	90,5	236,04534	101,5	262,45512
9,2	83,5	219,23912	91,0	237,24578	102,0	263,65556
9,4	84,0	220,43956	91,5	238,44623	103,0	266,05645
9,6	84,0	220,43956	92,0	239,64667	103,5	267,25690
9,8	84,5	221,64000	92,5	240,84712	104,0	268,45734
10,0	84,5	221,64000	93,0	242,04756	105,0	270,85823
10,2	84,5	221,64000	93,5	243,24801	105,5	272,05868
10,4	85,0	222,84045	94,0	244,44845	106,0	273,25912
10,6	85,0	222,84045	94,5	245,64890	107,0	275,66001
10,8	85,0	222,84045	95,0	246,84934	107,5	276,86046
11,0	85,0	222,84045	95,5	248,04979	108,0	278,06090
11,2	85,5	224,04089	96,0	249,25023	108,5	279,26134
11,4	85,5	224,04089	96,5	250,45067	109,0	280,46179
11,6	86,0	225,24134	97,0	251,65112	110,0	282,86268
11,8	86,0	225,24134	98,0	254,05201	110,5	284,06312
12,0	86,0	225,24134	98,0	254,05201	111,0	285,26357

Tabulka 6-2: Původní zemina při vlhkosti $w = 19,64\%$ [0]

Zemina bez zlepšení



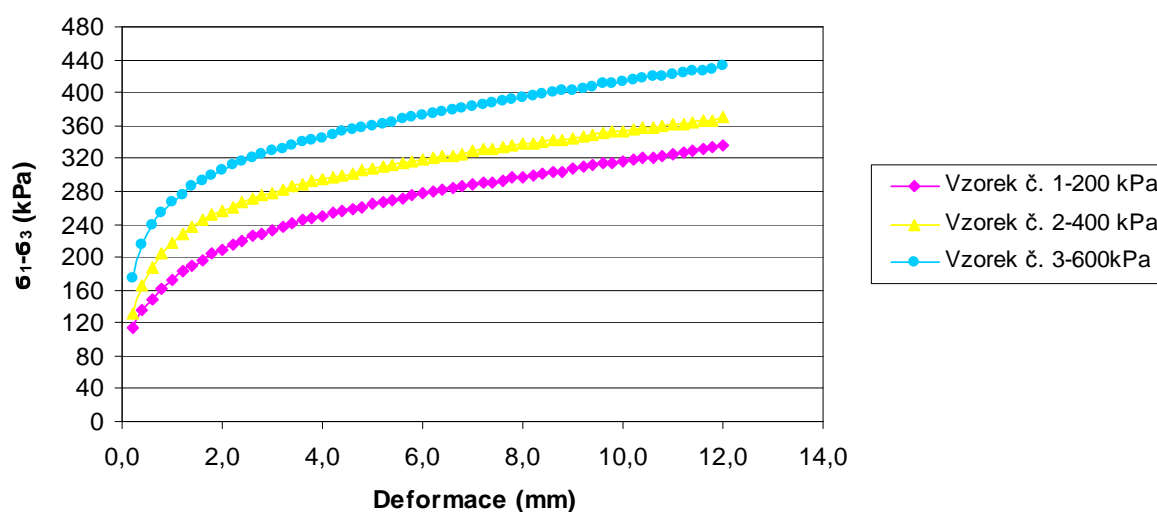
Obrázek 6-2: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina bez zlepšení [0]

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0,2	40,0	114,80044	47,0	131,60666	65,0	174,82267
0,4	49,0	136,40844	61,0	165,21911	82,0	215,63778
0,6	54,0	148,41288	70,0	186,82711	92,0	239,64667
0,8	59,0	160,41733	77,0	203,63334	98,0	254,05201
1,0	64,0	172,42178	83,0	218,03867	103,0	266,05645
1,2	68,0	182,02533	87,0	227,64223	107,0	275,66001
1,4	71,0	189,22800	91,0	237,24578	111,0	285,26357
1,6	74,0	196,43067	94,0	244,44845	114,0	292,46623
1,8	77,0	203,63334	97,0	251,65112	117,0	299,66890
2,0	79,0	208,43511	99,0	256,45290	119,5	305,67113
2,2	82,0	215,63778	101,0	261,25468	122,0	311,67335
2,4	84,0	220,43956	103,0	266,05645	124,0	316,47513
2,6	86,0	225,24134	105,0	270,85823	125,5	320,07646
2,8	87,5	228,84267	107,0	275,66001	127,5	324,87824
3,0	89,0	232,44401	108,0	278,06090	129,0	328,47957
3,2	91,0	237,24578	110,0	282,86268	130,5	332,08091
3,4	92,5	240,84712	111,0	285,26357	132,0	335,68224
3,6	94,0	244,44845	112,0	287,66446	133,5	339,28357
3,8	95,5	248,04979	114,0	292,46623	135,0	342,88491
4,0	96,5	250,45067	115,0	294,86712	136,0	345,28580
4,2	98,0	254,05201	116,0	297,26801	137,5	348,88713
4,4	99,0	256,45290	117,0	299,66890	139,0	352,48846
4,6	100,0	258,85379	118,0	302,06979	140,0	354,88935
4,8	101,0	261,25468	119,5	305,67113	141,0	357,29024
5,0	102,5	264,85601	120,5	308,07201	142,0	359,69113
5,2	103,5	267,25690	121,5	310,47290	143,0	362,09202
5,4	104,5	269,65779	122,0	311,67335	144,0	364,49291
5,6	105,5	272,05868	123,0	314,07424	145,5	368,09424
5,8	106,5	274,45957	124,0	316,47513	146,0	369,29469
6,0	108,0	278,06090	125,0	318,87602	147,0	371,69558
6,2	109,0	280,46179	126,0	321,27691	148,0	374,09647
6,4	109,5	281,66223	126,5	322,47735	149,0	376,49736
6,6	110,5	284,06312	127,0	323,67779	150,0	378,89825
6,8	111,0	285,26357	128,0	326,07868	151,0	381,29913
7,0	112,0	287,66446	129,0	328,47957	152,0	383,70002
7,2	113,0	290,06535	130,0	330,88046	152,5	384,90047
7,4	113,5	291,26579	130,5	332,08091	153,5	387,30136
7,6	114,5	293,66668	131,0	333,28135	154,5	389,70225
7,8	115,5	296,06757	132,0	335,68224	155,0	390,90269
8,0	116,0	297,26801	132,5	336,88268	156,0	393,30358
8,2	117,0	299,66890	133,0	338,08313	157,0	395,70447

	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
Posun (mm)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
8,4	118,0	302,06979	134,0	340,48402	158,0	398,10536
8,6	118,5	303,27024	134,5	341,68446	158,5	399,30580
8,8	119,0	304,47068	135,0	342,88491	159,5	401,70669
9,0	120,0	306,87157	136,0	345,28580	160,0	402,90714
9,2	121,0	309,27246	136,5	346,48624	161,0	405,30803
9,4	122,0	311,67335	137,0	347,68669	162,0	407,70892
9,6	123,0	314,07424	138,0	350,08758	163,0	410,10980
9,8	123,5	315,27468	139,0	352,48846	163,5	411,31025
10,0	124,0	316,47513	139,5	353,68891	164,0	412,51069
10,2	125,0	318,87602	140,0	354,88935	165,0	414,91158
10,4	125,5	320,07646	141,0	357,29024	166,0	417,31247
10,6	126,0	321,27691	141,0	357,29024	167,0	419,71336
10,8	127,0	323,67779	142,0	359,69113	167,0	419,71336
11,0	128,0	326,07868	142,5	360,89158	168,0	422,11425
11,2	128,5	327,27913	143,0	362,09202	169,0	424,51514
11,4	129,5	329,68002	143,5	363,29247	169,5	425,71558
11,6	130,5	332,08091	144,5	365,69335	170,0	426,91603
11,8	131,0	333,28135	145,0	366,89380	171,0	429,31692
12,0	132,0	335,68224	146,0	369,29469	172,0	431,71781

