



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra železničních staveb

**Možnosti využití dynamického triaxiálního lisu  
pro analýzu pražcového podloží**

**Possibilities of using dynamic triaxial system  
for analysis of sleeper subsoil**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Bc. Jan Ludvík**

**Studijní program: Stavební inženýrství**

**Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Leoš Horníček, Ph.D.**

**Praha, 2021**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Ludvík Jméno: Jan Osobní číslo: 458969

Zadávající katedra: Katedra železničních staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Možnosti využití dynamického triaxiálního lisu pro analýzu pražcového podloží

Název diplomové práce anglicky: Possibilities of using dynamic triaxial system for analysis of sleeper subsoil

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce bude členěna do části teoretické a praktické. Teoretická část bude zaměřena na popis dynamického triaxiálního lisu Dynatriax v porovnání se statickými triaxiálními přístroji. Charakterizovány budou technické parametry dynamického triaxiálního lisu a pracovní režimy přístroje, včetně záznamu dat z měření a jejich vyhodnocení. Rešeršní část bude zaměřena na způsoby využití přístroje pro analýzu vrstev pražcového podloží, která bude podložena alespoň 10 zahraničními vědeckými články. Praktická část bude zaměřena na měření pružného chování zeminy v pražcovém podloží při cyklickém zatěžování podle ČSN EN 13286-7 a "resilient modulus" podle AASHTO T307.

Seznam doporučené literatury:

ČSN CEN ISO/TS 17892-8. Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 8: Stanovení pevnosti zemin nekonsolidovanou neodvodněnou triaxiální zkouškou.

ČSN CEN ISO/TS 17892-9. Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 9:

Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin.

ČSN EN 13286-7 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji

ASTM D5311 Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil

ASTM D3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus

AASHTO T307 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials

Předpis SŽDC S4 Železniční spodek, účinnost od 1. 10. 2008

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 25.9.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

29.9.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Možnosti využití dynamického triaxiálního lisu pro analýzu pražcového podloží** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

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

V Praze dne 3. 1. 2021

.....  
Jan Ludvík

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Leoši Horníčkoví, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce.

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ DYNAMICKÉHO TRIAXIÁLNÍHO  
LISU PRO ANALÝZU PRAŽCOVÉHO PODLOŽÍ**

**POSSIBILITIES OF USING DYNAMIC TRIAXIAL SYSTEM  
FOR ANALYSIS OF SLEEPER SUBSOIL**

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití dynamického triaxiálního přístroje při analýze vrstev pražcového podloží. Působením cyklického napětí v dynamickém triaxiálním přístroji se vyvodí zatížení, kterým působí projíždějící vlak na pražcové podloží. Práce je rozdělena do části teoretické, rešeršní a praktické. Teoretická část popisuje vlastnosti zemin, triaxiální zkoušky a zkušební zařízení. Rešeršní část je podložena zahraničními vědeckými články, které jsou zaměřeny na cyklické zatěžování vrstev pražcového podloží v dynamickém triaxiálním přístroji. Zkoumají se faktory, které ovlivňují výsledné přetváření během cyklického zatěžování. Cílem praktické části je měření pružného chování třech jemnozrnných zemin. Na zkušebních vzorcích proběhly cyklické zkoušky modulu pružnosti a resilient modulu. Měřené hodnoty se rovnají podílu mezi cyklickým napětím a pružným přetvořením. Postupy triaxiálních zkoušek a naměřené hodnoty byly porovnány. Zkoušené soudržné zeminy byly před zkoušením zatříděny a na závěr porušeny během zkoušky pevnosti v prostém tlaku.

## **Klíčová slova:**

Pražcové podloží, zemní pláň, modul pružnosti, resilient modulus, triaxiální zkouška, neodvodněná nekonsolidovaná, UU, konsolidovaná neodvodněná, CU, konsolidovaná odvodněná, CD, dynamický triaxiální přístroj, Dynatriax, pevnost v prostém tlaku

## **Summary**

The diploma thesis deals with possibilities of using dynamic triaxial system for analysis of sleeper subsoil. The effect of cyclic stress in the dynamic triaxial system makes load, that passing train effects on the sleeper subsoil. The work is divided into theoretical, research and practical part. The theoretical part describes soils, triaxial compression tests and systems. The research part is based on foreign scientific articles, which are focused on cyclic loading of sleeper subsoil layers in the dynamic triaxial system. Factors that influence the resulting deformation during cyclic loading are investigated. The objective of the practical part is to measure the elastic behaviour of three fine-grade soils. The cyclic tests of modulus of elasticity and Resilient Modulus were performed on testing specimens. The measured values are equal to the ratio between cyclic stress and elastic deformation. Triaxial test procedures and measured values were compared. Testing cohesive soils were classified before testing and finally disturbed during the unconfined compressive test.

## **Key words:**

Sleeper subsoil, subgrade, modulus of elasticity, Resilient Modulus, triaxial compression test, unconsolidated undrained, UU, consolidated undrained, CU, consolidated drained, CD, dynamic triaxial apparatus, Dynatriax, unconfined compression test

# OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2. ZEMINA</b> .....	<b>8</b>
2.1. NAPĚTÍ V ZEMINĚ .....	9
2.2. PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY .....	12
2.3. DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY .....	13
2.4. POPISNÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	16
2.5. KLASIFIKACE .....	16
<b>3. TRIAXIÁLNÍ ZKOUŠKY</b> .....	<b>18</b>
3.1. NEKONSOLIDOVANÁ NEODVODNĚNÁ (UU).....	19
3.2. KONSOLIDOVANÁ NEODVODNĚNÁ (CU) .....	19
3.3. KONSOLIDOVANÁ ODVODNĚNÁ (CD) .....	20
3.4. CYKLICKÁ ZKOUŠKA .....	20
3.5. FÁZE ZKOUŠKY .....	20
3.5.1. <i>Saturace</i> .....	20
3.5.2. <i>Konsolidace</i> .....	21
3.5.3. <i>Statické zatěžování</i> .....	23
3.5.4. <i>Cyklické zatěžování</i> .....	23
<b>4. ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>27</b>
4.1. TRIAXIÁLNÍ PŘÍSTROJ .....	27
4.1.1. <i>Zkušební vzorek</i> .....	28
4.1.2. <i>Triaxiální komora</i> .....	30
4.1.3. <i>Zatěžovací zařízení</i> .....	31
4.1.4. <i>Měřicí zařízení</i> .....	31
4.2. DYNAMICKÝ TRIAXIÁLNÍ PŘÍSTROJ .....	32
4.2.1. <i>Ovládání</i> .....	34
4.2.2. <i>Zkušební zařízení</i> .....	37
<b>5. REŠERŠNÍ ČÁST</b> .....	<b>43</b>
5.1. ZEMNÍ PLÁŇ .....	45
5.1.1. <i>Matematické modely</i> .....	46



5.1.2.	<i>Pevnost v prostém tlaku</i>	48
5.1.3.	<i>Kalifornský poměr únosnosti</i>	49
5.1.4.	<i>Vlhkost</i>	50
5.1.5.	<i>Napětí</i>	52
5.2.	KONSTRUKČNÍ VRSTVY	54
5.2.1.	<i>Hrubozrnné materiály</i>	56
5.2.2.	<i>Geomřížky</i>	62
5.2.3.	<i>Frekvence</i>	65
<b>6.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b>	<b>68</b>
6.1.	VLHKOST	70
6.2.	PROSÉVACÍ ZKOUŠKA	71
6.3.	MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST	73
6.4.	RESILIENT MODULUS	77
6.4.1.	<i>Zatěžovací zařízení</i>	77
6.4.2.	<i>Cyklické zatěžování</i>	78
6.4.3.	<i>Triaxiální zkouška</i>	80
6.5.	MODUL PRUŽNOSTI	89
6.5.1.	<i>Zatěžovací zařízení</i>	89
6.5.2.	<i>Cyklické zatěžování</i>	89
6.5.3.	<i>Triaxiální zkouška</i>	94
6.6.	PEVNOST V PROSTÉM TLAKU	99
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>104</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>106</b>
<b>9.</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>110</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ</b>	<b>111</b>
<b>11.</b>	<b>LITERATURA</b>	<b>112</b>
<b>12.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>116</b>

# 1. ÚVOD

Působením kolejové dopravy vzniká statické a dynamické zatížení, které se přenáší z kolejového roštu do pražcového podloží. Kolejové lože, konstrukční vrstvy a zemní těleso jsou součástí pražcového podloží. Deformační a pevnostní charakteristiky zemin jsou základními parametry při posouzení únosnosti železničního tělesa. V běžných triaxiálních přístrojích je vzorek staticky zatížen komorovým tlakem a osovým napětím. Zatížení, které vyvolá projíždějící souprava vlaku na pražcové podloží, se vyvodí působením cyklického napětí v dynamickém triaxiálním přístroji. Na základě cyklické zkoušky v dynamickém triaxiálním přístroji lze analyzovat účinky železniční dopravy na pražcové podloží.

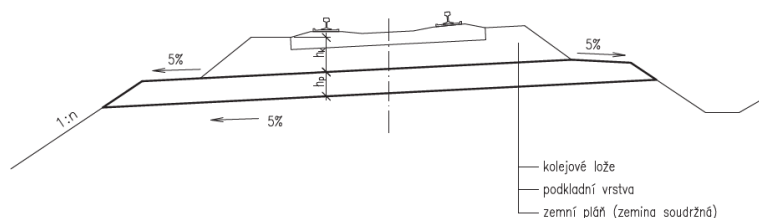
V rámci teoretické části diplomové práce se zabývám triaxiálními zkouškami a zatěžovacími přístroji. Uvádím běžné triaxiální zkoušky a z nich vycházející cyklické zkoušky. V dynamickém triaxiálním přístroji působí na zeminu cyklické osově zatížení. Popisuji dynamický triaxiální přístroj na Fakultě stavební ČVUT, který jsem použil v rámci své praktické části. Běžné a dynamické zkušební postupy a přístroje se ve vybraných předpokladech shodují. Součástí teoretické části je popis vlastností zemin, na které navazují sledované parametry triaxiálních zkoušek.

Rešeršní část je zaměřena na způsoby využití dynamického triaxiálního lisu při analýze vrstev pražcového podloží. V současné době neexistuje platný zkušební postup cyklického zatěžování, které by odpovídalo účinkům železniční dopravy. V zahraničních vědeckých člancích jsem se zaměřil na výzkum pružného přetváření konstrukčních vrstev a zemní pláně. Během cyklického zatěžování byla v rámci výzkumů stanovena deformační charakteristika resilient modulu, u které byla sledována závislost na působícím napětí, frekvenci zatěžování, typu zeminy a její vlhkosti.

V rámci praktické části jsem měřil pružné chování zemin během cyklického zatěžování podle ČSN EN 13286-7 a AASHTO T 307. Z průběhu přetváření v závislosti na působícím napětí jsem stanovil modul pružnosti a resilient modul. Hodnoty odpovídají v obou případech podílu cyklického deviátoru napětí a pružného osového přetvoření. Pro zkoušky jsem použil tři jemnozrné zeminy. Porovnal jsem zkušební postupy z hlediska aplikovaných úrovní napětí, počtu cyklů a výsledných hodnot. Před provedením cyklických zkoušek jsem zeminy zatřídil a stanovil maximální suchou objemovou hmotnost. Po provedených cyklických zkouškách jsem vzorky porušil během zkoušky pevnosti v prostém tlaku.

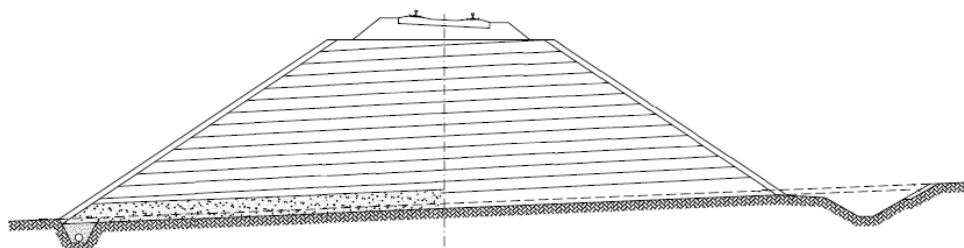
## 2. ZEMINA

Součástí železničního spodku a pražcového podloží je zemní těleso (Obr. 1). Působícím proměnným a stálým zatížením vznikají deformace pružné a trvalé. Zemní těleso musí být dostatečně únosné, aby nedocházelo k nadměrnému sedání a změnám geometrické polohy koleje (GPK). V rámci průzkumu pražcového podloží se zkoumají zeminy v místě stávajícího terénu a zeminy určené pro výstavbu náspu. Dle návrhu nivelety tratě a stávajícího terénu se zemní těleso staví na náspu, v zářezu, nebo odřezu (Obr. 2). Geotechnická kategorie náspu závisí na geotechnických poměrech dané lokality a náročnosti výstavby zemního tělesa. [14]



Obr. 1 Pražcové podloží typu 2.1 [15]

Zemina se vyznačuje třífázovým systémem, kdy je složena z fáze pevné, kapalné a plynné. Třífázová skladba zeminy má vliv na výsledné chování. U zemin se stanovují jejich popisné, fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Mezi popisné a fyzikální vlastnosti patří objemová hmotnost, pórovitost, tíha, nasycení a vlhkost. Zmíněné parametry popisují podíl mezi jednotlivými fázemi. Klasifikace zemin je založena na zrnitostním rozboru, konzistenčních mezích u jemnozrnných zemin a ulehlostí u nesoudržných zemin. Zmíněné deformační a pevnostní charakteristiky jsou mechanickými vlastnostmi zemin. [18]

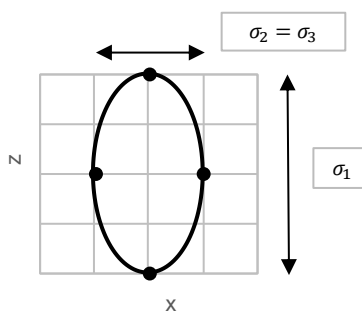


Obr. 2 Zemní těleso v náspu [15]

Svrchní vrstva zemního tělesa se nazývá zemní pláň a plocha mezi konstrukční vrstvou a kolejovým ložem pláň tělesa železničního spodku. Aktivní zónou se rozumí oblast pražcového podloží, která je ovlivněna působícím dopravním zatížením. Minimálně se uvažuje 0,5 m pod zemní plání. [14]

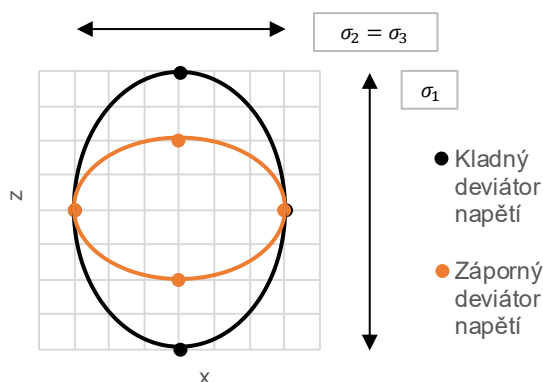
## 2.1. Napětí v zemině

Celková napjatost, která udává působící napětí ve všech směrech libovolného bodu, je dle teorie pružnosti znázorněna elipsoidem. Osy elipsoidu sestávají z hlavních napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . V triaxiálním přístroji na vzorek zeminy působí komorový tlak  $\sigma_3$  a osově napětí  $\sigma_1$  v axiálním směru. Během smykové zkoušky se navyšuje osově napětí a rozdíl hlavních napětí se nazývá deviátor napětí  $\sigma_d$ . Díky shodné velikosti hlavních napětí působících kolmo k ose lze problém převést na rovinnou úlohu. Vychází se ze dvou hlavních napětí, které jsou hlavní a vedlejší osou elipsy (Obr. 3). [16]



Obr. 3 Elipsa napětí

V dynamickém triaxiálním přístroji působí zpravidla cyklické zatížení v osovém směru. Hodnota deviátoru napětí je během zatěžovacího cyklu kladná a záporná. Hlavní osa elipsy napjatosti je v závislosti na proměnném napětí ve vertikálním, nebo horizontálním směru (Obr. 4). Při amplitudě stlačení je hlavní osa vertikální a při roztahení horizontální. Hlavní osa je jen ve vertikálním směru, když na zeminu působí kladný deviátor cyklického napětí.



Obr. 4 Elipsa cyklického napětí

Vztah hlavních normálových napětí a tangenciálního napětí lze znázornit užitím Mohrovy kružnice. Střed kružnice leží na vodorovné ose ve vzdálenosti, která odpovídá průměru hodnot hlavních napětí. Průměr kružnice je rozdílem hodnot. Bod napětí je definován hodnotami  $p$  a  $q$ , které odpovídají střední

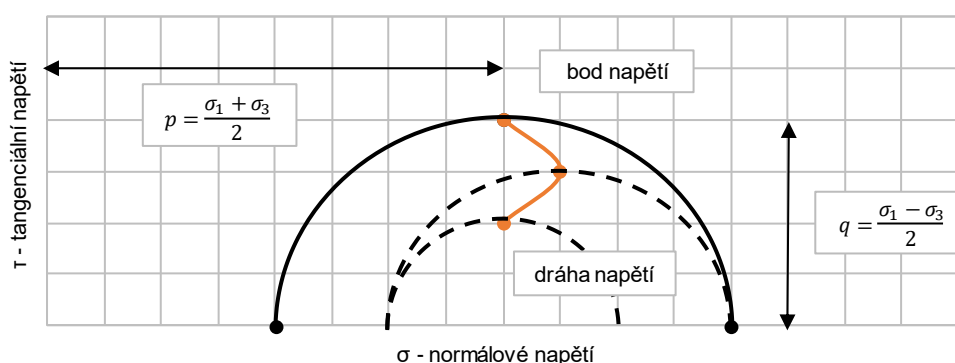
hodnotě normálového napětí a maximální hodnotě smykového napětí. Spojením bodů napětí vzniká dráha napětí, která znázorňuje průběh zatěžování zeminy (Obr. 5). [16]

Střední hodnota normálového napětí

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Maximální hodnota tangenciálního napětí

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



Obr. 5 Bod a dráha napětí

Hodnoty  $p$  a  $q$  lze vyjádřit i s uvážením všech třech hlavních napětí. Střední hodnota normálového napětí zahrnuje komorový tlak ve dvou směrech. Hodnota maximálního tangenciálního napětí odpovídá průměru Mohrovy kružnice.