Tabulka 6-3: Zemina zlepšená 3% vápenného hydrátu při vlhkosti $w = 22,56\%$ [0]

Zemina + 3 % vápna

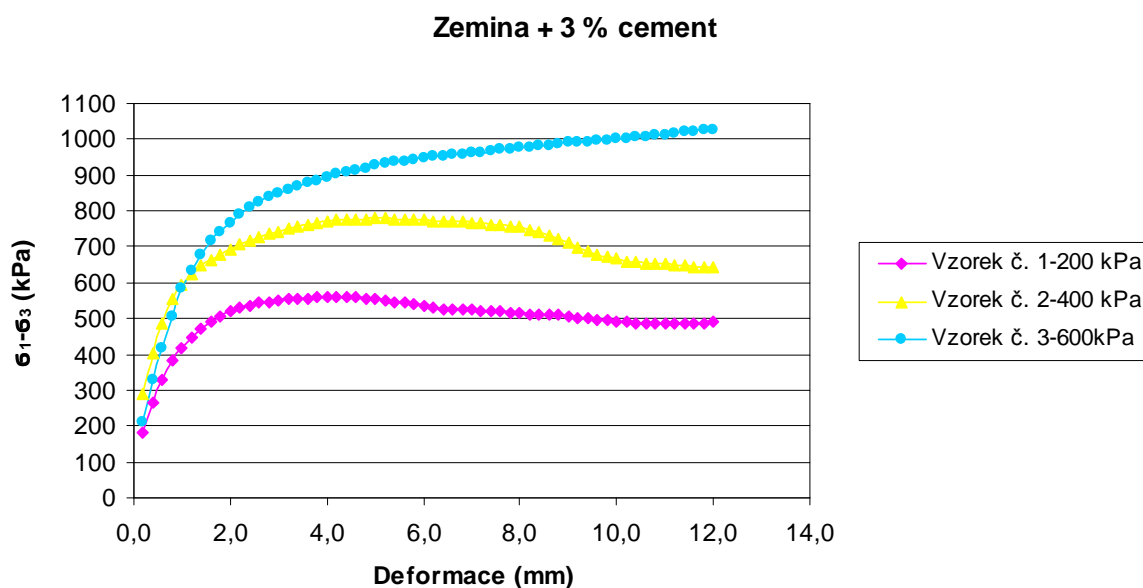


Obrázek 6-3: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 3% vápenného hydrátu [0]

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0,2	67,0	179,62444	112,0	287,66446	80,0	210,83600
0,4	102,0	263,65556	160,0	402,90714	130,0	330,88046
0,6	130,0	330,88046	195,0	486,93826	166,0	417,31247
0,8	151,0	381,29913	223,0	554,16315	202,0	503,74448
1,0	167,0	419,71336	240,0	594,97827	235,0	582,97382
1,2	178,0	446,12314	252,0	623,78894	256,0	633,39250
1,4	188,0	470,13203	262,0	647,79783	274,0	676,60850
1,6	196,0	489,33915	269,0	664,60406	290,0	715,02273
1,8	203,0	506,14537	275,0	679,00939	302,0	743,83340
2,0	208,0	518,14982	281,0	693,41473	312,0	767,84229
2,2	213,0	530,15426	286,0	705,41917	321,0	789,45029
2,4	216,0	537,35693	291,0	717,42362	329,0	808,65741
2,6	219,0	544,55960	295,0	727,02717	335,0	823,06274
2,8	220,0	546,96049	299,0	736,63073	341,0	837,46808
3,0	221,5	550,56182	302,0	743,83340	346,0	849,47252
3,2	222,5	552,96271	305,0	751,03607	350,0	859,07608
3,4	223,0	554,16315	308,0	758,23873	354,0	868,67964
3,6	224,0	556,56404	310,0	763,04051	358,0	878,28319
3,8	224,5	557,76449	312,0	767,84229	361,0	885,48586
4,0	225,0	558,96493	314,0	772,64407	364,5	893,88897
4,2	225,0	558,96493	315,0	775,04496	368,0	902,29208
4,4	225,0	558,96493	316,0	777,44585	371,0	909,49475
4,6	225,0	558,96493	316,0	777,44585	373,0	914,29653
4,8	224,0	556,56404	316,0	777,44585	375,5	920,29875
5,0	223,0	554,16315	317,0	779,84674	378,0	926,30098
5,2	222,0	551,76227	317,0	779,84674	380,0	931,10275
5,4	220,0	546,96049	316,0	777,44585	382,0	935,90453
5,6	219,0	544,55960	316,0	777,44585	383,5	939,50587
5,8	218,0	542,15871	315,0	775,04496	385,5	944,30764
6,0	215,0	534,95604	315,0	775,04496	387,0	947,90898
6,2	213,0	530,15426	314,0	772,64407	389,0	952,71076
6,4	212,0	527,75337	314,0	772,64407	390,0	955,11165
6,6	212,0	527,75337	313,0	770,24318	391,0	957,51254
6,8	212,0	527,75337	313,0	770,24318	392,0	959,91342
7,0	210,5	524,15204	312,0	767,84229	393,0	962,31431
7,2	210,0	522,95160	311,0	765,44140	394,0	964,71520
7,4	209,0	520,55071	310,0	763,04051	395,5	968,31654
7,6	208,0	518,14982	309,0	760,63962	397,0	971,91787
7,8	207,0	515,74893	308,0	758,23873	398,0	974,31876
8,0	206,0	513,34804	307,0	755,83784	399,0	976,71965
8,2	205,0	510,94715	304,0	748,63518	400,0	979,12054

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
8,4	205,0	510,94715	301,0	741,43251	401,0	981,52143
8,6	205,0	510,94715	296,0	729,42806	402,0	983,92232
8,8	204,0	508,54626	293,0	722,22540	403,0	986,32321
9,0	203,0	506,14537	288,0	710,22095	404,5	989,92454
9,2	201,0	501,34359	283,0	698,21650	405,0	991,12498
9,4	200,0	498,94270	279,0	688,61295	406,0	993,52587
9,6	199,0	496,54181	275,0	679,00939	407,0	995,92676
9,8	198,0	494,14093	272,0	671,80672	408,0	998,32765
10,0	197,0	491,74004	270,0	667,00495	409,0	1000,72854
10,2	196,0	489,33915	267,0	659,80228	410,0	1003,12943
10,4	195,0	486,93826	266,0	657,40139	411,0	1005,53032
10,6	195,0	486,93826	265,0	655,00050	412,0	1007,93121
10,8	195,0	486,93826	265,0	655,00050	413,0	1010,33210
11,0	195,0	486,93826	265,0	655,00050	414,5	1013,93343
11,2	195,0	486,93826	263,0	650,19872	415,5	1016,33432
11,4	195,0	486,93826	262,0	647,79783	417,0	1019,93565
11,6	195,0	486,93826	261,0	645,39694	418,0	1022,33654
11,8	195,0	486,93826	260,5	644,19650	419,0	1024,73743
12,0	196,0	489,33915	260,0	642,99605	420,0	1027,13832

Tabulka 6-4: Zemina zlepšená 3% portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $w = 22,60\%$ [0]



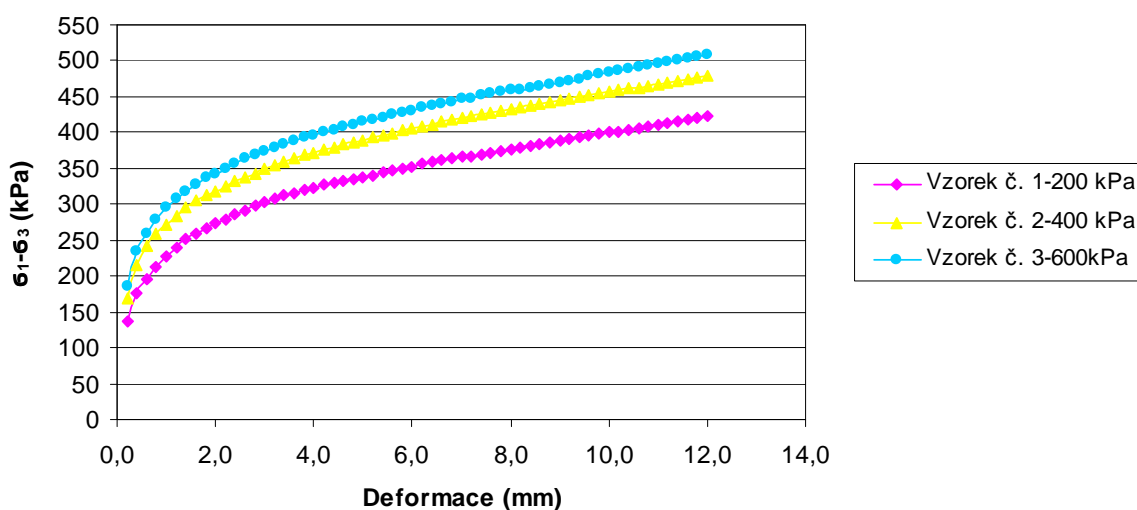
Obrázek 6-4: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 3% portlandského cementu C32,5 [0]

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0,2	49,0	136,40844	62,0	167,62000	70,0	186,82711
0,4	65,0	174,82267	82,0	215,63778	90,0	234,84489
0,6	74,0	196,43067	93,0	242,04756	100,0	258,85379
0,8	81,0	213,23689	100,0	258,85379	108,0	278,06090
1,0	87,0	227,64223	105,0	270,85823	115,0	294,86712
1,2	92,0	239,64667	110,0	282,86268	120,0	306,87157
1,4	97,0	251,65112	115,0	294,86712	125,0	318,87602
1,6	100,0	258,85379	119,0	304,47068	129,0	328,47957
1,8	103,0	266,05645	122,0	311,67335	132,5	336,88268
2,0	106,0	273,25912	125,0	318,87602	135,0	342,88491
2,2	108,5	279,26134	128,0	326,07868	138,0	350,08758
2,4	111,0	285,26357	130,5	332,08091	141,0	357,29024
2,6	113,5	291,26579	133,0	338,08313	143,5	363,29247
2,8	116,0	297,26801	135,0	342,88491	146,0	369,29469
3,0	118,0	302,06979	138,0	350,08758	148,0	374,09647
3,2	120,0	306,87157	140,0	354,88935	150,0	378,89825
3,4	122,0	311,67335	142,0	359,69113	152,0	383,70002
3,6	124,0	316,47513	144,0	364,49291	154,0	388,50180
3,8	125,5	320,07646	146,0	369,29469	156,0	393,30358
4,0	127,0	323,67779	147,0	371,69558	157,5	396,90491
4,2	128,5	327,27913	149,0	376,49736	159,0	400,50625
4,4	130,0	330,88046	150,5	380,09869	160,5	404,10758
4,6	131,0	333,28135	152,0	383,70002	162,0	407,70892
4,8	132,0	335,68224	153,0	386,10091	163,5	411,31025
5,0	133,0	338,08313	154,5	389,70225	165,0	414,91158
5,2	134,0	340,48402	156,0	393,30358	166,0	417,31247
5,4	135,5	344,08535	157,0	395,70447	167,5	420,91381
5,6	137,0	347,68669	158,5	399,30580	169,0	424,51514
5,8	138,0	350,08758	160,0	402,90714	170,0	426,91603
6,0	139,0	352,48846	161,0	405,30803	171,5	430,51736
6,2	140,5	356,08980	162,0	407,70892	173,0	434,11870
6,4	141,5	358,49069	163,5	411,31025	174,0	436,51959
6,6	143,0	362,09202	165,0	414,91158	175,0	438,92047
6,8	144,0	364,49291	166,0	417,31247	176,5	442,52181
7,0	144,5	365,69335	167,0	419,71336	178,0	446,12314
7,2	145,0	366,89380	168,0	422,11425	179,0	448,52403
7,4	146,0	369,29469	169,0	424,51514	181,0	453,32581
7,6	147,0	371,69558	170,0	426,91603	182,0	455,72670
7,8	148,0	374,09647	171,0	429,31692	183,0	458,12759
8,0	149,0	376,49736	172,0	431,71781	183,5	459,32803
8,2	150,0	378,89825	173,5	435,31914	184,0	460,52848

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
8,4	151,0	381,29913	174,5	437,72003	185,0	462,92937
8,6	152,0	383,70002	175,5	440,12092	186,0	465,33026
8,8	153,0	386,10091	176,5	442,52181	187,0	467,73114
9,0	154,0	388,50180	177,5	444,92270	188,0	470,13203
9,2	155,5	392,10314	179,0	448,52403	189,0	472,53292
9,4	156,5	394,50402	180,0	450,92492	190,0	474,93381
9,6	157,0	395,70447	181,0	453,32581	192,0	479,73559
9,8	158,0	398,10536	181,5	454,52625	193,0	482,13648
10,0	159,0	400,50625	183,0	458,12759	193,5	483,33692
10,2	159,5	401,70669	183,5	459,32803	195,0	486,93826
10,4	160,0	402,90714	184,5	461,72892	196,0	489,33915
10,6	161,0	405,30803	185,0	462,92937	196,5	490,53959
10,8	162,5	408,90936	186,0	465,33026	197,5	492,94048
11,0	163,5	411,31025	187,0	467,73114	199,0	496,54181
11,2	164,5	413,71114	188,0	470,13203	200,0	498,94270
11,4	165,0	414,91158	189,0	472,53292	201,0	501,34359
11,6	166,0	417,31247	190,0	474,93381	202,0	503,74448
11,8	167,0	419,71336	191,0	477,33470	203,0	506,14537
12,0	168,0	422,11425	192,0	479,73559	204,0	508,54626

Tabulka 6-5: Zemina zlepšená 5% vápenného hydrátu při vlhkosti $w = 23,62\%$ [0]

Zemina + 5 % vápno

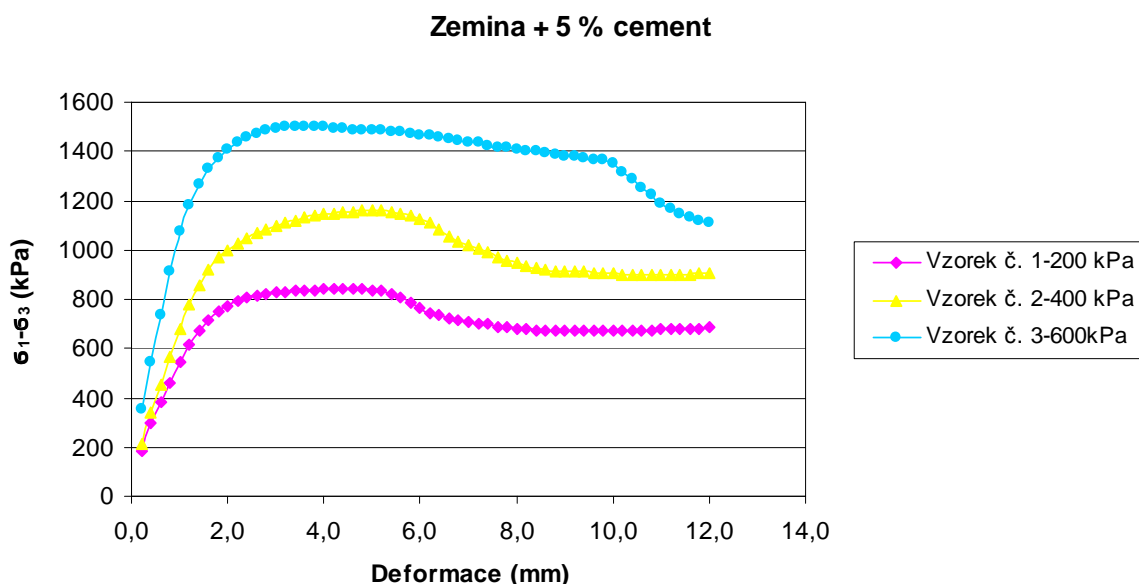


Obrázek 6-5: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 5% vápenného hydrátu [0]