Hodnoty  $p$  a  $q$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 * \sigma_3}{3}; q = \sigma_1 - \sigma_3$$

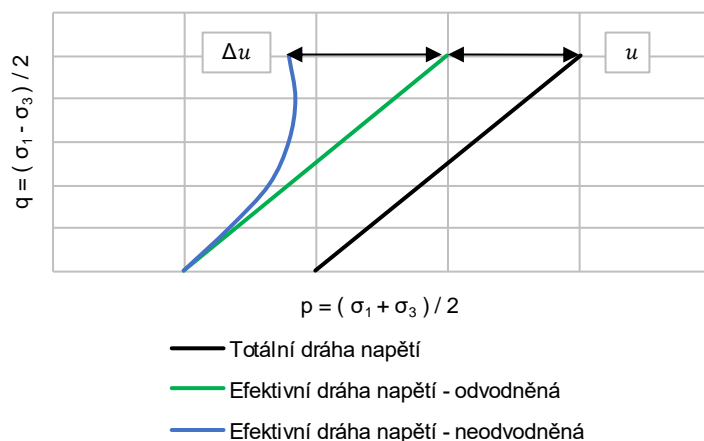
Celkové totální napětí v zemině  $\sigma$  je dáno součtem efektivního napětí ve skeletu zeminy  $\sigma_{ef}$  a tlakem vody a vzduchu v pórech  $u$ , které lze označit jako neutrální napětí. Deformace způsobená změnou působícího napětí na zeminu je dána především změnou napětí efektivního. Z rozdělení napětí vychází parametry zemin efektivní a totální. Při znázornění Mohrových kružnic efektivních a totálních napětí mají kružnice stejný poloměr, ale jinou polohu středu. Jejich vzdálenost je rovna hodnotě pórového tlaku. [16]

Efektivní napětí

$$\sigma_{ef} = \sigma - u$$

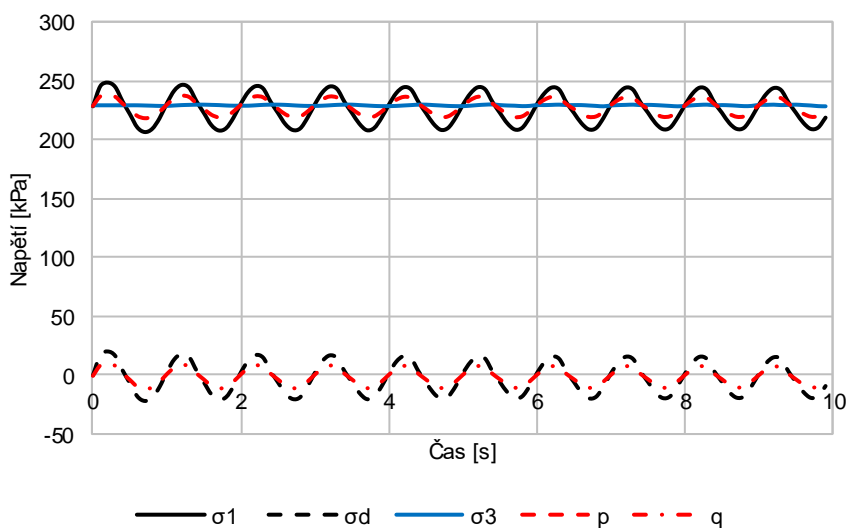
$$\sigma_{ef} = \sigma - u_a + \chi * (u_a - u_w)$$

Totální hodnota  $p$  je rovna součtu efektivní hodnoty a pórového tlaku. Hodnota  $q$  je stejná, protože se pórové tlaky ve vzorku vzájemně odečtou. Když dochází k izotropnímu stlačování vzorku, hodnota  $p$  roste, ale hodnota  $q$  je nulová a vzorek je zpevňován. Navýšením osového napětí roste hodnota  $q$  a vzorek se deformuje. (Obr. 6).

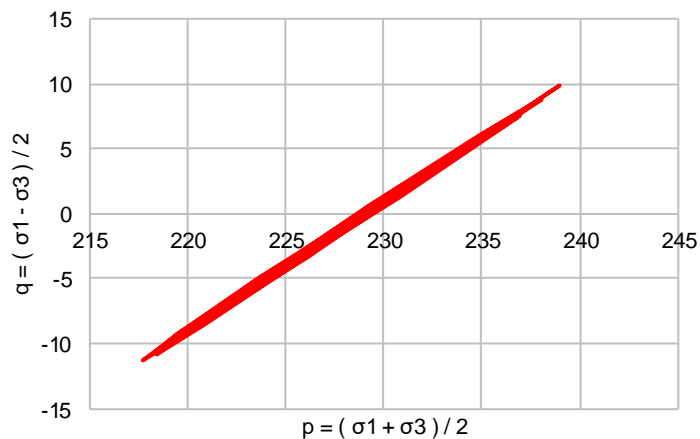


Obr. 6 Dráha napětí

Na následujících grafech jsou znázorněny totální hlavní napětí a odvozené hodnoty během cyklické zkoušky (Obr. 7). Hodnoty  $p$  a  $q$  se mění v závislosti na proměnném osovém napětí. Komorový tlak je konstantní. Z výsledné dráhy napětí je patrné, že při roztážení jsou hodnoty  $p$  a  $q$  minimální a při stlačení maximální (Obr. 8).



Obr. 7 Napětí během cyklické zkoušky



Obr. 8 Dráha napětí během cyklické zkoušky

## 2.2. Pevnostní charakteristiky

U zemin dochází k porušení usmyknutím. Pevnost není stanovena konstantní hodnotou napětí, ale rovnicí smykové pevnosti zemin. Rovnice se skládá z normálového napětí působícího kolmo na smykovou plochu, soudržnosti a úhlu vnitřního tření zeminy. U zemin nesoudržných je konstantní hodnota soudržnosti nulová. [12]

Smyková pevnost

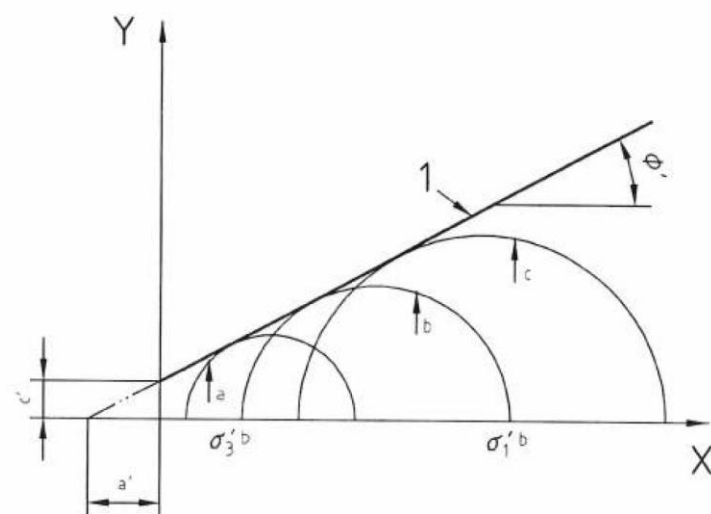
$$\tau = \sigma * tg\varphi + c$$

Znázorněním smykové rovnice vznikne Mohr-Coulombova přímka, která je obalovou křivkou Mohrových kružnic (Obr. 9). Kružnice jsou dány různými hodnotami napjatosti při porušení. Rovnice smykové pevnosti se stanoví na základě efektivních, nebo totálních parametrů zemin. [12]

Smyková pevnost pro totální a efektivní parametry

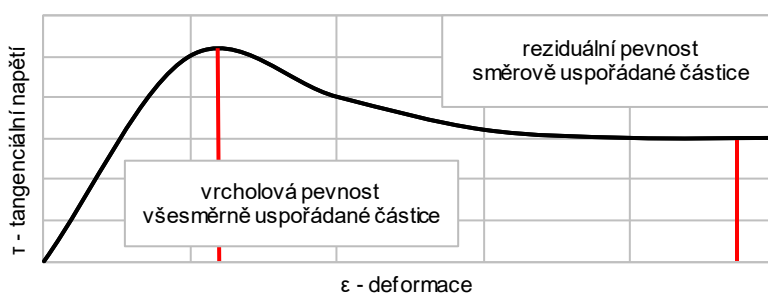
$$\tau = \sigma * tg\varphi_u + c_u; \tau = (\sigma - u) * tg\varphi_{ef} + c_{ef}$$

Zkouška smykové pevnosti zemin se může provádět v krabicových, kruhových a triaxiálních přístrojích. V krabicovém smykovém přístroji je vzorek zeminy umístěn mezi dvěma krabicemi. Svrchní krabice, resp. čelist se posunuje ve vodorovném směru a zároveň na ní působí svislé napětí. Zemina se poruší smykem ve vodorovném směru. V kruhovém smykovém přístroji je zemina uložena do mezikruží a čelisti se otáčejí proti sobě. Rotační pohyb má výhodu neomezené deformace. V obou uvedených případech je konstrukcí stroje předurčená poloha smykové plochy. V triaxiálním přístroji je vzorek všesměrně zatížen komorovým tlakem a následně porušen usmyknutím při navýšení osového napětí. [16]



Obr. 9 Mohrovy kružnice při porušení [12]

Vzorek zeminy se po aplikaci zatížení smykově poruší. Při porušení je smykový odpor zeminy maximální a je označován vrcholovou pevností (Obr. 10). Během následné deformace dojde ke snížení na reziduální pevnost. Dané chování vychází z všesměrné orientace zrn zeminy před porušením. U plastických zemín se nedosáhne vrcholu pevnosti, protože vzorek se mnohdy všesměrně plasticky přetváří. Zkouška bývá proto ukončena při určitém osovém přetvoření. [16]



Obr. 10 Vrcholová a reziduální smyková pevnost

### 2.3. Deformační charakteristiky

Deformačními charakteristikami zemín vycházejícími z teorie pružnosti jsou Youngův modul pružnosti  $E$ , Poissonovo číslo  $\nu$  a smykový modul  $G$ . Rozsah pružného chování, kdy je vztah mezi deformací a zatížením lineární, je u zemín v důsledku třífázového složení omezen na velmi malé deformace. Deformační charakteristiky se obdobně jako pevnostní stanovují na základě měřeného napětí efektivní a totální hodnoty. [16]



Zkouška jednoosého stlačení vzorku zeminy se provádí v edometru za odvodněných podmínek. Zatížení může být aplikováno skokově nebo plynule. Vodorovné deformace jsou nulové a vodorovná napětí jsou si rovná. Výstupem jednoosé zkoušky stlačitelnosti je stanovení edometrického modulu přetvárnosti a součinitele stlačitelnosti. [16]

Edometrický modul přetvárnosti

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}$$

Součinitel stlačitelnosti

$$C = \frac{\Delta \ln(\sigma_z)}{\Delta\varepsilon_z}$$

Trojosá deformace vzorku bývá měřena v triaxiální komoře za odvodněných podmínek. Průběh zkoušky je obdobný triaxiální zkoušce pevnosti zemin. Zemina se zatěžuje izotropně nebo anizotropně. [16]

Hookův zákon pro třisměrné namáhání

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} * (\sigma_x - \nu * (\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} * (\sigma_y - \nu * (\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * (\sigma_x + \sigma_y))$$

Na základě známých hodnot napětí  $\sigma_x, y, z$  a přetvoření  $\varepsilon_x, y, z$  se provedou výpočty založené na Hookově zákonu. Vzhledem k tomu, že u zeminy dochází k plastickým deformacím již při malých přetvořeních, zavádí se modul přetvárnosti  $E_{def}$  (Tab. 2). Modul lze stanovit jako sečnový pro určitý interval zatížení nebo tečnový pro počáteční deformaci. Součástí zmíněných vzorců je Poissonovo číslo  $\nu$ , které vyjadřuje poměr mezi přetvořeními ve směrech hlavních napětí (Tab. 1). [16]

Izotropní zatížení

$$\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z; \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z; \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$E = \frac{\sigma * (1 - 2 * \nu)}{\frac{\Delta V}{V}}$$

## Osové anizotropní zatížení

$$\sigma_x = \sigma_y = 0; \varepsilon_x = \frac{-\nu * \sigma_z}{E}; \varepsilon_y = \frac{-\nu * \sigma_z}{E}; \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}; \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$\nu = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{\Delta V}{V} * \frac{E}{\sigma_z}\right) = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{\Delta V}{V} * \varepsilon_z\right)$$

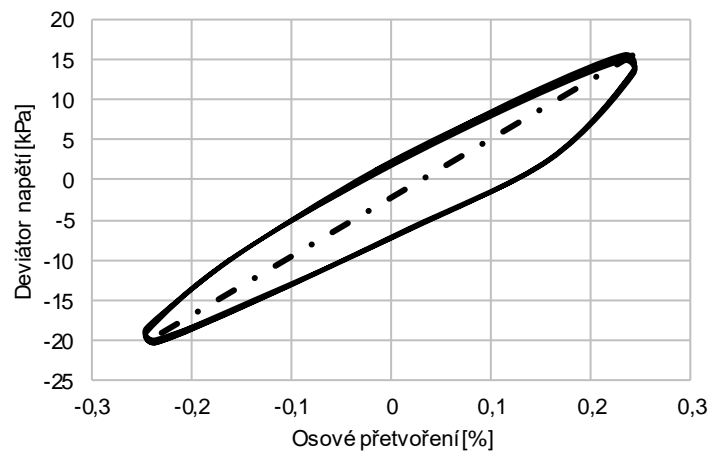
Tab. 1 Orientační hodnoty Poissonova čísla [7]

Zemina									v	
Kamenitá sypanina									0,15	
G1	GW	G2	GP						0,20	
G3	G-F								0,25	
S1	SW	S2	SP						0,28	
G4	GM	G5	GC	S3	S-F	S4	SM			0,30
S5	SC	F1	MG	F2	CG	F3	MS	F4	CS	0,35
F5	ML MI	F6	CL CI	F7	MH MV ME					0,40
F8	CH CV CE									0,42

Tab. 2 Orientační hodnoty modulu přetvárnosti [16]

Zeminy	Minimální modul přetvárnosti $E_{def}$	Maximální modul přetvárnosti $E_{def}$
	MPa	MPa
jemnozrné	1	30
písčité	5	100
šterkovité	20	500

Během cyklického zatěžování v triaxiálním přístroji se z tvaru hysterezní křivky určí sečný modul pružnosti a z plochy koeficient stlačitelnosti (Obr. 11). Zkouška může probíhat jako odvodněná, nebo neodvodněná. V úvodu práce bylo uvedeno, že poměr mezi cyklickým osovým napětím a odpovídající pružnou deformací se rovná hodnotě resilient modulu dle AASHTO T 307, resp. modulu pružnosti podle ČSN EN 13286-7. [3] [5] [6] [9]



Obr. 11 Hysterezní křivka

## 2.4. Popisné a fyzikální vlastnosti

Popisné a fyzikální vlastnosti vychází ze vzájemného poměru mezi pevnou, kapalnou a plynnou fází zeminy (Tab. 3). Objemovou hmotnost lze stanovit pro vlhkou zeminu, suchou a měrnou hmotnost zrn. Poměr mezi pevnou fází a póry, které jsou vyplněny vzduchem a vodou, se stanoví pórovitostí nebo číslem pórovitosti. Objem vody v zemině se může určit vlhkostí nebo stupněm nasycení. [18]

Tab. 3 Poměry mezi fázemi zeminy [16]

Fáze	Hmotnost		Objem			Pórovitost
vzduch	m		V	V <sub>p</sub>	V <sub>a</sub>	n
voda		m <sub>w</sub>			V <sub>w</sub>	
skelet		m <sub>s</sub>		V <sub>s</sub>	1-n	

Suchá objemová hmotnost a měrná hmotnost zrn

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}; \rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Pórovitost a číslo pórovitosti

$$n = \frac{V_p}{V}; e = \frac{V_p}{V_s}$$

Stupeň nasycení zeminy a vlhkost

$$S_r = \frac{V_w}{V_p}; w = \frac{m_w}{m_s}$$

## 2.5. Klasifikace

Při klasifikaci zemin se provádí zkoušky zrnitosti, ulehlosti a konzistenčních mezí. Zrnitostní rozbor sestává z prosévací a sedimentační zkoušky. Konzistenční meze se stanovují u jemnozrnných zemin a určují, kdy se zemina chová plasticky. Ke zjištění konzistenčních mezí je nutné provést zkoušku meze tekutosti  $w_L$  a plasticity  $w_P$ . Na mezi plasticity přechází zemina z pevného do plastického stavu. Při následném zvýšení vlhkosti zemina dosáhne meze tekutosti a ztrácí smykovou pevnost. Rozdíl těchto hodnot odpovídá indexu plasticity a znázorňuje rozsah vlhkosti, při které se zemina chová plasticky. Vztah mezi aktuální vlhkostí zeminy a konzistenčními mezemi se stanoví stupněm konzistence nebo číslem tekutosti. Jejich součet se rovná jedné. [16] [18]

Index plasticity

$$I_p = w_l - w_p$$

### Stupeň konzistence a číslo tekutosti

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p}; I_l = \frac{w - w_p}{w_l - w_p}$$

U nesoudržných zemin se stanovuje ulehlost daného materiálu. Dále se z křivky zrnitosti odvodí číslo nestejnozrnnosti a křivosti. Obě hodnoty vychází z podílu průměrů zrn odpovídajícím určitým procentuálním propadům. [18]

### Stupeň ulehlosti

$$I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

### Číslo nestejnozrnnosti a křivosti

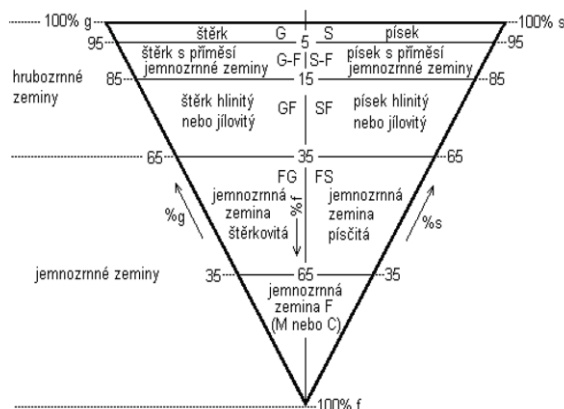
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} * d_{10}}$$

Zeminy se dělí na skupiny jemnozrnných, písčitých a štěrkovitých (Obr. 12). Jemnozrnné zeminy obsahují minimálně 35 % jemnozrnných částic. Zeminy písčité a štěrkovité obsahují maximálně 35 % jemnozrnných částic. V závislosti na převažující frakci se stanoví, zda se jedná o štěrk, nebo písek (Tab. 4). Rozlišuje se 5 tříd štěrkovitých, 5 tříd písčitých a 8 tříd jemnozrnných zemin. [14]

Tab. 4 Skupiny zemin [14]

Skupina zemin	Značení	Velikost zrn		Jemnozrnné částice	
		mm		%	
		min	max	min	max
Štěrkovité	<b>G</b>	2	60		35
Písčité	<b>S</b>	0,06	2		35
Jemnozrnné	<b>F</b>		0,06	35	

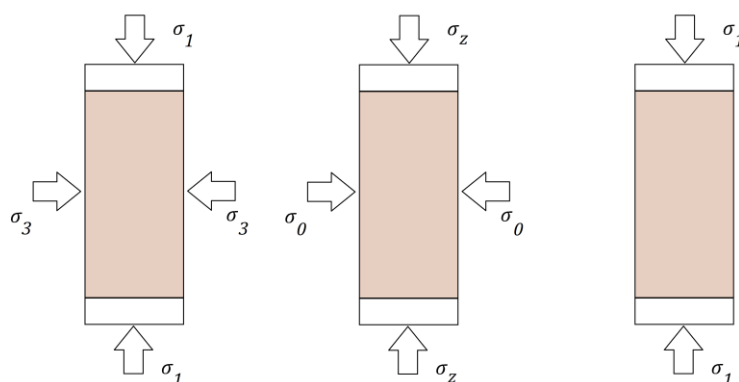


Obr. 12 Klasifikační diagram zemin [14]

### 3. TRIAXIÁLNÍ ZKOUŠKY

Vzorky zemin se zkouší v triaxiálních přístrojích. Během triaxiální zkoušky působí na těleso osově napětí  $\sigma_1$  a komorový tlak  $\sigma_3$ . Zkoušku lze rozdělit na dvě části. Během první fáze může dojít ke konsolidaci vzorku se změnou objemu vzorku. Při izotropní konsolidaci je těleso všesměrně zatěžováno napětím  $\sigma_3$ . Při anizotropní konsolidaci působí rozdílné napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  (Obr. 13). Během anizotropní konsolidace je vhodné zatížit zeminu ve svislém směru geostatickým napětím  $\sigma_z$  a ve směru vodorovném napětím zemního tlaku v klidu  $\sigma_0$ . V případě nekonsolidované zkoušky je těleso zatíženo komorovým tlakem  $\sigma_3$  bez změny objemu.