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílký)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
0,2	70,0	186,82711	82,0	215,63778	140,0	354,88935
0,4	115,0	294,86712	134,0	340,48402	220,0	546,96049
0,6	150,0	378,89825	180,0	450,92492	298,0	734,22984
0,8	185,0	462,92937	228,0	566,16760	372,0	911,89564
1,0	220,0	546,96049	275,0	679,00939	439,0	1072,75522
1,2	249,0	616,58627	317,0	779,84674	486,0	1185,59701
1,4	272,0	671,80672	349,0	856,67519	520,0	1267,22724
1,6	291,0	717,42362	375,0	919,09831	546,0	1329,65036
1,8	305,0	751,03607	395,0	967,11609	565,0	1375,26725
2,0	314,0	772,64407	408,0	998,32765	578,0	1406,47881
2,2	322,0	791,85118	420,0	1027,13832	590,0	1435,28948
2,4	328,0	806,25652	429,0	1048,74632	599,0	1456,89748
2,6	332,0	815,86007	438,0	1070,35433	605,0	1471,30282
2,8	334,0	820,66185	444,0	1084,75966	610,0	1483,30726
3,0	336,0	825,46363	450,0	1099,16500	614,0	1492,91082
3,2	337,5	829,06496	455,0	1111,16944	616,0	1497,71260
3,4	340,0	835,06719	459,0	1120,77300	617,0	1500,11349
3,6	341,0	837,46808	463,0	1130,37656	617,0	1500,11349
3,8	341,5	838,66852	467,0	1139,98011	617,0	1500,11349
4,0	342,0	839,86897	470,0	1147,18278	616,0	1497,71260
4,2	342,0	839,86897	471,0	1149,58367	614,0	1492,91082
4,4	342,0	839,86897	473,0	1154,38545	613,0	1490,50993
4,6	342,0	839,86897	474,0	1156,78634	611,0	1485,70815
4,8	342,0	839,86897	474,5	1157,98678	611,0	1485,70815
5,0	341,0	837,46808	475,0	1159,18723	611,0	1485,70815
5,2	339,0	832,66630	475,0	1159,18723	611,0	1485,70815
5,4	334,0	820,66185	472,0	1151,98456	608,0	1478,50549
5,6	329,0	808,65741	470,0	1147,18278	608,0	1478,50549
5,8	319,0	784,64851	467,0	1139,98011	605,0	1471,30282
6,0	310,0	763,04051	462,0	1127,97567	603,0	1466,50104
6,2	303,0	746,23429	454,0	1108,76855	602,0	1464,10015
6,4	298,0	734,22984	442,0	1079,95788	599,0	1456,89748
6,6	294,0	724,62629	431,0	1053,54810	596,0	1449,69482
6,8	291,0	717,42362	422,0	1031,94010	593,0	1442,49215
7,0	287,0	707,82006	416,0	1017,53476	591,0	1437,69037
7,2	285,0	703,01828	412,0	1007,93121	590,0	1435,28948
7,4	283,0	698,21650	405,0	991,12498	585,0	1423,28503
7,6	279,0	688,61295	396,0	969,51698	582,0	1416,08237
7,8	277,0	683,81117	391,0	957,51254	581,0	1413,68148
8,0	275,0	679,00939	387,0	947,90898	578,0	1406,47881
8,2	274,0	676,60850	382,0	935,90453	576,0	1401,67703

Posun (mm)	Vzorek č. 1 – 200 kPa		Vzorek č. 2 – 400 kPa		Vzorek č. 3 – 600 kPa	
	GR (dílkky)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílkky)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	GR (dílkky)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
8,4	273,0	674,20761	379,0	928,70187	575,0	1399,27614
8,6	272,0	671,80672	376,0	921,49920	573,0	1394,47436
8,8	272,0	671,80672	374,0	916,69742	570,0	1387,27170
9,0	271,0	669,40583	374,0	916,69742	568,0	1382,46992
9,2	271,0	669,40583	373,0	914,29653	567,0	1380,06903
9,4	271,0	669,40583	372,0	911,89564	565,0	1375,26725
9,6	271,0	669,40583	371,0	909,49475	562,0	1368,06458
9,8	271,0	669,40583	370,0	907,09386	561,0	1365,66369
10,0	271,0	669,40583	368,5	903,49253	556,0	1353,65925
10,2	272,0	671,80672	368,0	902,29208	540,0	1315,24502
10,4	273,0	674,20761	368,0	902,29208	529,0	1288,83524
10,6	273,0	674,20761	368,0	902,29208	515,0	1255,22279
10,8	273,5	675,40806	368,0	902,29208	502,0	1224,01123
11,0	274,0	676,60850	368,0	902,29208	489,0	1192,79967
11,2	274,5	677,80895	368,0	902,29208	480,0	1171,19167
11,4	275,0	679,00939	368,0	902,29208	471,0	1149,58367
11,6	276,0	681,41028	368,0	902,29208	464,0	1132,77744
11,8	276,0	681,41028	369,0	904,69297	458,0	1118,37211
12,0	277,0	683,81117	369,0	904,69297	454,0	1108,76855

Tabulka 6-6: Zemina zlepšená 5% portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $w = 25,07\%$ [0]



Obrázek 6-6: Zobrazení závislosti deviatoru napětí na deformaci – zemina + 5% portlandského cementu C 32,5 [0]

Pro výpočet dávkování množství pojiva v kg na jednotku plochy (nejčastěji 1 m²), známe-li procentuální množství pojiva, lze určit následující vzorec:

$$m = \left(\frac{h * A * \rho_{d \max}}{100} \right) * p$$

m – hmotnost pojiva na jednotku plochy (kg)

h – mocnost upravované vrstvy (m)

A – plocha určená pro dávkování (m²)

$\rho_{d \max}$ – max. objemová hmotnost dle Proctor standard (kg/m³)

p – dávkování pojiva (%)

Z výše uvedených výsledků a grafického vyjádření vyplývá, že největší pevnost vykazuje zkušební vzorek zeminy s příměsí 5 % portlandského cementu C32,5, kdy $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 1500, 11 \text{ kPa}$. Jako doplňující materiál je uvedeno několik fotografií zkušebních vzorků, které v některých případech vystihují a zobrazují způsob porušení těchto vzorků.