Ve druhé fázi zkoušky narůstá působící osově napětí až do smykového porušení vzorku. Nárůst se označuje jako deviátor napětí  $\sigma_d$ . Vzorek může být během zkoušky odvodněn a dochází ke změně objemu vzorku. Dle výše zmíněných parametrů konsolidace a odvodnění se dělí triaxiální zkoušky (Tab. 5). Triaxiální zkoušky se u nás provádí dle ČSN CEN ISO/TS 17892-8 a 9. [11] [12]



Obr. 13 Izotropní a anizotropní zatížení

#### Druhy triaxiálních zkoušek

- UU (unconsolidated undrained)
- CU (consolidated undrained)
- CD (consolidated drained)

Během cyklické zkoušky působí na zkušební vzorek cyklické osově napětí a konstantní komorový tlak. Cyklické zkoušky vychází z parametrů běžných triaxiálních zkoušek. V průběhu první fáze může být vzorek konsolidován. V následující fázi probíhá cyklická zkouška za odvodněného, nebo neodvodněného stavu. Po vysvětlení běžných triaxiálních zkoušek je popsána cyklická zkouška. Cyklická smyková pevnost je definována jako schopnost zeminy odolat působícímu cyklickému zatížení při stanoveném počtu cyklů. [3] [5]

Tab. 5 Triaxiální zkoušky [11] [12] [16]

Smykové podmínky	Nekonsolidované	Konsolidované		Hodnoty	
		Izotropně	Anizotropně		
Neodvodněné	UU			$\phi_u C_u$	
		CIU	CAU	$\phi_u C_u$	
		CIP	CAP	$\phi_{ef} C_{ef}$	$\phi_u C_u$
Odvodněné		CID	CAD	$\phi_{ef} C_{ef}$	

### 3.1. Nekonsolidovaná neodvodněná (UU)

Výstupem zkoušky je neodvodněná smyková pevnost. Na rozdíl od zkoušek konsolidovaných je zkouška typu UU rychlá. Nasycený vzorek jemnozrnné zeminy je zatížen v první fázi komorovým tlakem. Není umožněna konsolidace a nedochází ke změně pórovitosti.

Ve druhé fázi je za konstantního komorového tlaku aplikován deviátor napětí až do smykového porušení. Na svrchní a spodní straně vzorku jsou nepropustné destičky a zkouška je neodvodněná. Pórový tlak narůstá a objem zeminy se nemění. Rychlost svislého zatěžování se pohybuje mezi 0,5 až 2 % za minutu. U křehkých zemín dojde k porušení při malé deformaci a zemina se musí zatěžovat pomalu. [11]

Zkouška pevnosti v prostém tlaku může proběhnout s předpoklady zmíněné triaxiální zkoušky. Pokud je jemnozrnná zemina dostatečně nepropustná, lze splnit požadavek na nemožnost odvodnění vzorku.

### 3.2. Konsolidovaná neodvodněná (CU)

Vzorek zeminy je během první fáze zkoušky konsolidován, kdy dochází ke změně objemu vlivem vytlačování vody z pórů. Rozdíl totálního napětí v komoře a pórového tlaku vody v pórech je na konci konsolidace roven efektivnímu konsolidačnímu napětí.

Během druhé fáze je za neodvodněných podmínek vzorek zeminy porušen smykem. Nedochází ke změně objemu a narůstá pórový tlak uvnitř vzorku. Pórový tlak je možné měřit na podstavách, ale ne uvnitř vzorku. Zatěžování musí probíhat takovou rychlostí, aby docházelo k vyrovnání pórového tlaku po výšce vzorku. Při měření hlavních napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  a pórového tlaku  $u$  se získají totální a efektivní parametry zemín. Zkouška může být provedena bez měření pórových tlaků, kdy výstupem zkoušky jsou parametry totální. Ve výše uvedené tabulce symbol  $P$  označuje měření pórového tlaku během zkoušky. [12]

### **3.3. Konsolidovaná odvodněná (CD)**

Vzorek je zatěžován působícím napětím a postup konsolidace je shodný s předešlou zkouškou. Během konsolidace se díky objemovým změnám snižuje číslo pórovitosti.

Po skončení konsolidace je vzorek zatížen deviatorem napětí za konstantního komorového tlaku až do smykového porušení. Vzorek zeminy je v odvodněném stavu. Dochází k objemovým změnám, kdy hodnota změny pórového tlaku musí být minimální. Tohoto předpokladu lze docílit dostatečně malou rychlostí zatěžování. Výsledné hodnoty odpovídají efektivním parametrům. [12]

### **3.4. Cyklická zkouška**

Zkouška by měla probíhat jako izotropně konsolidovaná neodvodněná (CU). Daná podmínka nejlépe reflektuje zeminu zatíženou cyklickým zatížením, kterým může být zemětřesení nebo zatížení dopravou. V první fázi je vzorek konsolidován a dochází ke změně pórovitosti vzorku. Postup konsolidace je stejný a postupně se aplikují různé hodnoty konsolidačního napětí stejně jako u statických triaxiálních zkoušek. [5]

Ve druhé fázi je vzorek cyklicky zatěžován osovým napětím. Cyklické zatěžování může působit v závislosti na zkušebním postupu s řízenou deformací, nebo napětím. Během zatěžování je měřen komorový tlak, pórový tlak, osově zatížení a deformace. [5]

### **3.5. Fáze zkoušky**

Před provedením triaxiální zkoušky se vzorek v závislosti na typu zkoušky saturuje, konsoliduje a následně zatěžuje při odvodněných, nebo neodvodněných podmínkách.

#### **3.5.1. Saturace**

Při konsolidaci a odvodněné smykové zkoušce je měřena změna objemu, která odpovídá množství vyteklé vody. Během neodvodněného smykání se měří tlak vody v pórech. U vzorků částečně nasycených vodou by byl problém v rozdílném tlaku vzduchu a vody v pórech zeminy.

Před triaxiální zkouškou je nutné vyplnit póry vodou a dosáhnout plné saturace vzorku. Saturace vzorku spočívá v aplikaci zpětného sytícího tlaku na podstavě vzorku. Zpětný tlak se zvyšuje zároveň s komorovým tlakem. Jejich rozdíl je konstantní, nesmí přesáhnout hodnotu efektivního konsolidačního napětí a nesmí kolísat. Drenážní systém je otevřen a voda vytéká druhou podstavou.

Změna tlaků se může dít přírůstkově. Postupné zvyšování zaručuje homogenitu saturace v celém vzorku. Sycení je možné provést až po konsolidaci vzorku s rizikem, že může dojít k překročení efektivního konsolidačního napětí. [5] [12]

Parametr B

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Uzavřením drenážního systému a zvýšením komorového tlaku se určí, zda je vzorek plně nasycen. Měří se změna pórového tlaku v čase. Je-li vzorek plně nasycen, tak se hodnoty komorového a pórového tlaku rovnají. Koeficient  $B$  se rovná přibližně jedné a může se pokračovat konsolidací. Minimální požadovaná hodnota je zpravidla 0,95. Následně se sníží komorový tlak a ověření končí. Zvýšení zpětného tlaku je adekvátní ke snížení komorového tlaku. V případě, že by se hodnota parametru  $B$  zvyšovala, není saturace dokončena. Pórový tlak u saturovaného vzorku se mění konstantně s tlakem komorovým. [5] [12]

Množství aplikovaného zpětného tlaku závisí na počáteční saturaci, stlačitelnosti zeminy a požadovaném efektivním konsolidačním napětí. Náhlé zvýšení pórového tlaku během konstantního komorového tlaku značí netěsnost mezi komorou a vzorkem. V komoře je kapalina zatížena větším tlakem než ve vzorku a proniká do místa s nižším tlakem. Snížení pórového tlaku je naopak v důsledku netěsnosti v systému měření pórového tlaku. [5]

Závislost změny pórového tlaku na hodnotách hlavních napětí se určí dle následující rovnice. Z dané rovnice vychází výše zmíněný parametr  $B$ . Při aplikaci deviátoru napětí se určí koeficient pórového tlaku  $A$ , který je s rostoucím zatížením proměnný. [12] [16]

Skemptonovy koeficienty pórového tlaku

$$\Delta u = B * (\Delta \sigma_3 + A * (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3))$$

Změna objemu vzorku po saturaci

$$\Delta V_{sat} = \frac{3 * V_i * \Delta H_{sat}}{H_i}$$

$H_i$  – počáteční výška vzorku;  $V_i$  – počáteční objem vzorku

$\Delta H_{sat}$  – změna výšky vzorku po saturaci

### 3.5.2. Konsolidace

Nasycený vzorek se podrobí izotropní, nebo anizotropní konsolidaci. Při anizotropní konsolidaci je vhodné mít vertikální a horizontální napětí odpovídající zemnímu tlaku v klidu, resp. geostatickému napětí. Těleso je zatěžováno komorovým tlakem na požadované efektivní konsolidační napětí

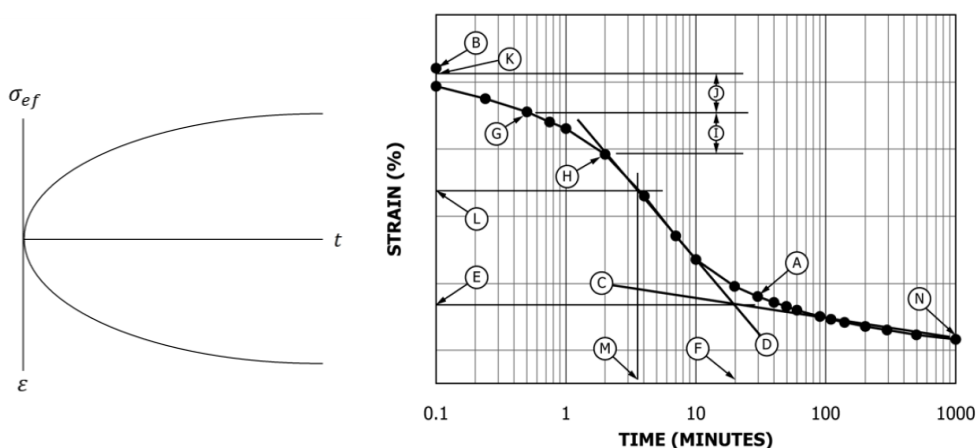


za konstantního zpětného tlaku. Rozdíl mezi působícím komorovým tlakem a pórovým tlakem odpovídá efektivnímu konsolidačnímu napětí. [5] [12]

V případě anizotropní konsolidace se po nárůstu komorového tlaku zvýší deviátor napětí. Následuje konsolidace otevřením drenáže a měření množství vypuštěné vody ze vzorku a osová deformace. Fáze, kdy pórový tlak postupně klesá, resp. efektivní napětí roste se nazývá primární konsolidací a je následována sekundární konsolidací. Účinek sekundární konsolidace je výrazně menší. Množství vypuštěné vody se vynese v čase do grafu formou logaritmické funkce, nebo funkce odmocniny (Obr. 14). Ze získané křivky se určí, zda primární konsolidace byla ukončena. Konsolidaci vzorku je možné urychlit dvěma drenážními destičkami a radiální drenáží mezi membránou a vzorkem. [12] [16]

Poměr vodorovného a svislého napětí

$$K = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_z}$$



Obr. 14 Primární konsolidace [2]

Po dokončení se uzavřou ventily a v případě, že se pórový tlak nemění, může se pokračovat statickým, nebo cyklickým zatěžováním. Pro následné výpočty je nutné vypočítat pozměněné geometrické hodnoty vzniklé konsolidací a saturací vzorku. [3] [12]

Změna objemu vzorku po konsolidaci

$$\Delta V_c = \frac{3 * V_i * \Delta H_c}{H_i}$$

$H_i$  – počáteční výška vzorku;  $V_i$  – počáteční objem vzorku

$\Delta H_c$  – změna výšky vzorku po konsolidaci

### 3.5.3. Statické zatěžování

Na základě typu zkoušky je drenáž otevřená, či nikoliv a vyvodí se deviátor napětí. Během působení deviátoru napětí je komorový tlak konstantní. Zatěžování probíhá až do porušení vzorku. Během zkoušky nemusí dojít k dosažení vrcholové hodnoty osového napětí a zemina se může plasticky přetvářet do stran. V tomto případě platí, že výsledná pevnost odpovídá osovému napětí při 15 % osovém přetvoření. Rychlost zatěžování ovlivňuje odvodnění vzorku, doba a přetvoření během konsolidace. Vzorec pro výpočet rychlosti zatěžování obsahuje koeficient  $F$ , který zohledňuje vliv odvodnění během zkoušky. U odvodněné zkoušky je vyšší a snižuje rychlost zatěžování. V průběhu odvodněné zkoušky jsou měřeny objemové změny vzorku. U neodvodněné zkoušky jsou měřeny změny v aktuálním pórovém tlaku. Zatížení probíhá s konstantním nárůstem deformace. [11] [12]

Rychlost zatěžování

$$v_{max} = \frac{(H_i - \Delta H_c) * \varepsilon_{1f}}{F * t_{50}}$$

$t_{50}$  – čas odpovídající 50 % konsolidaci;  $\varepsilon_{1f}$  – očekávané přetvoření při porušení

$H_i$  – počáteční výška vzorku;  $\Delta H_c$  – změna výšky vzorku po konsolidaci

Z výsledných maximálních osových napětí  $\sigma_1$  a komorových tlaků  $\sigma_3$  se určí parametry smykové pevnosti zemin. Z tvaru zatěžovací křivky a působícího napětí lze stanovit sečnový modul. [12]

Sečnový modul

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1)_{50} - \sigma_{1c}}{(\varepsilon_1)_{50}}$$

$(\sigma_1)_{50}$  – průměr osového napětí konsolidačního a při porušení

$(\varepsilon_1)_{50}$  – odpovídající přetvoření;  $\sigma_{1c}$  – konsolidační osově napětí

### 3.5.4. Cyklické zatěžování

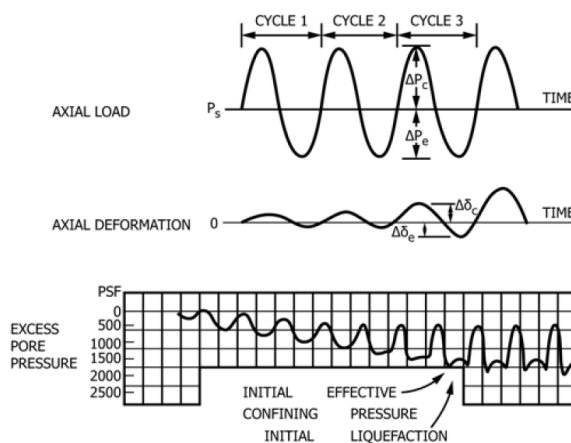
Cyklická zkouška probíhá působením proměnného osového napětí a konstantního komorového tlaku. Tvar zatěžovací křivky odpovídá sinusoidě. Působením cyklického zatěžování se za neodvodněného stavu zvyšuje tlak vody v pórech, snižuje efektivní napětí a dochází k deformaci vzorku bez změny objemu.

**Pevnostní charakteristiky**

Předmětem americké normy ASTM D5311 je stanovení pevnostních charakteristik zemin při cyklickém zatěžování. Těleso je zatěžováno konstantním

cyklickým zatížením s frekvencí mezi 0,1 až 2 Hz. Hodnota velikosti cyklického zatížení vychází ze zvoleného efektivního konsolidačního napětí. V případě, že změna pórového tlaku odpovídá konsolidačnímu efektivnímu napětí, je zkouška ukončena. Dochází ke ztekucení vzorku. V takovém případě začala voda v pórech zcela přebírat působící cyklické zatížení. Když celková amplituda poměrného přetvoření v osovém směru dosáhne 20 % nebo je dosaženo požadovaného počtu cyklů, je zkouška ukončena. [5]

Mezi hlavní sledované veličiny během cyklické zkoušky patří proměnná hodnota osového zatížení s odpovídající deformací a změna pórového tlaku (Obr. 15). Z naměřených hodnot během cyklického zatěžování se určí amplitudy napětí a jejich průměr pro každý zatěžovací cyklus. Dále se určí hodnoty přetvoření, index pórového tlaku a index cyklického napětí. Obdobně jako u běžné triaxiální zkoušky jsou zkoušky postupně prováděny s různým komorovým tlakem a osovým napětím. Jejich vzájemný poměr zohledňuje index CSR. [5]



Obr. 15 Amplitudy zatížení a deformace [5]

#### Amplituda napětí

$$\Delta\sigma_c = \frac{\Delta P_c}{A_c}; \Delta\sigma_e = \frac{\Delta P_e}{A_c}; \Delta\sigma_a = \frac{\Delta\sigma_c + \Delta\sigma_e}{2}$$

$\Delta P_c$  – amplituda zatížení v tlaku (compression);  $\Delta P_e$  – amplituda zatížení v tahu (extension)

$A_c$  – průřezová plocha vzorku po konsolidaci

#### Index pórového tlaku

$$U = \frac{\Delta u_{max}}{\sigma_{3ef}}$$

$\Delta u_{max}$  – amplituda pórového tlaku;  $\sigma_{3ef}$  – efektivní konsolidační komorový tlak

Index CSR (cyclic stress ratio)

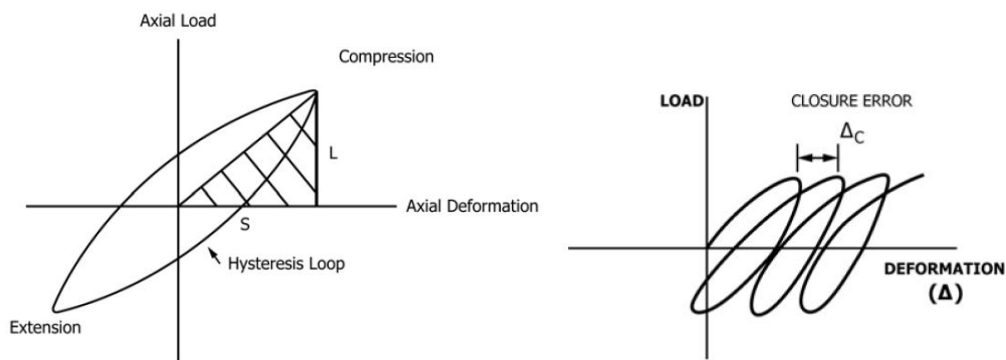
$$CSR = \frac{\Delta\sigma_a}{2 * \sigma_{3ef}}; CSR_{avg} = \sum_{n=1}^m \frac{CSR_n}{m}$$

Jednotlivé zkoušky se znázorní vynesením indexu CSR a počtu cyklů nutných k dosažení určité dvojitě amplitudy osového přetvoření. Výsledkem jsou křivky cyklické triaxiální pevnosti. Průměrná hodnota indexu CSR se určí, když dvojitá amplituda osového přetvoření dosáhne určitých naměřených hodnot nebo při počátku ztekucení vzorku. [5]

### Deformační charakteristiky

Během zkoušky cyklického zatěžování je možné v souladu s ASTM D3999 stanovit deformační charakteristiky zemin. Z průběhu zatěžování a přetvoření se stanoví sečný Youngův modul pružnosti  $E$  a koeficient stlačitelnosti  $C$ . Průběh zatěžování může probíhat s konstantní hodnotou zatížení, nebo s konstantní hodnotou deformace. Frekvence zatěžování je nižší mezi 0,5 a 1 Hz s počtem cyklů stanovených na 40. Závislost modulu a koeficientu na osovém přetvoření se určí při aplikaci několika stupňů zatížení, resp. deformace. Lze zatěžovat postupně jeden vzorek, nebo použít více vzorků. [3]

Průběh zatížení a deformace se znázorňuje hysterezní křivkou (Obr. 16). Z tvaru hysterezní křivky se určí hodnoty sečnového modulu pružnosti a koeficientu stlačitelnosti. U měkkých zemin může vlivem narůstající plastické deformace docházet k posunu hysterezní křivky. [3]



Obr. 16 Hysterezní křivka [3]

Koeficient stlačitelnosti

$$C = \frac{A_L}{4 * \pi * A_T}$$

$A_L$  – plocha hysterezní křivky;  $A_T$  – plocha vyšrafovaného trojúhelníku

Sečnový modul pružnosti

$$E = \frac{L_{DA}}{S_{DA}} * \frac{L_S}{A}$$

$L_{DA}$  – dvojitá amplituda zatížení;  $S_{DA}$  – dvojitá amplituda výchylky

$L_S$  – výška vzorku po konsolidaci;  $A$  – konsolidovaná průřezová plocha vzorku

Amplituda výchylky

$$\varepsilon_{DA} = \frac{S_{DA}}{L_S}; \varepsilon_{SA} = \frac{\varepsilon_{DA}}{2}$$

Postup dle ASTM D3999 umožňuje maximální posun mezi následujícími hysterezními křivkami 0,2 % osového přetvoření. Ve srovnání u AASHTO T 307 je maximální dovolená osová deformace 5 % a u ČSN EN 13286-7 2 %. Souhrnně lze říct, že normy zaměřené na cyklické deformační charakteristiky mají stejný princip, avšak postup a limitní hodnoty se u nich liší (Tab. 6). [3] [5] [6] [9]

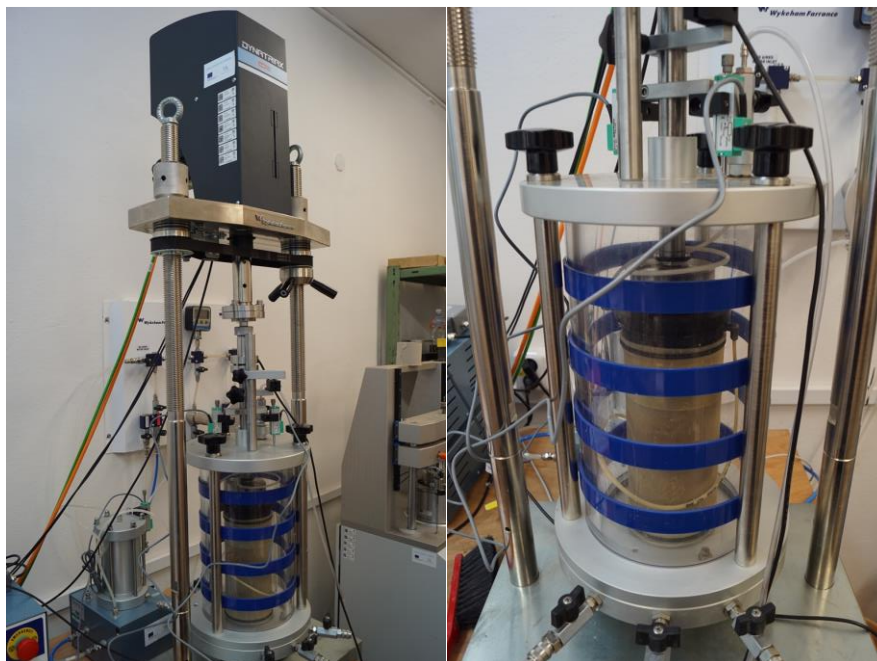
Tab. 6 Parametry cyklických zkoušek [3] [5] [6] [9]

Norma	Frekvence		Zatížení	Veličina	Charakteristika
	Hz				
	min	max			
ASTM D5311	0,1	2,0	$\sigma$	SR	pevnostní
ASTM D3999	0,5	1,0	$\sigma$   $\varepsilon$	E	deformační
AASHTO T 307	0,3	1,0	$\sigma$	$M_r$	deformační
ČSN EN 13286-7	0,2	10,0	$\sigma$	$E_r$	deformační

## 4. ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

### 4.1. Triaxiální přístroj

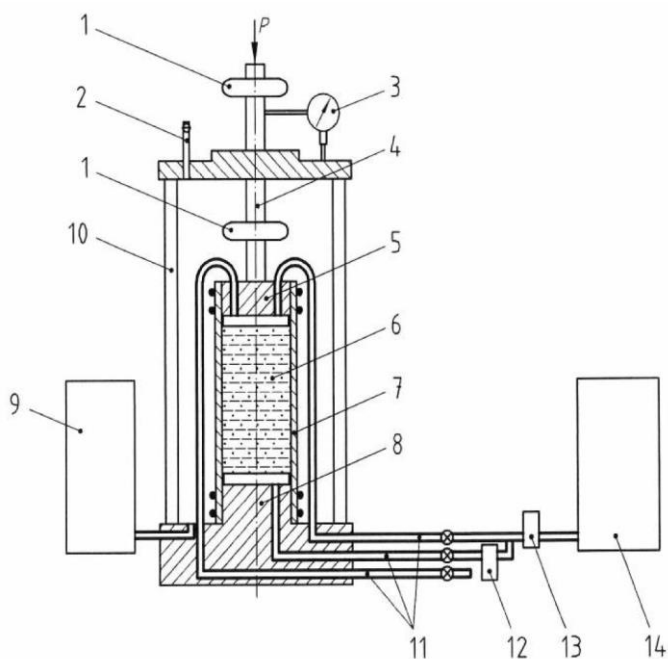
Zkušební těleso je uloženo v triaxiální komoře (Obr. 17). Vzorek je zatěžován osově pístem. V komoře působí na vzorek kapalinou komorový tlak a drenážním systémem zpětný tlak. Skladba odpovídá nákresu níže (Obr. 18).



Obr. 17 Triaxiální přístroj a komora

#### Legenda

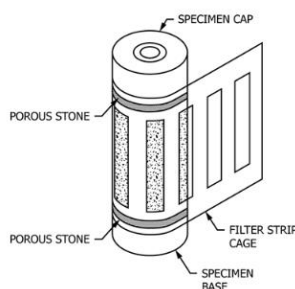
- 1 možné umístění měřidla zatížení
- 2 odvzdušňovací ventil
- 3 měřidlo osového stlačení
- 4 píst
- 5 zatěžovací hlava vzorku
- 6 zkušební vzorek
- 7 membrána
- 8 podstavec
- 9 zařízení pro měření a řízení komorového tlaku
- 10 plášť triaxiální komory
- 11 drenážní trubičky
- 12 měřidlo pórového tlaku
- 13 měřidlo objemové změny
- 14 zařízení pro měření a řízení zpětného tlaku
- P osové zatížení



Obr. 18 Schéma triaxiálního přístroje [12]

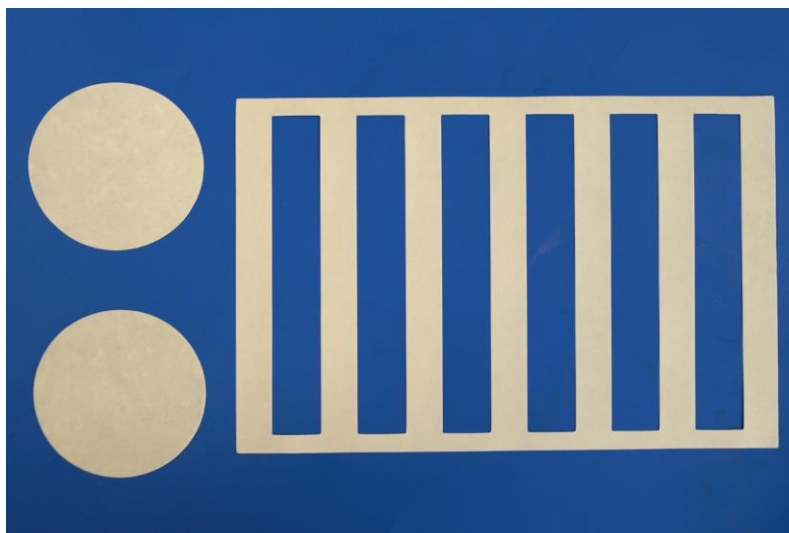
#### 4.1.1. Zkušební vzorek

Těleso je uloženo mezi svrchní a spodní podstavu (Obr. 19). Podstavy jsou napojeny na drenážní systém. Na svrchní a spodní straně vzorku jsou umístěny filtrační destičky, které slouží k drenáži vzorku. Koeficient propustnosti destičky musí odpovídat zkoušené zemině. Mezi vzorek a destičky se navíc vloží filtrační papír, aby nedocházelo k zanášení destiček zeminou. [12]



Obr. 19 Zkušební vzorek [4]

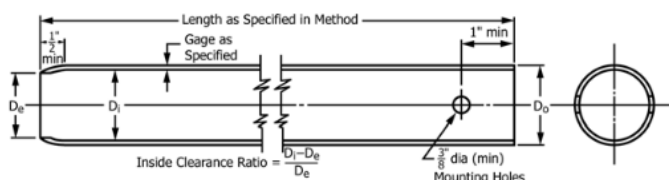
Pro zajištění drenáže na povrchu vzorku je možné použít filtrační papír (Obr. 20). Filtrační papíry se nedoporučují pro nepropustné zeminy. Při nadměrném užití filtračních papírů může dojít ke vzniku nechtěných radiálních napětí podél povrchu. Průniku vody do vzorku brání nepropustná membrána na povrchu. Membrána je k podstavám přichycena těsníci O kroužky. [12]



Obr. 20 Filtrační papíry

V triaxiální komoře může být zkoušen vzorek neporušený, nebo upravený a následně zhuťněný. Minimální průměr vzorku činí 35 mm, resp. 6násobek maximální velikosti zrna zeminy a výška se rovná 1,85 až 2,25násobku průměru. Tyto požadavky dle evropské, resp. české ČSN jsou odlišné u amerických norem ASTM. Minimální průměr vzorku by u nich měl být 51 mm (ASTM D5311), nebo 36 mm (ASTM D3999) a výška odpovídá jeho 2 až 2,5násobku. [3] [5] [11] [12]

Odběr vzorku a jeho následné zpracování musí být provedeno tak, aby nedošlo k nadměrnému porušení, změně přirozené vlhkosti a hustotě vzorku. Neporušené vzorky se mohou získat za pomoci vrtané sondy (Obr. 21). Ocelová trubka se zavrtává do zeminového tělesa a zemina plní trubku. Vyzískaný vzorek je upraven do požadovaného tvaru. [5]



Obr. 21 Vrtaná sonda [1]

Zhutnění vzorku se provádí ve formě (Obr. 22). Uvnitř formy může být nanesena gumová membrána a zemina je hutněna ve vrstvách. Hutnění může být provedeno pěchováním, hnětením, nebo vibracemi. Pro hutnění nižších vrstev může být použito méně energie, protože na ně působí hutnící energie dalších vrstev. Rozdíly ve výsledných hodnotách deformačního a pevnostního chování vzorku během zatěžování nastávají nejen mezi neporušeným a upraveným vzorkem, ale i u vzorků s rozdílným způsobem hutnění. [3] [12]



Obr. 22 Vzorek po zhutnění a uzavření membránou

Postup vložení vzorku do triaxiální komory závisí na soudržnosti zeminy. Na vzorky z nesoudržných zemin je po přípravě a utěsnění vzorku aplikován negativní pórový tlak, resp. zpětný tlak. Vzorek drží tvar a odstraní se hutnící forma (Obr. 23). Po aplikaci odpovídajícího komorového tlaku se uvolní zpětný tlak. U soudržných zemin je příprava snazší. Vzorek se vyjme z hutnící formy a



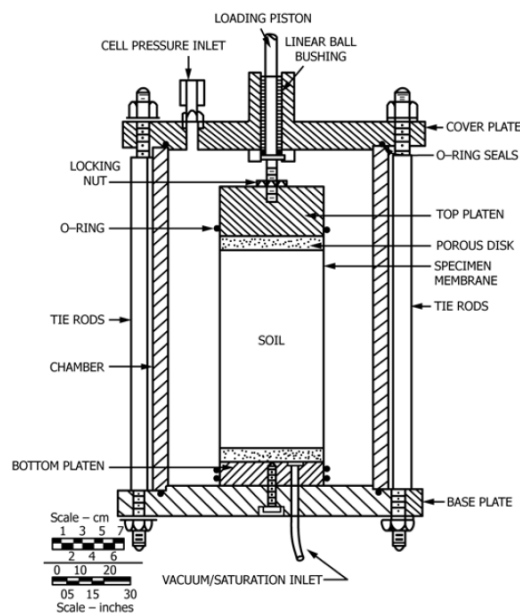
až následně se nanese gumová membrána. Na pomocné válcové těleso se z vnitřní strany přichytí gumová membrána a účinkem vakua se přichytí k povrchu stěny válce. Vložením válce přes vzorek zeminy a následným uvolněním vakua se membrána přichytí na vzorek. Uzavřený vzorek mezi podstavami v triaxiální komoře je dále podrobován výše popsáním postupům. [3] [5]



Obr. 23 Formy průměru 100 mm

#### 4.1.2. Triaxiální komora

Triaxiální komora je během zkoušky vyplněna kapalinou, jejímž účinkem je na těleso aplikován komorový tlak (Obr. 24).



Obr. 24 Vzorek v triaxiální komoře [3]

Komorový tlak odpovídá totálnímu napětí, které se rovná součtu efektivního a pórového napětí. Na podstavě vzorku je napojen zdroj zpětného tlaku. Na spodní desce triaxiální komory jsou výstupní ventily.

#### **4.1.3. Zatěžovací zařízení**

Osové napětí působí na vzorek zatěžovacím pístem, kdy maximální požadovaná osová síla pro zeminy odpovídá 15 kN. Kritickým místem je těsnění pístu. Píst proniká do zatěžovací komory naplněné vodou pod tlakem. Vzniklé působící tření nesmí ovlivnit výsledky. Vlivem nesprávné vzájemné polohy tělesa, zatěžovací hlavy a pístu může dojít k nerovnoměrnému rozložení napětí napříč vzorkem. Tímto vlivem dojde v určité části vzorku k vyššímu napětí a porušení celého vzorku dříve. [3] [12]

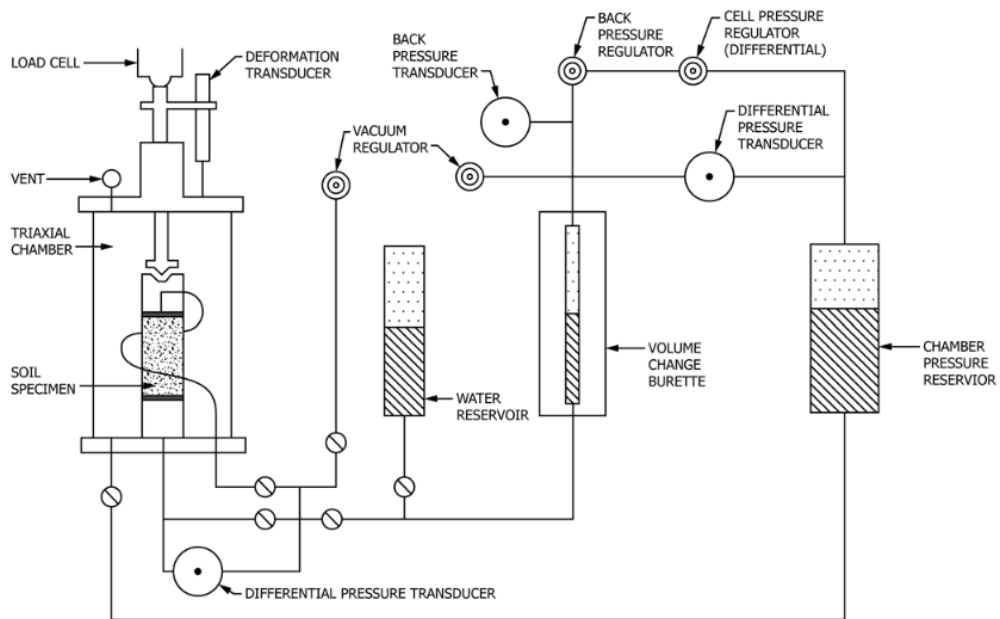
Zatěžování může probíhat staticky, nebo cyklicky. Píst se může pohybovat v závislosti na měřené deformaci, nebo napětí. V případě běžných triaxiálních zkoušek se píst pohybuje s konstantním nárůstem deformace. U cyklických zkoušek je upřednostňován pohyb v závislosti na působícím napětí. V praktické části jsem zkušební vzorky dle norem ČSN EN 13286-7 a AASHTO T 307 zatěžoval podle stanovených drah napětí.

Během sycení a konsolidace na těleso působí komorový a zpětný tlak. Během následné smykové zkoušky působí komorový tlak a u konsolidované neodvodněné (CU) je měřen pórový tlak. Komorový a zpětný tlak působí na vzorek stlačenou kapalinou, kdy její zdroj je různý dle vybavenosti triaxiálního přístroje.

#### **4.1.4. Měřicí zařízení**

Během zkoušky je potřeba měřit veličiny zmíněné v kapitole triaxiálních zkoušek (Obr. 25).