Obrázek 6-7: Ukázka porušení zeminy – zemina bez zlepšení [0]



Obrázek 6-8: Ukázka porušení zeminy – zemina + 3 % vápenného hydrátu [0]



Obrázek 6-9: Ukázka porušení zeminy – zemina + 3 % portlandského cementu C32,5 [0]



Obrázek 6-10: Ukázka porušení zeminy – zemina + 5 % vápenného hydrátu [0]

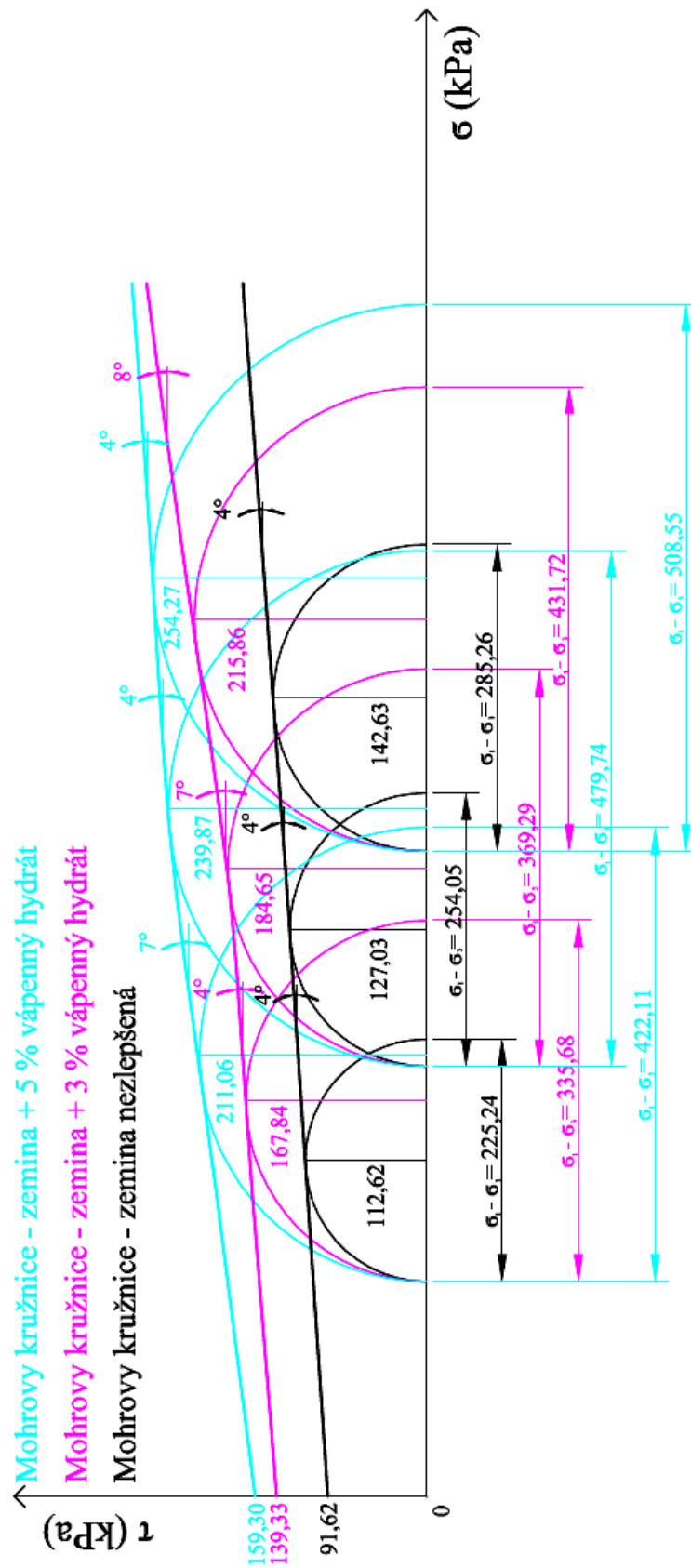


Obrázek 6-11: Ukázka porušení zeminy – zemina + 5 % portlandského cementu C32,5 [0]

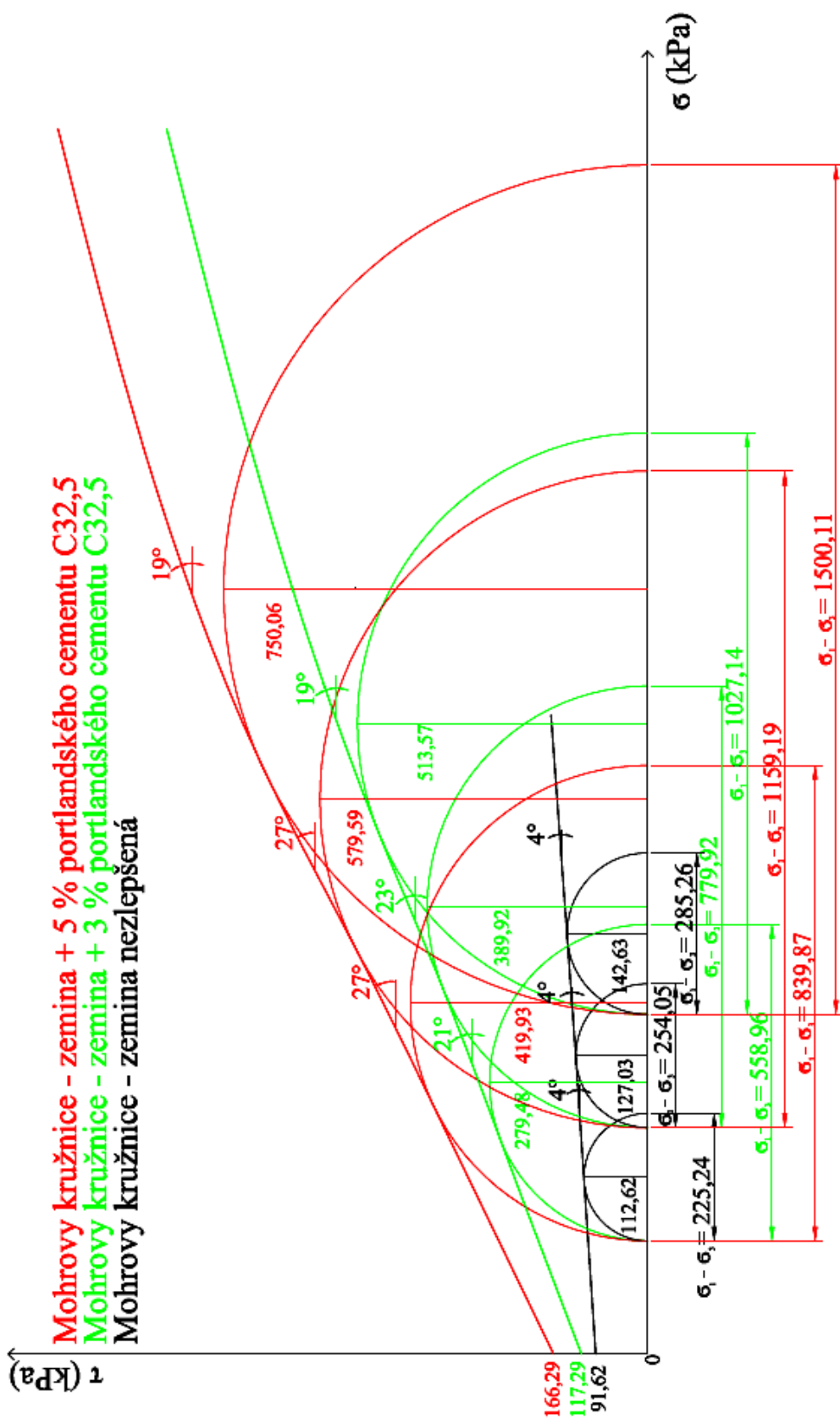
Stav napjatosti na mezi porušení znázorňují Mohrovy kružnice, které budou sestrojeny na základě výše dosažených výsledků. Z obalových křivek budou stanoveny totální parametry pevnosti zemin.