- Osové zatížení
- Osové přetvoření
- Komorový tlak
- Pórový tlak
- Objemové změny

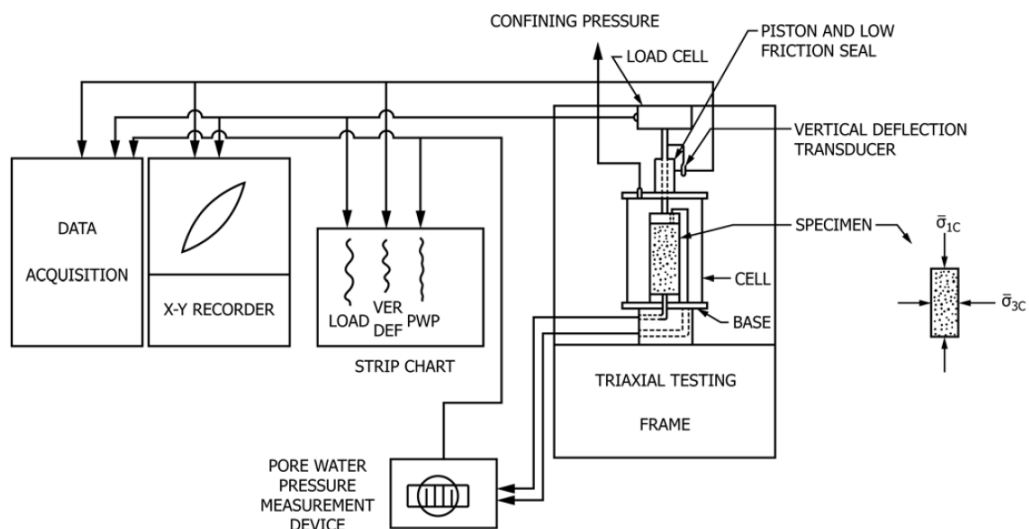


Obr. 25 Schéma triaxiálního přístroje [4]

Měřidlo osového zatížení je umístěno na pístu vně, nebo uvnitř triaxiální komory. Osová deformace se může měřit snímačem typu LVDT, nebo potenciometrem připevněným na zatěžovací píst. Mezi další měřené hodnoty zatížení patří komorový a pórový tlak. Změna objemu se měří na základě přitečené a odtečené vody v objemoměru. [12]

#### 4.2. Dynamický triaxiální přístroj

Skladba přístroje pro cyklické zatěžování vychází z triaxiálních přístrojů pro konsolidované neodvodněné zkoušky (CU) (consolidated undrained), resp. konsolidované odvodněné zkoušky (CD) (consolidated drained) (Obr. 26). [3] [5]



Obr. 26 Schéma dynamického triaxiálního přístroje [3]

Dynamický triaxiální přístroj Wykeham Farrance DYNATRIAX EmS je součástí vybavení laboratoře katedry železničních staveb na Fakultě stavební ČVUT (Obr. 27). Mezi produkty společnosti Wykeham Farrance patří laboratorní přístroje ke zkouškám zemin, jako jsou například krabicové smykové a triaxiální přístroje (Obr. 28). Společnost spadá pod skupinu Controls Group, jejíž produkty zkušebních zařízení zahrnují široké využití ve stavebním oboru. [36]

Zkouška v přístroji může probíhat jako statická, nebo dynamická. Zatěžovací parametry a vybavení odpovídají výše zmíněným parametrům triaxiálních zkoušek. Základní parametry zkušebního zařízení jsou shrnuty níže (Tab. 7). [20]

Tab. 7 Parametry dynamického triaxiálu [20]

Statické zatěžování			Dynamické zatěžování		Měření
Osově zatížení	Komorový tlak	Zpětný tlak	Osově zatížení	Frekvence	Frekvence
kN	kPa		kN	Hz	
15	1 000	1 000	10	10	10 000



Obr. 27 Dynamický triaxiální přístroj

Triaxiální přístroj se skládá ze zatěžovacího lisu společně se zatěžovacím rámem, triaxiální komory, zdroje komorového a zpětného tlaku, snímačů osově deformace, snímačů pórového tlaku, objemového měřícího zařízení a ovládacího kompaktního dynamického kontroléru.



Obr. 28 Wykeham Farrance DYNATRIAX EmS [20]

#### 4.2.1. Ovládání

Zkušební zařízení je ovládáno prostřednictvím počítače s nainstalovaným softwarem Microsoft Windows 10 (Obr. 29). Pomocí programu se řídí a kontroluje celá cyklická zkouška.



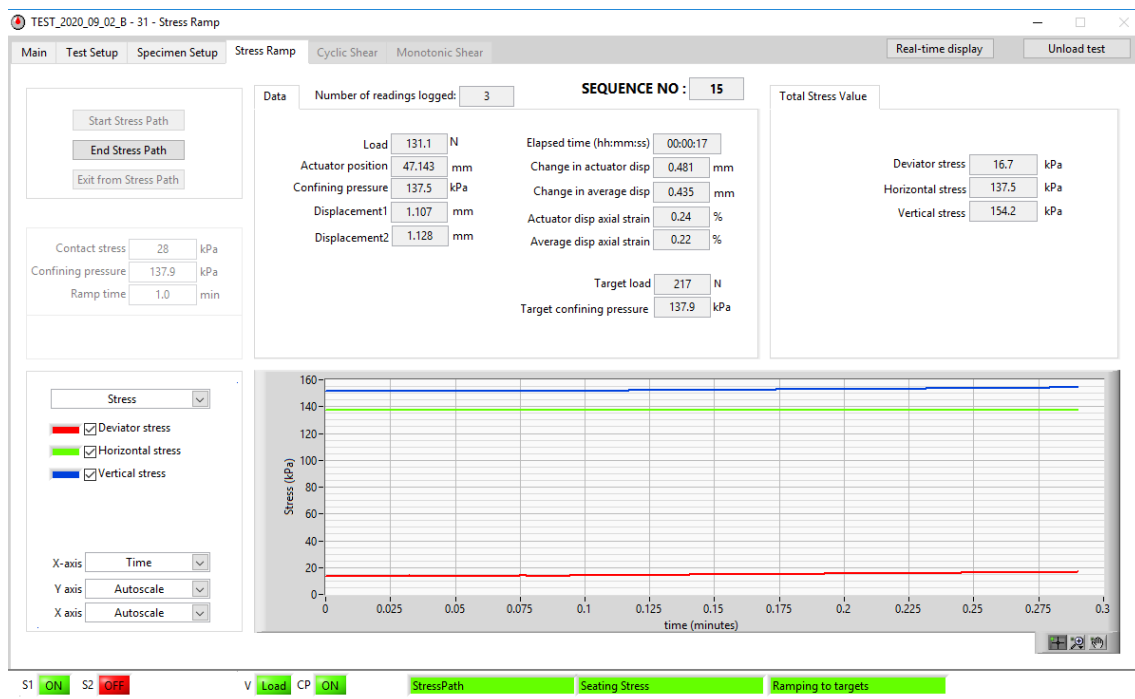
Obr. 29 Kompaktní dynamický kontrolér a zdroj

Řídící jednotka dynamického triaxiálu ovládá působící osově zatížení, zpětný tlak a komorový tlak. K jednotce jsou připojeny měřící zařízení, ventily a zatěžovací zařízení. Kontrolér je ovládán ze stolního počítače. Zatěžovací píst je ovládán svým zdrojem, který je připojen ke kompaktnímu dynamickému kontroléru. V následujících odstavcích popisují varianty ovládacích softwarů k provedení cyklických zkoušek. [33]

#### **Resilient Modulus**

Zkouška resilient modulus je prováděna za pomoci integrovaného softwaru založeného na zkušebním postupu dle AASHTO T 307. Software má v sobě předdefinované zatěžovací sekvence pro zemní pláň a podkladní vrstvy dle výše zmíněné normy. Za pomoci tabulkového editoru je možné předdefinovat jiné dráhy napětí, např. dle ČSN EN 13286-7.

Zatěžování se skládá z fáze kondicionování, kdy je vzorek zatížen vyšším počtem cyklů s cílem eliminace nežádoucích plastických deformací. Následuje určitý počet sekvencí, dle AASHTO T 307 je počet sekvencí roven 15. Během každé sekvence působí konkrétní komorový tlak a cyklické osově napětí. K navýšení nebo snížení napětí na počáteční hodnoty další sekvence dochází v mezifázích (Obr. 30). Zkouška má stejný počet cyklických fází a mezifází.



Obr. 30 Působící hlavní napětí během mezifáze

V průběhu zkoušky jsou znázorňovány jednotlivé aktuální měřené hodnoty. V případě cyklické fáze se navíc zobrazují amplitudy měřených hodnot během každého cyklu (Obr. 31).

#### Mezifáze (aktuální hodnoty)

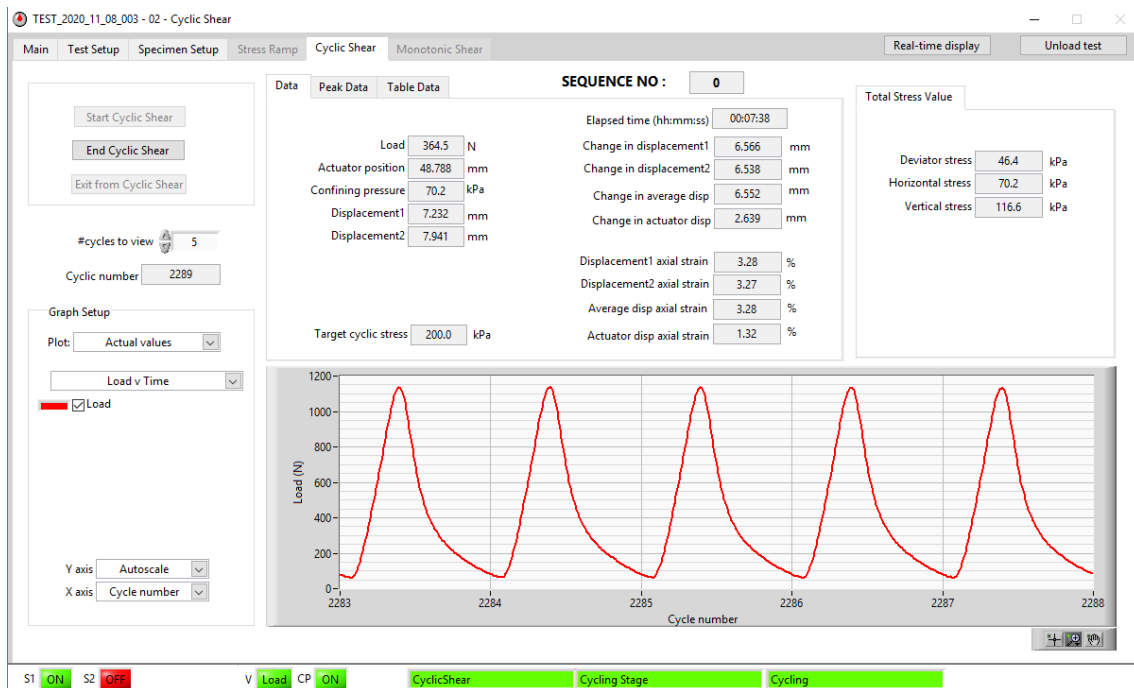
- Komorový tlak
- Osová síla
- Hlavní napětí
- Posun
- Přetvoření

#### Cyklická fáze (aktuální hodnoty a amplitudy)

- Komorový tlak
- Osová síla
- Posun

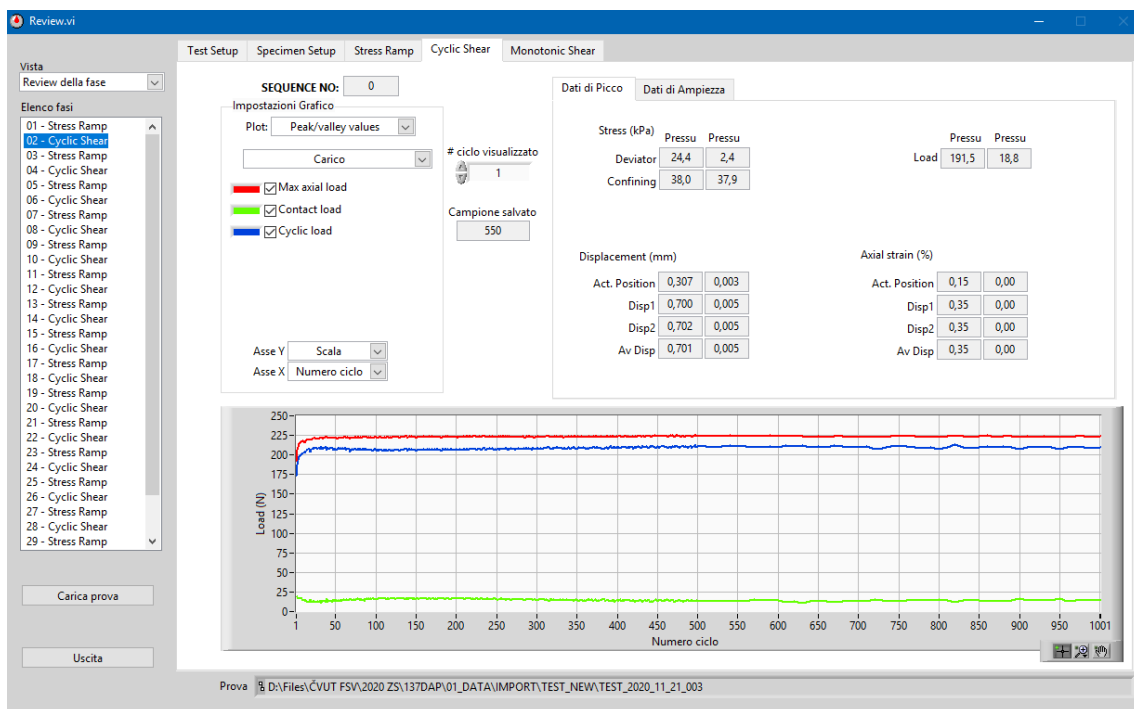
#### Cyklická fáze (amplitudy)

- Osové napětí
- Přetvoření
- Resilient Modulus



Obr. 31 Působící osová síla během cyckické fáze

Výstupem ze zkoušky je tst soubor, který lze následně otevřít v softwaru Resilient Modulus (Obr. 32). Data jsou dále ukládána do txt souborů. Za každou mezifázi je uložen jeden textový soubor s naměřenými hodnotami. Za cyckickou fází je vždy uložen soubor s celkovými hodnotami a amplitudami.



Obr. 32 Působící osová napětí během cyckické sekvence

## Dynatriax

Zkouška sestává ze saturace, konsolidace a následné cyklické zkoušky. Software je vhodný i pro běžnou smykovou zkoušku. Během saturace se měří změna pórového tlaku a stanovuje se koeficient B. Dle koeficientu B se určí, kdy je vzorek plně saturovaný. Během fáze konsolidace se zaznamenává změna objemu vzorku. Konsolidace se může provádět jako izotropní, nebo anizotropní.

Následná cyklická zkouška probíhá v souladu s normami ASTM D5311 a ASTM D3999. Cyklické zkoušky dle druhého jmenovaného programu nebyly prováděny. Praktická část diplomové práce je zaměřena na měření pružného chování zeminy užitím softwaru Resilient Modulus. V rámci přílohové části jsem připravil popis jednotlivých částí softwaru Resilient Modulus. Přehled výstupních hodnot z textových souborů jsem znázornil pro software Resilient Modulus a Dynatriax (Tab. 8).

Tab. 8 Přílohy teoretické části

Příloha		Skupina	Část
D	1	Dynamický triaxiální přístroj	Software Resilient Modulus
	2		Výstupní hodnoty

### 4.2.2. Zkušební zařízení

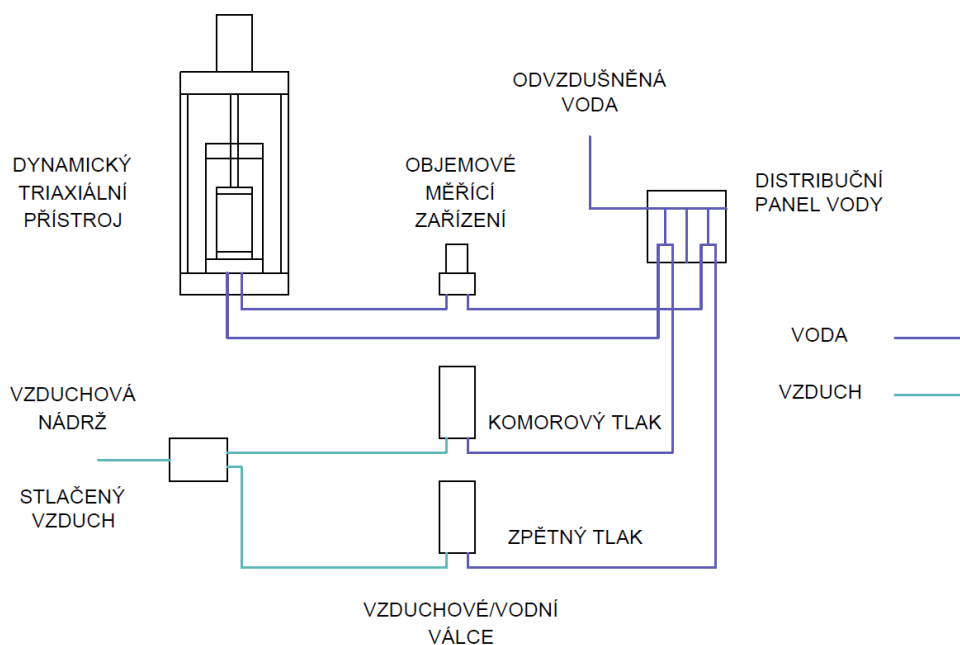
Zatěžovací píst je schopen vyvinout sílu 10 kN při statickém a  $\pm 15$  kN při dynamickém zatěžování. Píst je umístěn na robustním dvousloupovém rámu (Obr. 33). Maximální vertikální posun, kterého lze dosáhnout, je  $\pm 50$  mm. Při cyklickém zatěžování je možné operovat s frekvencí maximálně 10 Hz. Součástí je snímač vertikálního posunu. Průběh zatěžování může probíhat s řízenou deformací, nebo silou. Elektromechanický servo pohon nepotřebuje žádné přídatné hydraulické zařízení. [33]





Obr. 33 Zatěžovací píst a triaxiální komora

Komorový a zpětný tlak působí prostřednictvím vzduchového a vodního systému (Obr. 34). Objemové měřící zařízení sestává z komory vyplněné vodou a pístu (Obr. 35). Proudem vody dojde k pohybu pístu, který je zaznamenán měřícím zařízením. Výstupem je odpovídající objem vyteklé vody. [33]



Obr. 34 Schéma dynamického triaxiálního přístroje



Obr. 35 Objemové měřicí zařízení

Vzduchová nádrž se nachází mezi vzduchovým kompresorem a navazujícím tlakovým systémem triaxiálního přístroje. Součástí jsou měřicí zařízení tlaku a ovládací ventily od zpětného tlaku, komorového tlaku a tlaku vzduchu ze vzduchového kompresoru (Obr. 36). Během cyklického zatěžování se musí udržovat tlak v komoře a vzorku konstantní. Měnicí se hodnota objemu vzduchu je vyrovnávána právě ve vzduchové nádrži. Maximální tlak v nádobě je 1 000 kPa a objem nádoby je 5 litrů. [33]

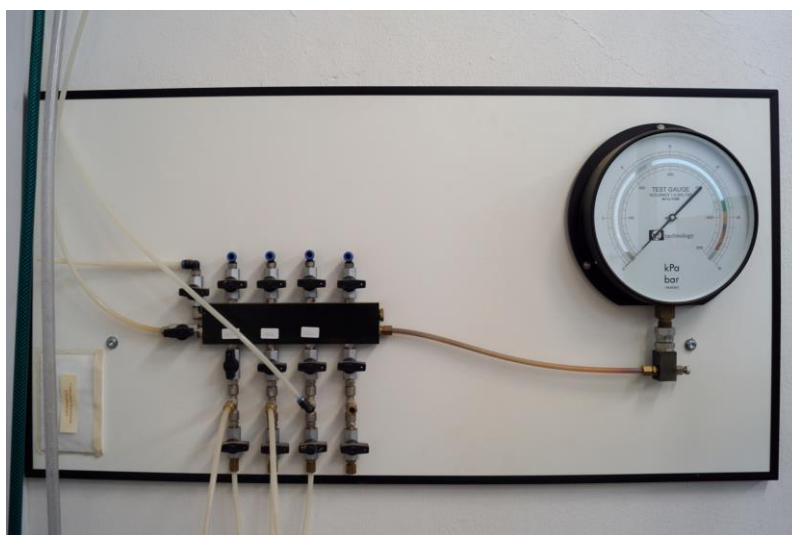


Obr. 36 Vzduchová nádrž



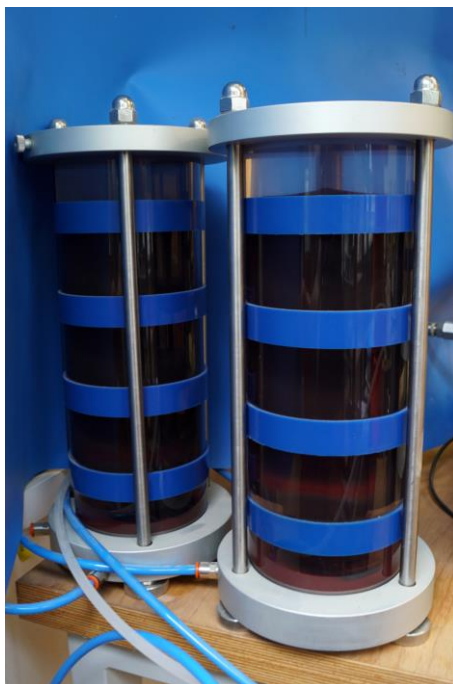
Obr. 37 Odvzdušňovací nádrž

Působícím komorovým a zpětným tlakem se zatěžuje zkušební vzorek v triaxiální komoře. K vyplnění komory a saturaci vzorku, která předchází následné konsolidaci, lze využít pouze odvzdušněné vody. Proces probíhá v odvzdušňovací nádrži, která je napojena na zdroj čisté vody a vzduchovou pumpu (Obr. 37). Odvzdušněná voda teče přes panel s ventily do distribučního panelu vody a následně do systému dynamického triaxiálního přístroje (Obr. 38). V laboratoři je odvzdušňovací zařízení společné s klasickým triaxiálním přístrojem.



Obr. 38 Panel s ventily

Z již zmíněných parametrů přístroje vychází maximální dosažitelný tlak rovný 1 000 kPa. Vzduchové, resp. vodní válce mají funkci rozhraní mezi stlačeným vzduchem a kapalinou (Obr. 39). Vodní distribuční panel slouží k rozvodu vody ze zdroje odvzdušněné vody do triaxiální komory (Obr. 40). [35]



Obr. 39 Vzduchové/vodní válce



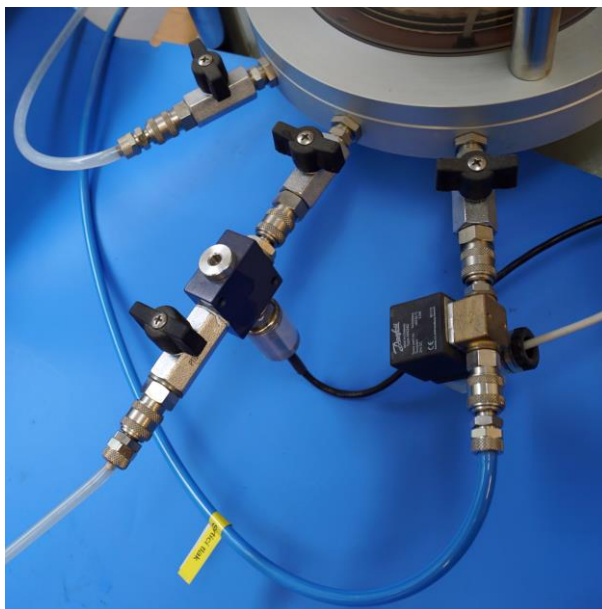
Obr. 40 Distribuční panel vody

Triaxiální komora se vkládá do zkušebního zařízení (Obr. 41). Spodní podstava komory je opatřena celkem pěti ventily (Obr. 42). Dva ventily jsou pro zpětný tlak, dva pro pórový tlak a jeden pro komorový tlak. Na podstavu komory je připevněna podstava vzorku. Na vrchní podstavě vzorku působí zatěžovací píst. Spodní podstava vzorku je napojena na zpětný tlak z podstavu triaxiální komory. Svrchní podstava je napojena hadičkou.



Obr. 41 Triaxiální komora

Za pomoci elektromagnetických ventilů lze automaticky otevírat a zavírat vedení pod maximálním rozdílným tlakem 3 500 kPa. Vrchní část triaxiální komory se k podstavě připevní třemi šrouby. K triaxiálnímu zkušebnímu zařízení se komora následně připevní třemi šrouby ze spodu komory. Vnější obal komory je z průhledného plexiskla umožňující působení tlaku 2 000 kPa. [34]

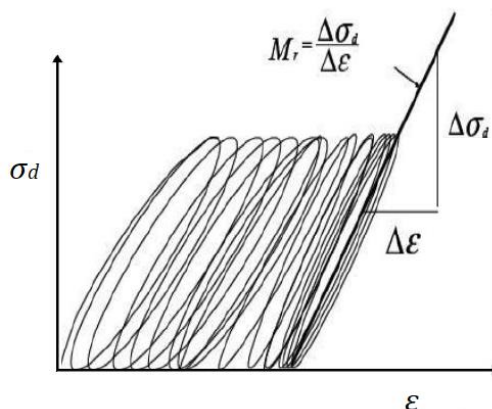


Obr. 42 Ventily na spodní podstavě

## 5. REŠERŠNÍ ČÁST

Působením železniční dopravy se na železniční těleso přenáší cyklické a statické zatížení. V teoretické části byly zmíněny všeobecné postupy běžných a cyklických triaxiálních zkoušek. Tématem rešeršní části je využití dynamického triaxiálního přístroje při analýze vrstev pražcového podloží. Mezi deformační charakteristiky, které jsou zkoumány v rámci praktické části, patří resilient modulus a modul pružnosti. Během zkoušky v dynamickém triaxiálním přístroji za konstantního komorového tlaku působí cyklické osově napětí.

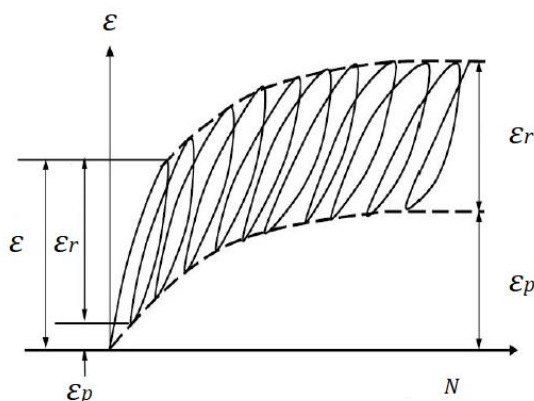
Hodnota resilient modulus se určí na základě postupu dle AASHTO T 307 a modul pružnosti podle ČSN EN 13286-7. Moduly jsou poměrem mezi cyklickým deviatorem napětí a pružným osovým přetvořením (Obr. 43). Vzorek zeminy se během cyklického zatěžování pružně přetváří při minimálních deformacích. Vzájemně se cyklické zkoušky pružného chování materiálu odlišují v hodnotách aplikovaného napětí a celkovém počtu cyklů. [6] [9]



Obr. 43 Průběh osového napětí v závislosti na deformaci [31]

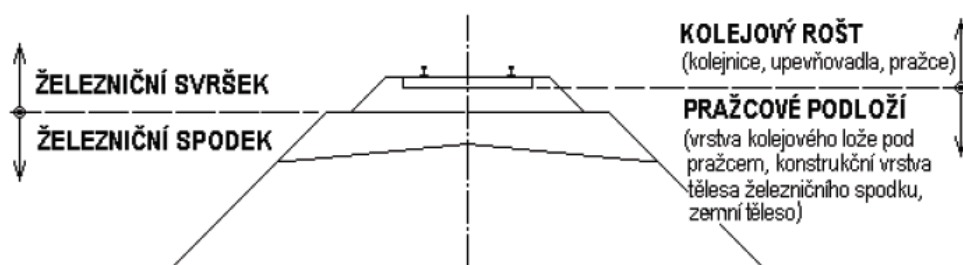
Zkoušky se skládají z počáteční a následné zkušební fáze. Během počáteční fáze se eliminují nežádoucí jevy a stabilizuje trvalá deformace. Těleso by se následně mělo chovat elasticky (Obr. 44). Během zkušební fáze na těleso působí několik úrovní napětí a stanovuje se resilient modulus, resp. modul pružnosti. Podrobný popis zkušebních postupů je uveden v praktické části. [6] [9]

Cyklický resilient modulus a modul pružnosti jsou hodnoty proměnné v závislosti na působících hlavních napětích, typu zeminy a její vlhkosti. Vztah pružné deformace a cyklického napětí je podobný jako u statického modulu pružnosti. Statický modul pružnosti, který byl zmíněn v teoretické části, je poměrem aplikovaného napětí a pružného přetvoření, kdy je statické zatížení aplikováno s pomalým nárůstem. Během cyklického zatěžování dochází k rychlému přitěžování a odtěžování. Schopnost materiálu přetvářet se pružně představuje jeho tuhost. [16]



Obr. 44 Průběh deformace v závislosti na počtu cyklů [31]

Železniční těleso se dělí na železniční svršek a spodek (Obr. 45). Druhé používané rozdělení je na kolejový rošt a pražcové podloží. V úvodu bylo uvedeno, že pražcové podloží je složeno z kolejového lože, konstrukčních vrstev a zemního tělesa. [14]



Obr. 45 Železniční těleso [14]

V závislosti na skladbě tělesa železničního spodku rozeznáváme dle současného předpisu SŽDC S4 6 typů konstrukcí pražcového podloží. Pod vrstvou kolejového lože, která je součástí železničního svršku, se používají následující konstrukce: [14]

1. Zemní pláň: nesoudržná, propustná, nenamrzavá zemina
2. Konstrukční vrstva, zemní pláň: soudržná, nebo nesoudržná zemina
3. Konstrukční vrstva, geosyntetika, zemní pláň: soudržná, nebo nesoudržná zemina
4. ŽB deska, písek, geotextilie, zemní pláň: soudržná zemina
5. Asfaltový beton, písek, zemní pláň: zvětralá hornina
6. Konstrukční vrstva, stabilizovaná vrstva nebo zemní pláň: stabilizovaná, nebo zlepšená zemina

Svrchní vrstva zemního tělesa, jak bylo popisováno na počátku teoretické části, se označuje jako zemní pláň. Rešeršní část je dále členěna na analýzu pražcového podloží na zemní pláni a konstrukčních vrstvách. Vybrané části lze zkoumat u obou částí pražcového podloží a tyto poznatky jsou dále uvedeny.

## 5.1. Zemní pláň

Zemní pláň může být tvořena horninami, zeminami jemnozrnnými, písčitymi a štěrkovými (Obr. 46). Na základě únosnosti, typu zemní pláně a účinků mrazu se navrhuje skladba pražcového podloží. Provedení cyklické triaxiální zkoušky je časově a technicky náročné. Dle ČSN 73 6133, která se zabývá zemním tělesem pozemní komunikace, mezi průkazní zkoušky pevnostních charakteristik zemin patří kalifornský poměr únosnosti CBR, okamžitý index únosnosti IBI, triaxiální smyková zkouška a krabicová smyková zkouška. Na normu se odkazuje stávající železniční předpis SŽDC S4 z roku 2008. Zkouška pevnosti v prostém tlaku je odvozená z neodvodněné nekonsolidované triaxiální zkoušky a provedl jsem ji v rámci své praktické části. V řadě studií byl resilient modulus odvozen z fyzikálních parametrů a pevnostních charakteristik zemin. [14] [40]



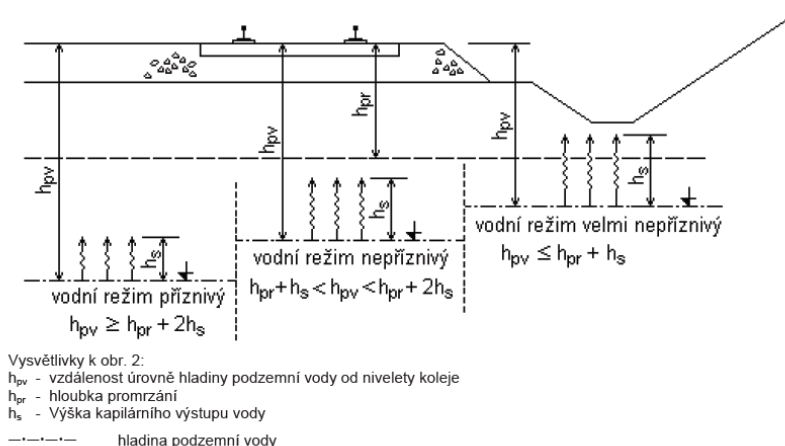
Obr. 46 Zemní pláň v ŽST Beroun

V dalších kapitolách je popisován vztah resilient modulu na kalifornském poměru únosnosti CBR a pevnosti v prostém tlaku. Kalifornský poměr únosnosti CBR a pevnost v prostém tlaku jsou pevnostními charakteristikami zemin. Resilient modulus a modul pružnosti jsou deformačními charakteristikami závislými na aktuálním působícím napětí. Z těchto důvodů je obtížné prokázat vztah mezi danými veličinami. Při špatné předpovědi resilient modulu by mohlo nastat předdimenzování, nebo poddimenzování konstrukce pražcového podloží. [28]

Zemní pláň je ovlivňována působením počasí v oblasti kolejového lože a účinky hladiny podzemní vody v zemním tělese (Obr. 47). Během roku je zemina vystavena rozdílným teplotám a vlhkosti. Vlhkost má výraznější vliv na jemnozrnné zeminy. V případě špatně odvodněné jemnozrnné zemní pláně



lze očekávat zvýšené deformace pražcového podloží. Na výsledné hodnotě modulu má vliv podíl jemných částic, vlhkost a působící zatížení.



Obr. 47 Vodní režim zemní pláně [14]

### 5.1.1. Matematické modely

Ze znalosti hlavních napětí, resp. komorového tlaku a osového zatížení byla stanovena řada modelů pro stanovení resilient modulu. Semi-logaritmický model je založen na hodnotě deviátoru napětí, materiálových charakteristikách a je určen pro jemnozrné zeminy. Materiálové charakteristiky vychází z typu zeminy a jejích vlastností. Mezi další příklady uvažující jako proměnnou deviační napětí lze uvést bilineární a exponenciální model. [21]

Semi-logaritmický model

$$\log(M_r) = k_1 - k_2 * \sigma_d$$

Bilineární model

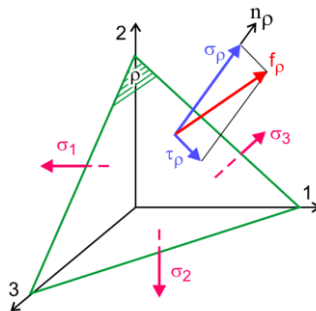
$$M_r = k_3 + k_4 * \sigma_d$$

Exponenciální model

$$M_r = k_7 * \sigma_d^{k_8}$$

$\sigma_d$  – deviační napětí;  $k$  – materiálové konstanty

U výše zmíněných modelů byla proměnnou hodnotou deviátor napětí a ve vzorci se neuvažoval vliv komorového tlaku. Druhá skupina modelů vychází z oktaedrického normálového a tangenciálního napětí. Normála oktaedrické roviny svírá se všemi osami hlavních napětí stejný úhel (Obr. 48). Oktaedrická napětí se vypočtou z hlavních napětí. Následující matematický model je určen pro jemnozrné zeminy a obsahuje materiálové konstanty. [19] [21]



Obr. 48 Oktaedrická napětí [19]

### Oktaedrická napětí

$$M_r = k_9 * \sigma_{oct}^{k_{10}} * \tau_{oct}^{k_{11}}$$

$\sigma_{oct}$  – oktaedrické normálové napětí;  $\tau_{oct}$  – oktaedrické tangenciální napětí

$k$  – materiálové konstanty

Hodnota resilient modulus je dle Mechanistic Empirical Pavement Design Guide vydaných organizací AASHTO základním parametrem při návrhu vozovky. Na základě tohoto předpokladu lze považovat resilient modulus i za základní parametr při návrhu pražcového podloží. Niže uvedená rovnice pro nepřímé určení hodnoty resilient modulu je vhodná pro všechny typy zemin a vzorec by měl být uveden ve výše zmíněném návodu. [29]

### Resilient modulus a působící napětí

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2} + \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

$P_a$  – atmosférický tlak;  $\sigma_d = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ;  $\tau_{oct}$  – oktaedrické tangenciální napětí

$k$  – materiálové konstanty

Cílem práce na univerzitě v Melbourne [21] bylo stanovení resilient modulu během zkoušky cyklickým zatěžováním a vytvoření matematického modelu, který bude korespondovat s naměřenými hodnotami. Pro zkoušku byly vybrány čtyři vzorky jemnozrnných zemin. Zkouška resilient modulu začínala fází kondicionování a následovala zkušební fází s 15 úrovněmi napětí. Během přípravné fáze působilo cyklické zatížení 10 000 cyklů a během zkušební fáze vždy 200 cyklů na každou sekvenci. Použité hodnoty deviátoru napětí byly stanoveny procentuálně k pevnosti z nekonsolidované neodvodněné (UU) triaxiální zkoušky a pevnosti v prostém tlaku. Působením odpovídajícího deviátoru napětí se zamezí porušení vzorku během cyklické zkoušky.

Analýza naměřených dat a výsledná rovnice vychází z regresní analýzy. Zvolená rovnice navazuje na původního semi-logaritmický model doplněný o vliv působícího komorového tlaku. [21]

Upravený semi-logaritmický model

$$\log\left(\frac{M_r}{P_a}\right) = k_1 + k_2 * \frac{\sigma_d}{P_a} + k_3 * \frac{\sigma_3}{P_a}$$

$P_a$  – atmosférický tlak;  $\sigma_d$  – deviační napětí;  $\sigma_3$  – komorový tlak;  $k$  – materiálové konstanty

### 5.1.2. Pevnost v prostém tlaku

Zkouška pevnosti v prostém tlaku (unconfined compressive strength) jemnozrnných zemin probíhá stlačováním vzorku zeminy v lisu až do porušení nebo dosažení 15 % poměrného přetvoření v axiálním směru v souladu s ČSN CEN ISO/TS 17892-7. Na těleso působí pouze osová síla s konstantním nárůstem deformace. Z hodnoty pevnosti v prostém tlaku lze přímo stanovit resilient modulus. Vzorce s materiálovými konstantami a proměnnými hodnotami vycházejících ze zkoušky pevnosti prostém v tlaku jsou uvedeny níže. Mezi sledované parametry během pevnostní zkoušky může kromě pevnosti v prostém tlaku  $q_u$  patřit napětí při 1 % přetvoření  $S_{1\%}$  a tangenciální modul  $E_i$  (Obr. 49). [13] [29]

Výpočet z pevnosti v prostém tlaku

$$M_r = a * q_u + b$$

Výpočet z odvozených veličin pevnosti v prostém tlaku

$$M_r = k_1 * S_{1\%} - k_2 * S_{1\%}^2; M_r = k_3 + k_4 * E_i$$

Rovnice zanedbávají vliv působícího napětí obdobně jako u vzorce Kalifornského poměru únosnosti. Dle zmíněného výzkumu na univerzitě v Melbourne [21] byla provedena úprava rovnice zavedením deviátoru napětí a konstant odvozených z regresní analýzy.