Zemina bez zlepšení při vlhkosti v=19,64 %							
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
1	86,0	0,2830	425,2413	200,0000	225,2413	312,6207	112,6207
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
2	98,0	0,3193	654,0520	400,0000	254,0520	527,0260	127,0260
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
3	111,0	0,3585	885,2636	600,0000	285,2636	742,6318	142,6318
Zemina + 3 % vápenného hydrátu při vlhkosti v=22,56 %							
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
1	132,0	0,4218	535,6822	200,0000	335,6822	367,8411	167,8411
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
2	146,0	0,4641	769,2947	400,0000	369,2947	584,6473	184,6473
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
3	172,0	0,5425	1031,7178	600,0000	431,7178	815,8589	215,8589
Zemina + 3 % portlandského cementu C32,5 při vlhkosti v=22,60 %							
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
1	225,0	0,7024	758,9649	200,0000	558,9649	479,4825	279,4825
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
2	317,0	0,9800	1179,8467	400,0000	779,8467	789,9234	389,9234
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
3	420,0	1,2907	1627,1383	600,0000	1027,1383	1113,5692	513,5692
Zemina + 5 % vápenného hydrátu při vlhkosti v=23,62 %							
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
1	168,0	0,5304	622,1143	200,0000	422,1143	411,0571	211,0571
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
2	192,0	0,6029	879,7356	400,0000	479,7356	639,8678	239,8678
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
3	204,0	0,6391	1108,5463	600,0000	508,5463	854,2731	254,2731
Zemina + 5 % portlandského cementu C32,5 při vlhkosti v=25,07 %							
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
1	342,0	1,0554	1039,8690	200,0000	839,8690	619,9345	419,9345
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
2	475,0	1,4567	1559,1872	400,0000	1159,1872	979,5936	579,5936
Vzorek č.	GR (dílký)	Pevnost v kN	σ_1	σ_3	$\sigma_1 - \sigma_3$	střed MK	poloměr MK
3	617,0	1,8851	2100,1135	600,0000	1500,1135	1350,0567	750,0567

Tabulka 6-7: Data pro sestavení Mohrových kružnic [0]



Obrázek 6-12: Mohrovy kružnice – porovnání nezlepšené zeminy s vápenným hydrátem 3 a 5 % [0]



Obrázek 6-13: Mohrovy kružnice – porovnání nezlepšené zeminy s portlandským cementem C32,5 3 a 5% [0]

Z výše uvedených grafů jsou patrné následující totální parametry pevnosti zemin:

Zemina bez zlepšení při vlhkosti $v=19,64\%$			
φ_u (°)			c_u (kPa)
200 kPa	400 kPa	600 kPa	91,62
4	4	4	
Zemina + 3 % vápenného hydrátu při vlhkosti $v=22,56\%$			
φ_u (°)			c_u (kPa)
200 kPa	400 kPa	600 kPa	139,33
4	7	8	
Zemina + 3 % portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $v=22,60\%$			
φ_u (°)			c_u (kPa)
200 kPa	400 kPa	600 kPa	117,29
21	23	19	
Zemina + 5 % vápenného hydrátu při vlhkosti $v=23,62\%$			
φ_u (°)			c_u (kPa)
200 kPa	400 kPa	600 kPa	159,30
7	4	4	
Zemina + 5 % portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $v=25,07\%$			
φ_u (°)			c_u (kPa)
200 kPa	400 kPa	600 kPa	166,29
27	27	19	

Tabulka 6-8: Zjištěné totální parametry pevnosti zemin [0]

Na závěr laboratorního testování byla provedena ještě jedna zkouška, kdy na válcových zkušebních vzorcích byly simulovány vlivy, které se mohou vyskytnout během stavby a v průběhu životnosti stavby. První část zkušebních vzorků (zemina bez zlepšení, zemina + 3 % vápenného hydrátu, zemina + 3 % portlandského cementu C32,5, zemina + 5 % vápenného hydrátu, zemina + 5 % portlandského cementu C32,5) byla ve stejných časových intervalech (24 h), vlhčena vodou pomocí rozprašovače (simulace deště). Druhá část zkušebních vzorků, o stejném složení a ve stejných časových intervalech (24 h), byla celá ponořena do nádoby s vodou (simulace zvýšení hladiny podzemní vody). Dále byly zkušební vzorky ponechány v přirozeném prostředí. Chování a reakce zkušebních válcových vzorků po 7 dnech je uvedena na následujících obrázcích, kdy první obrázek simuluje dešť a druhý zvýšenou hladinou podzemní vody.



Obrázek 6-14: Vzorky po 7 dnech – zemina bez zlepšení 1. – děšť, 2. – HPV [0]



Obrázek 6-15: Vzorky po 7 dnech – zemina + 3 % váp. hydrátu 1. – děšť, 2. – HPV [0]



Obrázek 6-16: Vzorky po 7 dnech – zemina + 3 % port. cementu 1. – děšť, 2. – HPV [0]



Obrázek 6-17: Vzorky po 7 dnech – zemina + 5 % váp. hydrátu 1. – děšť, 2. – HPV [0]



Obrázek 6-18: Vzorky po 7 dnech – zemina + 5 % port. cementu 1. – děšť, 2. – HPV [0]

7. Ekonomické zhodnocení

Ekonomická náročnost výstavby je velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje stavbu. Tento faktor by však neměl být rozhodujícím. O tom zda bude provedeno zlepšení, nebo bude provedena výměna zeminy z podkladních, či jiných vrstev by měli rozhodnout odborníci z daného oboru, na základě inženýrsko-geologických průzkumů.

Pro názorné porovnání ekonomické stránky určité fiktivní stavby budou sestaveny 3 rozpočty v programu KROS plus. Níže uvedené ceny jsou stanoveny na 1 m² při uvažované hloubce 0,5 m. První rozpočet se zabývá výměnou podkladních vrstev jinou vhodnější zemínou, druhý 3% vápennou úpravou původní zeminy a třetí 3% cementovou úpravou původní zeminy. Cena bude stanovena dle katalogu směrných cen stavebních prací ÚRS v cenové úrovni 2010.

ROZPOČET						
Stavba: Bakalářská práce				JKSO: 822 23		
Objekt: Výměna podloží				EČO: 01/2010		
Část				Zpracoval: Ondřej Pavelka		
Objednatel:				Datum: 26. 5. 2010		
Zhotovitel:						
P. Č.	Kód položky	Popis	MJ	Množství celkem	Cena jednotková	Cena celkem
1	2	3	4	5	6	7
HSV		Práce a dodávky HSV			673,98	
1		Zemní práce			563,48	
1	122302203	Odkopávky a prokopávky nezapažené pro silnice objemu do 5000 m ³ v hornině tř. 4	m ³	0,500	151,00	75,50
2	122302209	Příplatek k odkopávkám a prokopávkám pro silnice v hornině tř. 4 za lepivost	m ³	0,250	41,50	10,38
3	162701105	Vodorovné přemístění do 10000 m výkopku z horniny tř. 1 až 4	m ³	0,500	285,00	142,50
4	162701106	Vodorovné přemístění do 10000 m - dovoz vhodné zeminy	m ³	0,500	285,00	142,50
5	162701109	Příplatek k vodorovnému přemístění výkopku z horniny tř. 1 až 4 ZKD 1000 m přes 10000 m	m ³	2,500	21,60	54,00
6	162701110	Příplatek k vodorovnému přemístění ZKD 1000 m přes 10000 m - dovoz vhodné zeminy	m ³	2,500	21,60	54,00
7	167101102	Nakládání výkopku z hornin tř. 1 až 4 přes 100 m ³	m ³	0,500	63,50	31,75
8	171101103	Uložení sypaniny z hornin soudržných do násypů zhutněných do 100 % PS	m ³	0,500	65,10	32,55
9	171201201	Uložení sypaniny na skládky	m ³	0,500	17,20	8,60
10	181101102	Úprava pláně v zářezech v hornině tř. 1 až 4 se zhutněním	m ²	1,000	11,70	11,70
9		Ostatní konstrukce a práce-bourání			110,50	
11	979097115	Poplatek za skládku - ostatní zemina	t	0,850	130,00	110,50
Celkem					673,98	

Tabulka 7-1: Rozpočet 1. výměna podkladních vrstev [0]

ROZPOČET

Stavba: **Bakalářská práce**

Objekt: **Úprava zemin vápnem 3 %**

Část:

Objednatel:

Zhotovitel:

JKSO: 822 22

EČO: 02/2010

Zpracoval: Ondřej Pavelka

Datum: 26. 5. 2010

P. Č	Kód položky	Popis	MJ	Množství celkem	Cena jednotková	Cena celkem
1	2	3	4	5	6	7
HSV		Práce a dodávky HSV				242,55
1		Zemní práce				242,55
1	119001101	Úprava výkopku vlhčením	m3	0,100	85,40	8,54
2	119001202	Úprava zemin vápnem tl vrstvy 500 mm	m2	1,000	89,20	89,20
3	585346200	hydrát vápenný CL 90 velmi jemný VL	t	0,027	2 891,00	78,06
4	171101103	Uložení sypaniny z hornin soudržných do násypů zhutněných do 100 % PS	m3	0,500	65,10	32,55
5	181101102	Úprava pláně v zářezích v hornině tř. 1 až 4 se zhutněním	m2	1,000	11,70	11,70
6	185851112	Dovoz vody do vzdálenosti 6000 m	m3	0,100	225,00	22,50

Celkem

242,55

Tabulka 7-2: Rozpočet 2. Úprava zeminy 3 % vápenného hydrátu [0]

ROZPOČET

Stavba: **Bakalářská práce**

Objekt: **Úprava zemin cementem 3 %**

Část:

Objednatel:

Zhotovitel:

JKSO: 822 22

EČO: 03/2010

Zpracoval: Ondřej Pavelka

Datum: 26. 5. 2010

P. Č	Kód položky	Popis	MJ	Množství celkem	Cena jednotková	Cena celkem
1	2	3	4	5	6	7
HSV		Práce a dodávky HSV				230,61
1		Zemní práce				230,61
1	119001101	Úprava výkopku vlhčením	m3	0,100	85,40	8,54
2	119001208	Úprava zemin cementem tl vrstvy 500 mm	m2	1,000	89,20	89,20
3	585251300	cement silniční portlandský CEM I 32.5 (sc) VL	t	0,027	2 449,00	66,12
4	171101103	Uložení sypaniny z hornin soudržných do násypů zhutněných do 100 % PS	m3	0,500	65,10	32,55
5	181101102	Úprava pláně v zářezích v hornině tř. 1 až 4 se zhutněním	m2	1,000	11,70	11,70
6	185851112	Dovoz vody do vzdálenosti 6000 m	m3	0,100	225,00	22,50

Celkem

230,61

Tabulka 7-3: Rozpočet 3. Úprava zeminy 3 % portlandského cementu C32,5 [0]

Z výše uvedeného je zřejmé, že použití úpravy zeminy portlandským cementem C 32,5 je cenově nejvýhodnější (cca 231,- Kč/m²). Oproti tomu výměna podloží, by při uvažovaném provedení značně stavbu prodražila (cca 674,- Kč/m²). Ekonomická stránka je vždy ovlivněna vzdálenostmi subjektů, které souvisí s výstavbou.

8. Závěr

V této bakalářské práci byla snaha co nejlépe zpracovat téma, které se zabývá zlepšováním mechanicko-fyzikálních vlastností zemin pomocí hydraulických pojiv. Práce popisuje metody, které se v současnosti využívají ke zlepšování a úpravě zemin.

Byly provedeny laboratorní zkoušky na původní zemině a na zemině, která byla upravena přidáním vápenného hydrátu v množství 3 a 5 % a na zemině upravené portlandským cementem C 32,5 v množství 3 a 5 %.

Výpočty prokázaly zvýšení parametrů pevnosti, zejména u úpravy zemin portlandským cementem C 32,5, kdy byl nárůst pevnosti několikanásobně větší nežli u zeminy původní.

V praxi má stabilizace stále větší uplatnění, které je zapříčiněno rychlým technologickým postupem a jak jsme se mohli sami přesvědčit je stabilizace výhodná i z hlediska ekonomické stránky stavby.

Na závěr bych chtěl poděkovat doc. Ing. V. Doleželovi, CSc. za odborné poradenství, vedení a ochotnou spolupráci při zpracování této bakalářské práce.

Seznam použité literatura a informačních zdrojů:

VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 229 s. ISBN 80-01-01437-1.

ŠIMEK, Lubomír. *Geologie*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2000. 69 s. ISBN 80-7194-261-8.

ŠIMEK, Jiří, HOLOUŠOVÁ Taťána. *Zakládání staveb 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 160 s. ISBN 80-01-02303-6.

KRÁL, Josef. *Zpevňování málo vhodných zemin hydraulickými pojivy technologií kontinuálního mísení zemními frézami*. [online]. Dostupné z: <<http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/32.pdf>>.

HAUSER, Jaroslav. *Úprava málo vhodných a nevhodných zemin vápnem v tělese zemních konstrukcí*. [online]. Dostupné z: <http://www.zakladani.cz/casopis/archiv/3_01/casbody06.htm>.

ŠŤASTNÝ, Adolf. *Geotechnika; Praktické zkušenosti a poznatky při provádění úpravy zemin vápnem*. č. 2/2004, s. 13 – 14.

FEDA, Jaroslav. *Zakládání staveb 26. konference, Stabilizace zemin cementem*. Brno: Sborník příspěvků, 1998, s. 92 – 96.

SOTORNÍK, Jan. *Silnice-železnice, Zkušenosti s novými pojivy Doroport a Dorosol*. č. 2/2006, s. 36 – 37.

HORNÍČEK, Leoš a KREJČÍŘIKOVÁ, Hana. *Metodika použití recyklovaných a odpadních materiálů v konstrukčních vrstvách kolejových staveb*. 2005 [online]. Dostupné z: <http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/1uvt/2323.pdf>.

ZEDNÍK, Petr. *Geotechnika; Účinnost výztužných geosintetik a jejich limity*. č. 3/2007, s. 26 – 31.

HAUSER, Jaroslav. *Geotechnika; Zlepšování zemin za použití vápna při budování násypových těles*. č. 2/2004, s. 9– 12.

KRESTA, František. *Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP 94, Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2009.

Technické normy ČSN 72 1002. *Klasifikace zemin pro dopravní stavby*. 11/1993

Technické normy ČSN 73 6124-1. *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelěných hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody*. 3/2008

Technické listy Doroport a Dorosol firmy Holcim, a.s.

Technické normy ČSN EN ISO 14688-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis*. 6/2003

Technické normy ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 2: Zásady pro zařídování*. 7/2004

Technické normy ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelěné hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*. 10/2005

- [0] Autorské fotografie a tabulky pořízené v laboratoři dopravní infrastruktury, 2010.
- [1] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 229 s. ISBN 80-01-01437-1.
- [2] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 229 s. ISBN 80-01-01437-1.
- [3] Technické normy ČSN 72 1002. *Klasifikace zemin pro dopravní stavby*. 11/1993
- [4] ŠŤASTNÝ, Adolf. *Geotechnika; Praktické zkušenosti a poznatky při provádění úpravy zemin vápnem*. č. 2/2004, s. 13 – 14.
- [5] ZB Group, a.s. URL: <<http://www.zbg.cz/index.php?strana=s&iwd=111>>. [cit. 2010-04-14]
- [6] KRESTA, František. *Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP 94, Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2009.
- [7] *Technické listy Georoc Doroport, Holcim (Česko) a.s.*
- [8] *Technické listy Georoc Dorosol, Holcim (Česko) a.s.*
- [9] *Aplikační manuál geNETEX, JUTA, a.s.* URL: <http://www.juta.cz/Netex_manual.pdf>. [cit. 2010-04-17]
- [10] KRESTA, František. *Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP 94, Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2009.
- [11] KRESTA, František. *Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP 94, Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2009.
- [12] Cvičení číslo 1., *Stanovení základních fyzikálních vlastností zemin*, Geotechnika a zakládání staveb, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [13] Cvičení číslo 2., *Konzistenční meze – mez tekutosti, mez plasticity a mez mrštění*, Geotechnika a zakládání staveb, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [14] Technické normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení – laboratorní zkoušky zemin – část 12: Stanovení konzistenčních mezí*. 4/2005
- [15] Cvičení číslo 3., *Stanovení zrnitosti zemin*, Geotechnika a zakládání staveb, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [16] Technické normy ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – část 2: Zásady pro zařídování*. 3/2005
- [17] Technické normy ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – část 2: Zásady pro zařídování*. 3/2005
- [18] Technické normy ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – část 2: Zásady pro zařídování*. 3/2005
- [19] Cvičení., *Pevnost v triaxiálním tlaku*, Geotechnika a zakládání staveb, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [20] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 229 s. ISBN 80-01-01437-1.