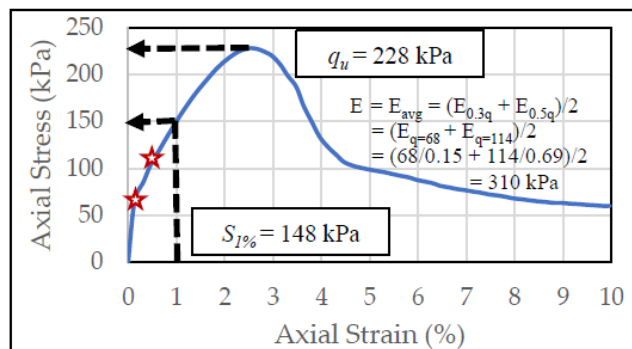
Výpočet z pevnosti v prostém tlaku a deviátoru napětí

$$M_r = a * \frac{\sigma_d}{q_u} + b * q_u - c * \sigma_d - d$$

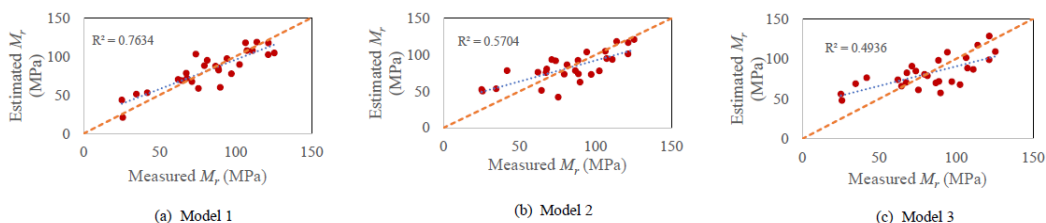
Výzkum zpracovaný univerzitou v Jižní Kalifornii [29] měl za cíl stanovit vztah mezi zkouškou resilient modulu a pevnosti v prostém tlaku. Pro zkoušky bylo vybráno celkem 7 vzorků písčitých zemin. Při třech zvolených vlhkostech, resp. optimální a o  $\pm 2$  % od optimální vlhkosti bylo zkoušeno celkem 21 vzorků. Zkouška byla provedena v souladu s AASHTO T 307.

Naměřené hodnoty byly analyzovány lineární regresí (Obr. 50). Z analýzy vstupních a výstupních parametrů vyšlo najevo, že z fyzikálních vlastností má na resilient modulus vliv vlhkost vzorku, optimální vlhkost, maximální suchá objemová hmotnost a suchá objemová hmotnost vzorku. Společně

s tangenciálním modulem  $E_i$  se jednalo o nejlépe fungující matematický model. Nárůst optimální vlhkosti a aktuální vlhkosti má vliv na snížení resilient modulu. Na navýšení mají vliv zbylé zmíněné parametry. Ostatní modely využívající kombinaci zbylých pevnostních parametrů nebyly dostatečně přesné. [29]



Obr. 49 Veličiny zkoušky pevnosti v prostém tlaku [29]



Obr. 50 Korelace mezi resilient modulem a pevností v prostém tlaku [29]

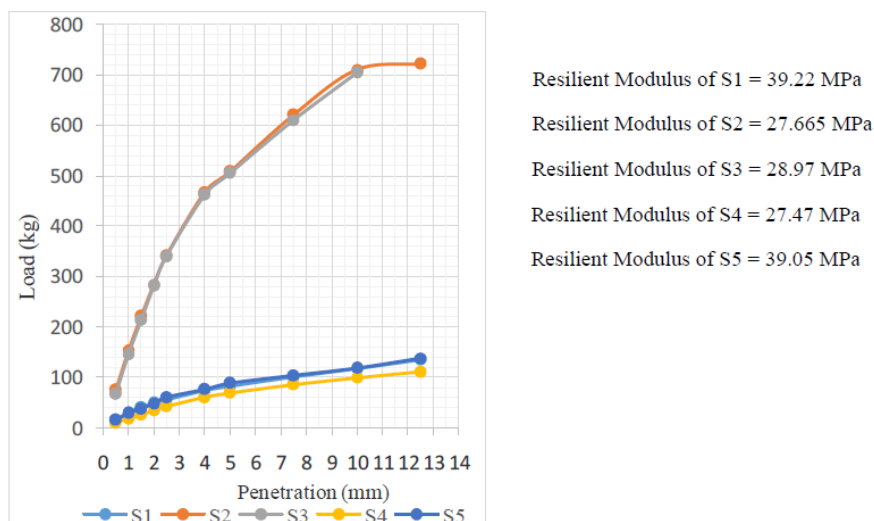
### 5.1.3. Kalifornský poměr únosnosti

Kalifornský poměr únosnosti se rovná poměru síly při zatlačení penetračního hrotu do předepsané hloubky vzorku zeminy vůči síle při srovnatelném zatlačení u normovaného kameniva. Zkouška CBR (California Bearing Ratio) se provádí v souladu s ČSN EN 13286-47. Vzorek je zatěžován s konstantním nárůstem deformace. Určení deformačního parametru resilient modulus ze statického pevnostního CBR lze dle následující rovnice. Vliv rozdílného působícího napětí na výsledný modul zde není zahrnut. [10] [21]

Výpočet z CBR

$$M_r = k * CBR$$

Výzkum v Melbourne [21] užití lineární rovnice obsahující CBR nedoporučil. Jisté články souhlasí s tvrzením, že lze resilient modulus stanovit z CBR. Cílem práce na Rajalakshmi Engineering College v Indii [28] bylo stanovení vztahu mezi resilient modulem a kalifornským poměrem únosnosti CBR. V rámci zkušební fáze bylo připraveno 5 odlišných vzorků písčité zeminy. Postupně byly podrobeny zkoušce CBR a cyklické triaxiální zkoušce (Obr. 51).



Obr. 51 Změřený resilient modulus a CBR [28]

Vzorky S2 a S3 byly klasifikovány jako SW (písek dobře zrněný). Jejich výsledky CBR jsou výrazně vyšší než zbylých vzorků. Ostatní vzorky byly klasifikovány jako SM a SC (písek hlinitý a jílovitý). Korelace výstupních dat byla rozdělena dle typu písčité zeminy a odpovídají provedené zkoušce CBR (Obr. 52). Výzkum ověřil možnost využití zmíněného vzorce s lineární funkcí. [28]

Group	Soil Sample	Soaked CBR (%)	M <sub>R</sub> (MPa)	Correlation between M <sub>R</sub> and soaked CBR	C	Avg. C
Group I (SC & SM soil)	S1	4.04	39.22	M <sub>R</sub> =(9.71)*CBR	9.71	8.95
	S4	3.35	27.47	M <sub>R</sub> =(8.2)*CBR	8.2	
	S5	4.37	39.05	M <sub>R</sub> =(8.94)*CBR	8.94	
Group II (SW)	S2	24.9	27.665	M <sub>R</sub> =(1.11)*CBR	1.11	1.14
	S3	24.79	28.97	M <sub>R</sub> =(1.17)*CBR	1.17	

Obr. 52 Korelace mezi resilient modulus a CBR [28]

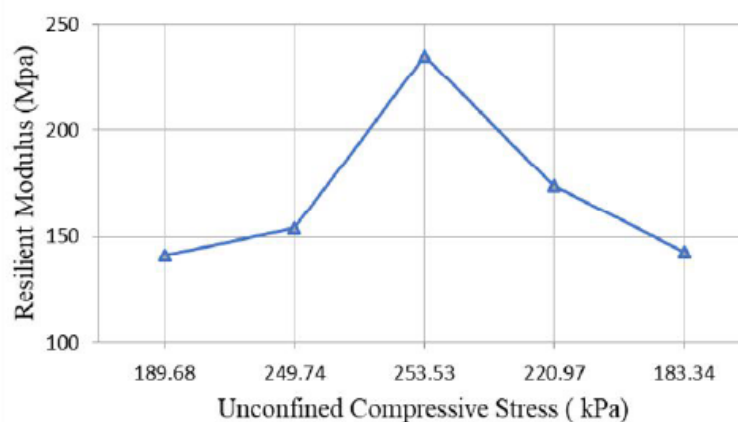
#### 5.1.4. Vlhkost

Rozdílná vlhkost vzorku má obdobně jako u jiných zkoušek vliv na výslednou hodnotu resilient modulu. Vzorky neporušené se zkouší při přirozené in situ vlhkosti. Zkušební vzorky připravené zhuštěním se mohou zkoušet při in situ nebo optimální vlhkosti. Při optimální vlhkosti dosahuje zemina své maximální suché objemové hmotnosti. Mnohdy je vhodné připravit zeminu i na vlhkosti blízké optimální vlhkosti. U triaxiálních zkoušek bylo v teoretické části zmíněno, že se zemina před konsolidací saturuje za pomoci zpětného tlaku.

Na univerzitě v Batu Pahat ležící v Malajsii u hranic se Singapurem [31] probíhal výzkum vlivu rozdílné vlhkosti jemnozrnného materiálu na resilient modulu, pevnosti v prostém tlaku a modulu pružnosti, který byl stanoven během pevnostní zkoušky. Pro zkoušky jílu s vysokou plasticitou byly připraveny vzorky

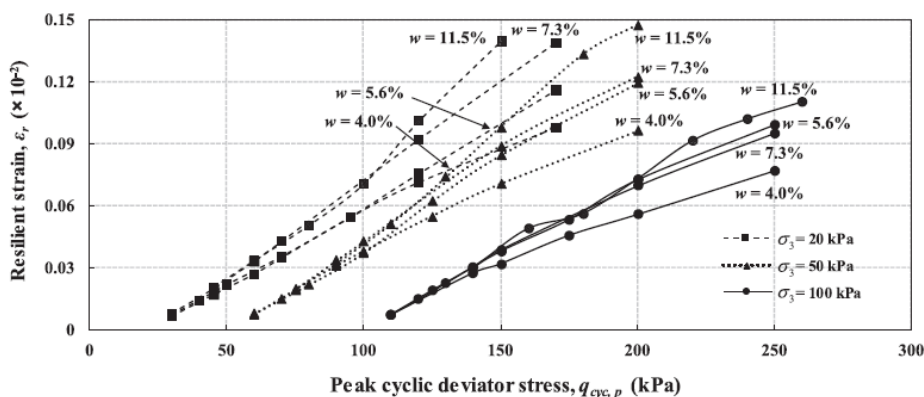
s optimální vlhkostí a další s přírůstkem  $\pm 20\%$ ,  $\pm 40\%$  optimální vlhkosti. Zkoušky resilient modulu byly provedeny v souladu s AASHTO T 307 s nižšími úrovněmi napětí, resp. úrovněmi pro zemní pláň. Resilient modul je zprůměrován z aplikovaných 15 sekvencí cyklického zatěžování. Během pevnostní zkoušky hodnota pevnosti v tlaku odpovídala nejvyšší síle aplikované během zatěžování až do 20 % přetvoření.

Z výsledků zkoušek jsou patrné vyšší hodnoty deformačních a pevnostních charakteristik při optimální vlhkosti a odpovídající maximální suché objemové hmotnosti (Obr. 53). U deformačních charakteristik je procentuální pokles odpovídající u rozdílných vlhkostí. U pevnosti v tlaku je procentuální pokles odlišný než u resilient modulu a modulu pružnosti. [31]



Obr. 53 Změřený resilient modul a pevnost v tlaku [31]

Dle výzkumu z Jižní Kalifornie [29], kde byly zkoumány písčité zeminy, bylo zjištěno, že hodnoty resilient modulu a tangenciálního modulu jsou vyšší při vlhkosti o 2 % nižší než optimální vlhkosti zemín. V následujícím výzkumu z Hongkongu [32] dosahoval resilient modul nejvyšších hodnot při optimální vlhkosti vzorku (Obr. 54).



Obr. 54 Resilient modul v závislosti na osovém napětí [32]

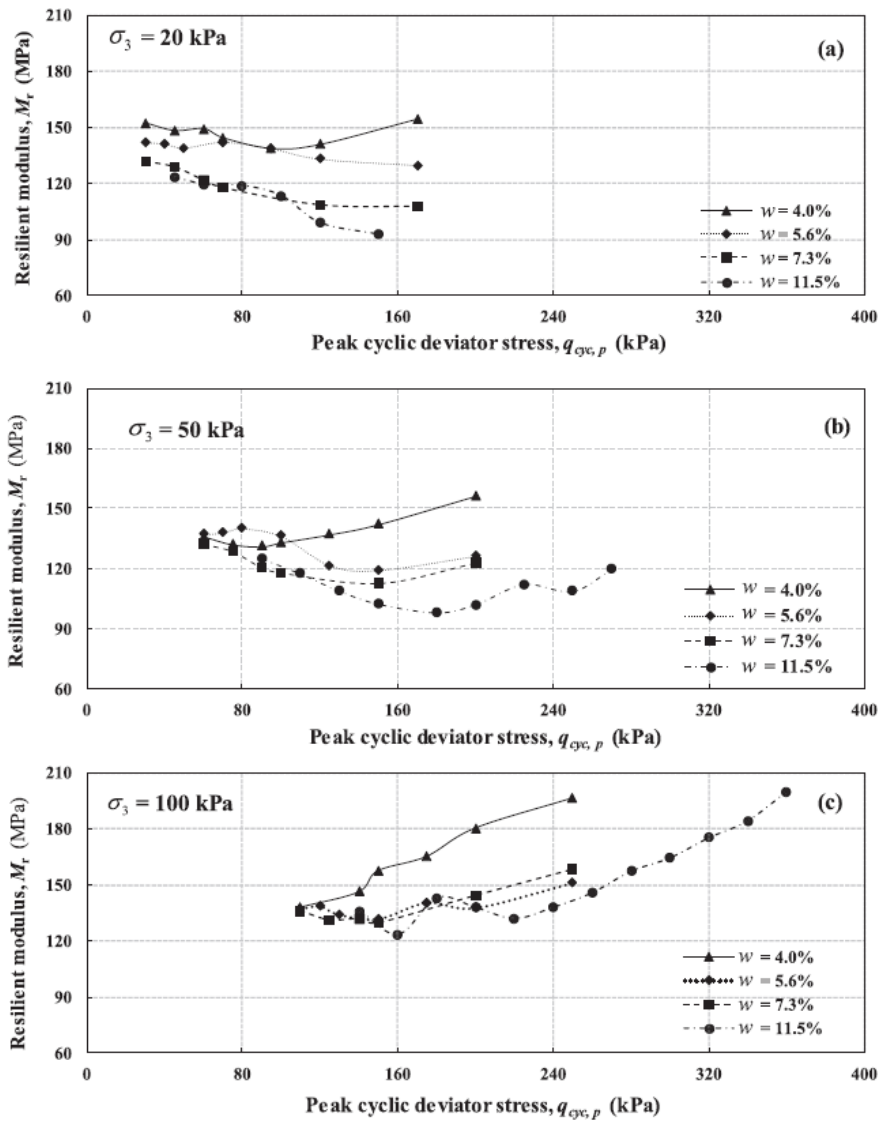
### 5.1.5. Napětí

V dynamickém triaxiálním přístroji působí na těleso komorový tlak a osově napětí. Z definice resilient modulu by mělo mít hlavní vliv na těleso osově, resp. cyklické napětí. U jemnozrnných zemin má vliv na modul především působící osově napětí, a naopak u hrubozrnných zemin komorový tlak. [32]

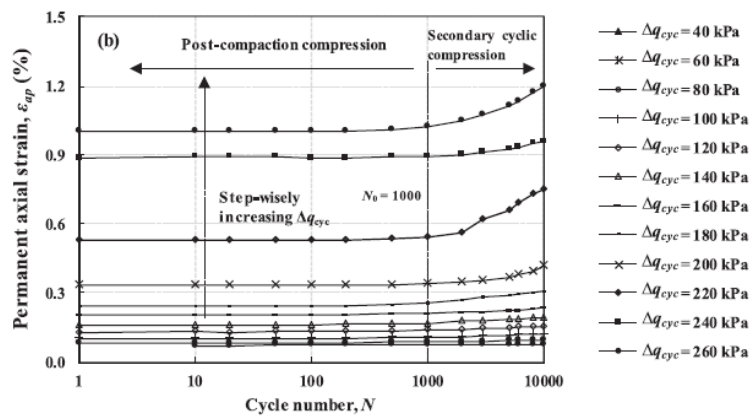
Výzkum vlivu vlhkosti a působícího napětí na počtu cyklů, během kterých dojde ke stabilizaci hodnoty resilient modulu, byl cílem práce na Hongkongské polytechnické univerzitě [32]. Pro zkoušky byla použita zemina s vysokým podílem jemnozrnných částic z výstavby VRT v provincii jižně od Šanghaje. V rámci zkoušek byly vyrobeny 4 vzorky s odlišnou vlhkostí a anizotropně konsolidovány. Jemnozrnná příměs byla klasifikována jako jíla s nízkou plasticitou. Na zkušební tělesa bylo aplikováno několik drah napětí vždy 10 000 cyklů s frekvencí 5 Hz. Způsob zatěžování odpovídal plastické zkoušce s víceetapovým zatěžováním dle ČSN EN 13286-7.

Hodnota resilient modulu byla ovlivněna jak působícím konstantním komorovým tlakem, tak cyklickým osovým napětím. Zvýšením působícího komorového tlaku dojde z postupného poklesu k nárůstu modulu v závislosti na působícím osovém napětí (Obr. 55). Z grafů je patrné, že u zvolené zeminy má osově zatížení větší vliv na resilient modul než komorový tlak. [32]

V rámci přípravné fáze zkoušky resilient modulu je vzorek cyklicky zatěžován 1 000 cyklů a při zkoušce modulu pružnosti 20 000 cyklů. Během následné pružné zkoušky působí na těleso 100 cyklů během každé zatěžovací sekvence. Navýšení působících napětí mohou způsobit nárůst plastické deformace. Z výsledků zkoušek je patrné, že k ustálení trvalé deformace dojde při vyšším počtu cyklů než uvádí norma zkoušky resilient modulu (Obr. 56). Obdobného výsledku stabilizace hodnoty resilient modulu jsem spatřil u výzkumů univerzity v Missouri [22], francouzské laboratoře [27] a technického institutu ve východní Indii [30], které byly zaměřeny na zkoušení podkladních vrstev.