Seznam použitých obrázků:

Obrázek 2-1: Trojfázové složení zeminy [1].....	10
Obrázek 2-2: Historie zatížení zeminy [2]	11
Obrázek 3-1: Mísení zeminy s hydraulickým pojivem [4].....	19
Obrázek 3-2: Mechanizace pro úpravu stabilizovaných vrstev [5]	21
Obrázek 3-3: Použití Dorosolu C xx v závislosti na vlhkosti zeminy [8]	24
Obrázek 3-4: Pokládka filtrační a separační geotextilie na zemní pláň [9].....	25
Obrázek 5-1: Digitální váhy typ KERN 600-2M [0]	30
Obrázek 5-2: Sušárna s nucenou recyklací vzduchu VENTICELL 111 [0]	31
Obrázek 5-3: Vysušené vzorky pro stanovení přirozené vlhkosti [0].....	31
Obrázek 5-4: Pyknometry v pískové lázni [0]	33
Obrázek 5-5: Konzistenční meze[13]	34
Obrázek 5-6: Penetrometr [0].....	35
Obrázek 5-7: Grafické znázornění meze tekutosti [0].....	36
Obrázek 5-8: Příprava válečků o průměru cca 6 mm [0]	36
Obrázek 5-9: Zkušební vzorky před vložením do sušárny VENTICELL 111 [0]	37
Obrázek 5-10: Sada sít a výsledky síťového rozboru [0]	40
Obrázek 5-11: Průběh hustoměrná zkoušky [0].....	41
Obrázek 5-12: Křivka zrnitosti [0].....	43
Obrázek 5-13: Zatřídění zeminy na základě křivky zrnitosti [0].....	46
Obrázek 5-14:Grafické určení zhutnitelnosti zemin [0].....	47
Obrázek 5-15: Průběh zkoušky stanovení zhutnitelnosti [0].....	48
Obrázek 5-16: Sestava pro stanovení zhutnitelnosti [0]	48
Obrázek 5-17: Grafické znázornění Proctorovy zkoušky [0].....	50
Obrázek 5-18: Kalibrační graf [0].....	51
Obrázek 5-19: Příprava zkušebního vzorku [0]	51
Obrázek 5-20: Zatěžovací přístroj Multiplex 50 [0]	52
Obrázek 5-21: Graf velikosti napětí v závislosti na deformaci [0]	54
Obrázek 6-1: Základní schéma triaxiálního přístroje [19].....	55
Obrázek 6-2: Zobrazení závislosti deviátoru nap. na def. – zemina bez zlepšení [0].....	58
Obrázek 6-3: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 3% vápenného hydrátu [0]	60
Obrázek 6-4: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 3% portlandského cementu C32,5 [0]	62
Obrázek 6-5: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 5% vápenného hydrátu [0]	64

<i>Obrázek 6-6: Zobrazení závislosti deviátoru napětí na deformaci – zemina + 5% portlandského cementu C 32,5 [0]</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 6-7: Ukázka porušení zeminy – zemina bez zlepšení [0]</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 6-8: Ukázka porušení zeminy – zemina + 3 % vápenného hydrátu [0].....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 6-9: Ukázka porušení zeminy – zemina + 3 % port. cementu C32,5 [0].....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 6-10: Ukázka porušení zeminy – zemina + 5 % vápenného hydrátu [0].....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 6-11: Ukázka porušení zeminy – zemina + 5 % port. cementu C32,5 [0].....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 6-12: Mohrovy kružnice – porovnání nezlepšené zeminy s vápenným hydrátem 3 a 5 % [0].....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 6-13: Mohrovy kružnice – porovnání nezlepšené zeminy s portlandským cementem C32,5 3 a 5% [0].....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 6-14: Vzorky po 7 dnech – zemina bez zlepšení 1. – déšť, 2. – HPV [0]</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 6-15: Vzorky po 7 dnech – zemina + 3 % váp. hydrátu 1. – déšť, 2. – HPV [0]</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 6-16: Vzorky po 7 dnech – zemina + 3 % port. cementu 1. – déšť, 2. – HPV [0]</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 6-17: Vzorky po 7 dnech – zemina + 5 % váp. hydrátu 1. – déšť, 2. – HPV [0]</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 6-18: Vzorky po 7 dnech – zemina + 5 % port. cementu 1. – déšť, 2. – HPV [0]</i>	<i>74</i>

Seznam použitých tabulek:

<i>Tabulka 3-1: Zatřídění zeminy dle vhodnosti pro podloží [3]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 3-2: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [6]</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 3-3: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [7]</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4-1: Požadované hodnoty únosnosti CBR a IBI pro upravované zeminy pro aktivní zónu [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4-2: Požadované hodnoty poměru únosnosti upravených zemin v násypu a podloží násypu [11].....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 5-1: Stanovení přirozené vlhkosti dané zeminy [0].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5-2: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic [0]</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5-3: Hustota vody při různých teplotách opravená o vztlak [12]</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5-4: Požadavky kuželové penetrace [14]</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5-5: Určení meze tekutosti [0].....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5-6: Určení meze plasticity [0]</i>	<i>37</i>

<i>Tabulka 5-7: Oprava hustoměru o teplotu [15]</i>	39
<i>Tabulka 5-8: Dynamická viskozita vody [0]</i>	40
<i>Tabulka 5-9: Stanovení hodnot d_i a K [0]</i>	41
<i>Tabulka 5-10: Rozdělení hmotnosti vzorku [0]</i>	41
<i>5-11: Síťový rozbor [0]</i>	41
<i>Tabulka 5-12: Průměr zrn v závislosti na hmotnosti [0]</i>	42
<i>Tabulka 5-13: Tvar křivky zrnitosti [16]</i>	45
<i>Tabulka 5-14: Zatřídování zemin s organickou složkou [17]</i>	45
<i>Tabulka 5-15: Index konzistence I_c prachů a jílu [18]</i>	45
<i>Tabulka 5-16: Stanovení objemové hmotnosti zeminy při určité vlhkosti [0]</i>	49
<i>Tabulka 5-17: Převod hodnot zatížení [0]</i>	51
<i>Tabulka 5-18: Naměřená a vypočtená data pro stanovení napětí [0]</i>	52
<i>Tabulka 6-1: Standardní triaxiálové zkoušky [20]</i>	56
<i>Tabulka 6-2: Původní zemina při vlhkosti $w = 19,64\%$ [0]</i>	57
<i>Tabulka 6-3: Zemina zlepšená 3% vápenného hydrátu při vlhkosti $w = 22,56\%$ [0]</i>	59
<i>Tabulka 6-4: Zemina zlepšená 3% portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $w = 22,60\%$ [0]</i>	61
<i>Tabulka 6-5: Zemina zlepšená 5% vápenného hydrátu při vlhkosti $w = 23,62\%$ [0]</i>	63
<i>Tabulka 6-6: Zemina zlepšená 5% portlandského cementu C32,5 při vlhkosti $w = 25,07\%$ [0]</i>	65
<i>Tabulka 6-7: Data pro sestrojení Mohrových kružnic [0]</i>	69
<i>Tabulka 6-8: Zjištěné totální parametry pevnosti zemin [0]</i>	72
<i>Tabulka 7-1: Rozpočet 1. výměna podkladních vrstev [0]</i>	75
<i>Tabulka 7-2: Rozpočet 2. Úprava zeminy 3 %vápenného hydrátu [0]</i>	76
<i>Tabulka 7-3: Rozpočet 3. Úprava zeminy 3 % portlandského cementu C32,5 [0]</i>	76