Obr. 55 Resilient modulus v závislosti na působícím napětí [32]

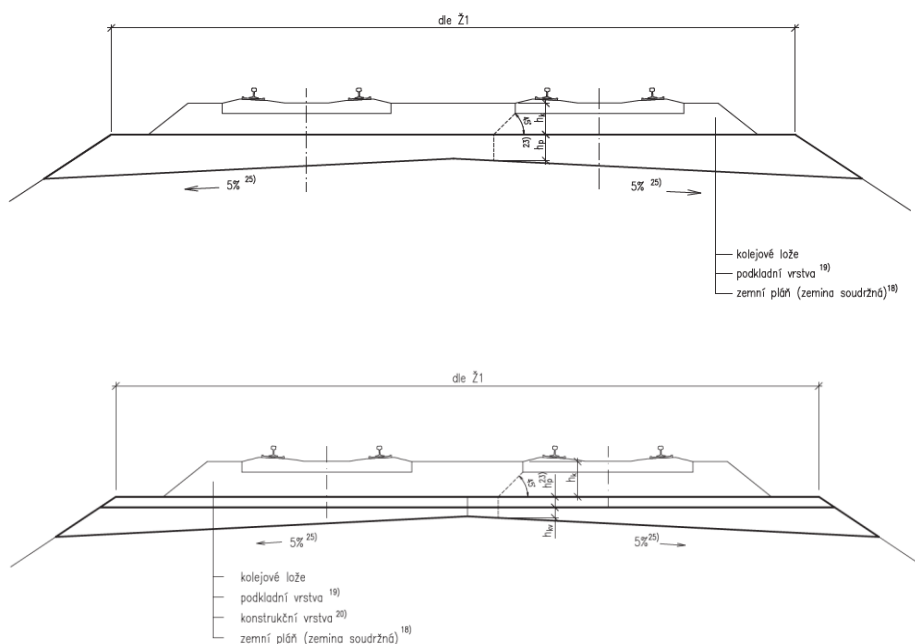


Obr. 56 Stabilizace Resilient modulu [32]



## 5.2. Konstrukční vrstvy

Konstrukční vrstvy zvyšují únosnost a zlepšují vodní režim pražcového podloží. Svrchní konstrukční vrstvou je podkladní vrstva (Obr. 57). Materiál konstrukčních vrstev by měl být nesoudržný, propustný a nenamrzavý (Obr. 58). Do konstrukčních vrstev lze navrhnout štěrkodeř, drcené kamenivo, vysokopecní strusku, nebo minerální směs. V následujících kapitolách bude pozornost věnována konstrukčním vrstvám ze štěrkodeřti a vyztužení pražcového podloží geomřížkami. [14]



Obr. 57 Pražcové podloží typu 2.1 a 2.2 [15]

Působením dopravního zatížení dochází k degradaci vrstvy. Do vrstvy čistého kameniva prostupují jemná zrna zemní pláňe a zároveň se zrna kameniva vzájemným působením drtí a obušují, čímž vzniká jemnozrnný materiál. Degradovaná vrstva se vyznačuje nižší propustností v souvislosti se zadržováním vlhkosti, snížením únosnosti, vzniku blátivých míst a nárůstem trvalých deformací.

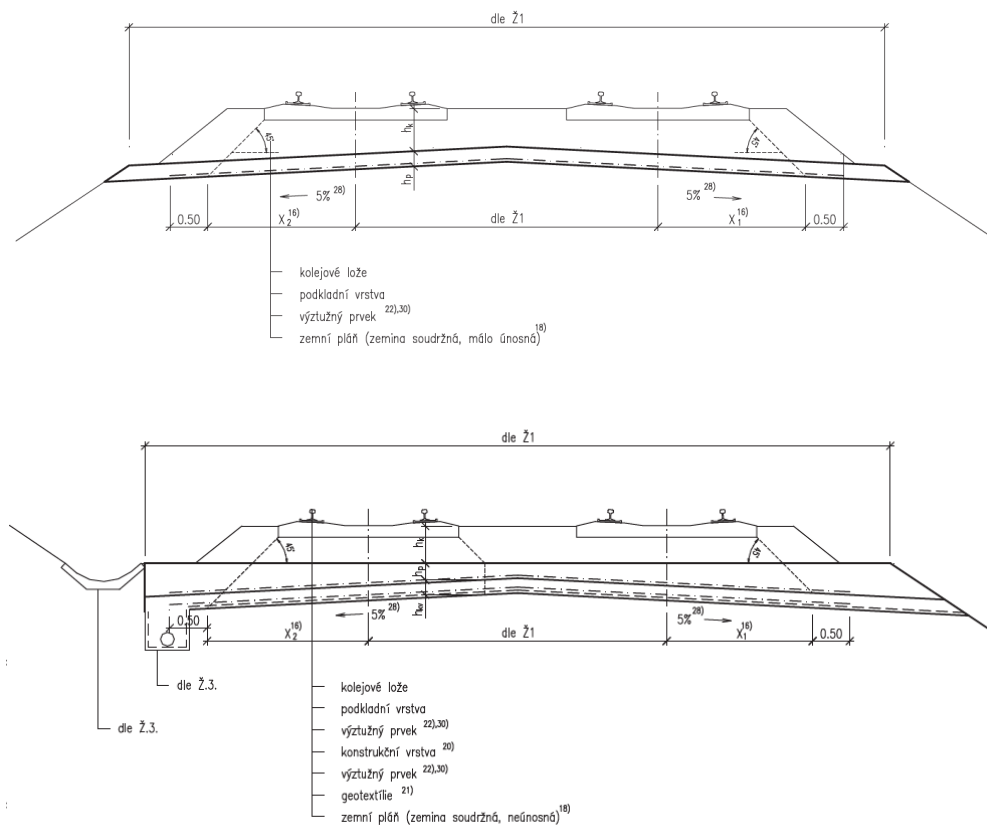


Obr. 58 Rozprostřená podkladní vrstva v zast. Praha-Eden

Výztužných geotextilií a geomřížek se využívá při zvýšení únosnosti tělesa železničního spodku. Patří sem zakládání náspů v neúnosném prostředí, rozšiřování zemního tělesa a zvyšování únosnosti pláně tělesa železničního spodku. Na vrstvě zemní pláně nebo mezi konstrukční a podkladní vrstvou lze navrhnout vyztužení geotextilií, nebo geomřížkou. Pražcové podloží, které zahrnuje výztužný prvek, je dle současného předpisu SŽDC S4 označeno jako typ 3.2, resp. 3.6 při vícevrstvé konstrukci (Obr. 59). [14]

Dle zkušebních postupů AASHTO T 307 a ČSN EN 13286-7 jsou stanoveny hodnoty hlavních napětí působících na zkušební vzorek. Dráhy napětí jsou určeny především pro podloží vozovky pozemní komunikace. Zatížení železničních tratí se v Evropě rozděluje do traťových tříd. Železniční koridory se u nás navrhují na 22,5 tun na nápravu a 8 tun na běžný metr, které odpovídají traťové třídě D4. [37]

Ve výzkumu francouzské laboratoře [27] bylo uvedeno, že při zatížení 30 tun na nápravu jsou hodnoty vertikálního napětí v podkladní vrstvě rovny 120 až 140 kPa. Dle výzkumu z institutu ve východní Indii [30] by na pláň tělesa železničního spodku mělo působit vyšší napětí mezi 250 až 500 kPa a komorový tlak 10 až 30 kPa. S rostoucí rychlostí projíždějících vlaků se zvyšuje frekvence, která působí na pražcové podloží. Působením vyšší frekvence může docházet ke vzniku trvalých deformací.

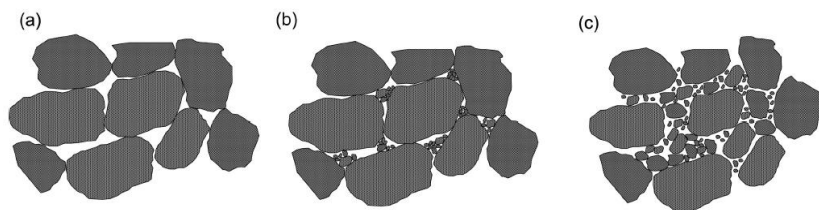


Obr. 59 Pražcové podloží typu 3.2 a 3.6 [15]

### 5.2.1. Hrubozrnné materiály

Vrstvy ze štěrkodrti se navrhují do konstrukčních a podkladních vrstev pražcového podloží. Hrubozrnný materiál se vyznačuje svou únosností, nesoudržností, propustností a odolností proti mrazu. Nový štěrk, resp. štěrkodrt' je charakteristická svou ostrohranností, kdy následnou degradací a recyklací se zrna otlučou. Recyklovaná štěrkodrt' má nižší pórovitost a je tedy nutný nižší podíl jemné frakce k pokrytí zrn. [24]

V případě že je štěrk znečištěn, ale zrna kameniva na sebe vzájemně působí, nedochází ke snížení pevnosti. Zvětšením pórů se mezi kontaktní plochy zrn kameniva dostanou jemnozrnné částice, které výrazně ovlivňují a snižují výslednou pevnost (Obr. 60). Během cyklického zatěžování jsou jemné částice na kontaktech zrn kameniva stlačovány nebo vytlačovány, čímž dojde k nárůstu plastické deformace. Při zvýšení působícího zatížení dochází ke kontaktu mezi zrny kameniva a celkové působení závisí na hrubozrnné zemině [23] [24]



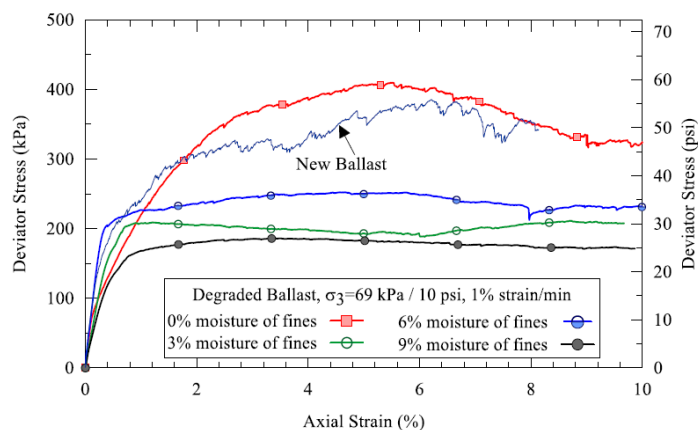
Obr. 60 Integranulární napětí v závislosti na pórovitosti [24]

Jemnozrnne částice zadržují vlhkost a narušují vzájemné působení mezi zrny štěrku (Obr. 61). Druh znečištění, vlhkost a množství má vliv na celkovou pevnost u znečištěného štěrku. Jemné částice vzniklé vzájemnou degradací štěrkových zrn, nebo vmísením ze svrchních vrstev se vyznačují nízkou plasticitou a lze je označit jako nesoudržné zeminy. Vmísením jemnozrných částic ze zemní pláně do podkladní vrstvy vznikne mezivrstva, která má vlivem vysoké plasticity výrazný vliv na stabilitu podloží. [23] [24] [27]



Obr. 61 Nový a degradovaný štěrk [23]

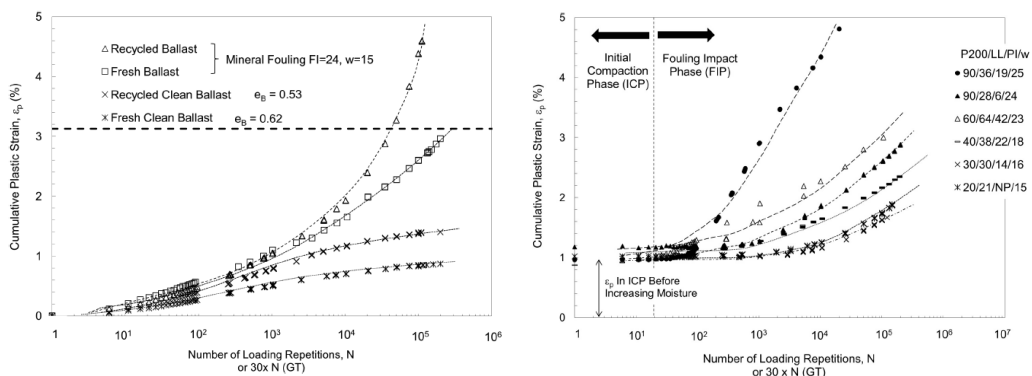
V rámci výzkumu na univerzitě v Illinois ve Spojených státech [23] byl zkoumán vliv vlhkosti na pevnost při statickém zatěžování u degradovaného štěrku. Vzorky s rozdílnou vlhkostí byly postupně zkoušeny v triaxiální komoře za působícího komorového tlaku a osového napětí s konstantním nárůstem deformace. S nárůstem vlhkosti jemnozrného materiálu došlo k výraznému poklesu pevnosti (Obr. 62).



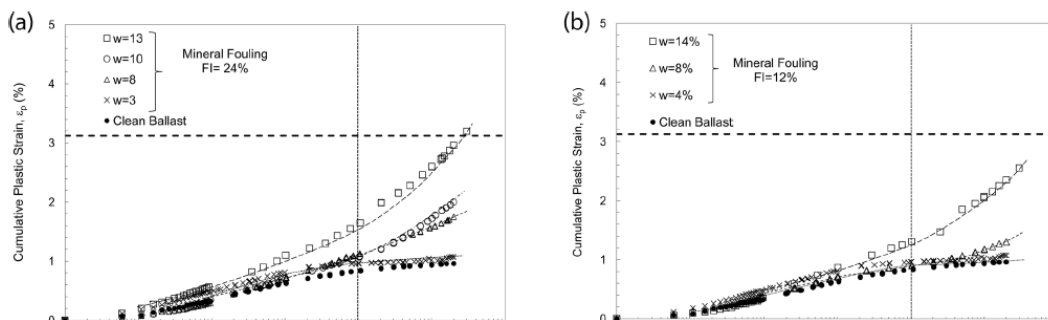
Obr. 62 Vliv rozdílné vlhkosti znečištění na statické zatěžování [23]

V rámci výzkumu na univerzitě Wisconsin-Madison poblíž Michiganského jezera ve Spojených státech [24] byl degradovaný štěrk působením cyklického zatěžování pozorován za různých počátečních podmínek. Vzorky byly zatěžovány komorovým tlakem 90 kPa a cyklickým osovým zatížením 300 kPa při 200 000 cyklech. Frekvence zatížení činila 5 Hz. Počet cyklů odpovídá jednostupňové plastické zkoušce dle ČSN EN 13286-7.

V rámci první části výzkumu byl zkoušen nový a recyklovaný štěrk ve variantách bez znečištění a se znečištěním. V druhé části bylo zkoumáno znečištění nesoudržnými materiály rozdílného množství a vlhkosti. V poslední části zkoušky došlo k testování vlivu jílovitých soudržných zemin. Z grafů závislosti plastického přetvoření na počtu zatěžovacích cyklů je patrná počáteční fáze zpevnění, kdy dochází ke zhutnění vzorku. Plastická deformace následně narůstala v závislosti na typu, vlhkosti a množství znečištění. Zvýšené plastické přetváření u recyklovaného štěrku je způsobeno rozdílnou frakcí kameniva a tvaru zrn, neboť ostrohranná zrna mezi sebou lépe působí (Obr. 63). Při znečištění nesoudržnými materiály dochází k nárůstu trvalé deformace v závislosti na zvyšující se vlhkostí jemnozrného materiálu (Obr. 64). Při nižších vlhkostech má znečištění minimální vliv. U jílovitých zemin výsledné přetváření závisí na konzistenčních mezích a vlhkosti. Při vyšších vlhkostech dochází k výraznému navýšení trvalé deformace. [24]



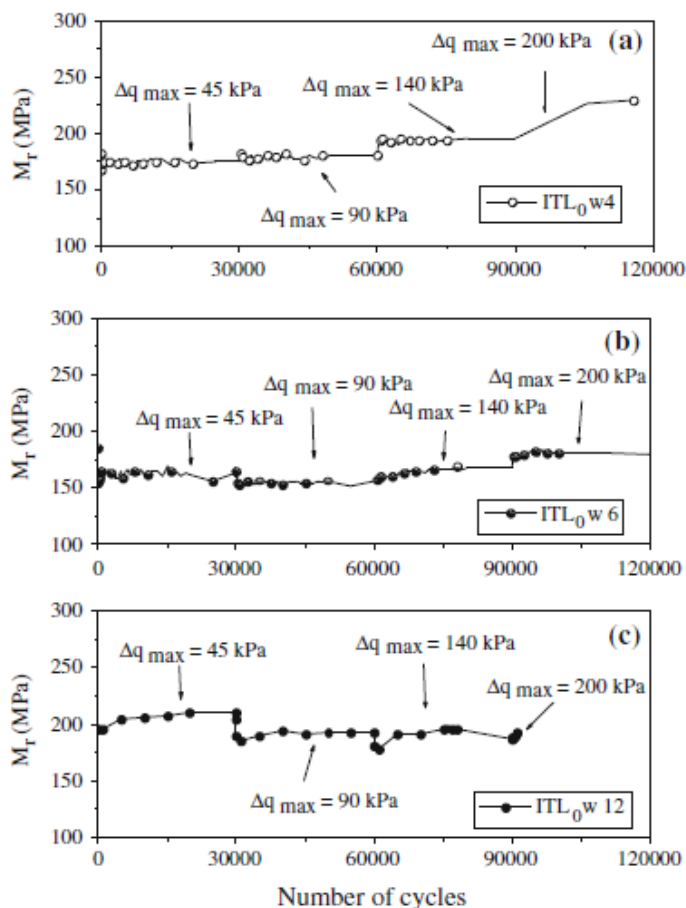
Obr. 63 Nový a recyklovaný štěrk, znečištění jílovitou zeminou [24]



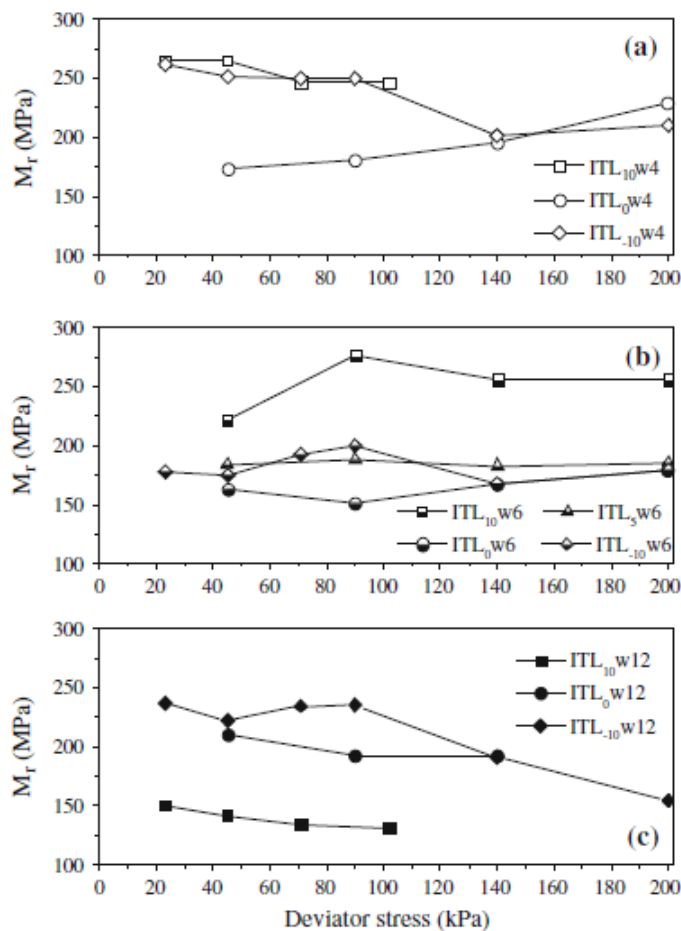
Obr. 64 Znečištění drceným štěrkiem za rozdílných vlhkostí [24]

Cílem práce francouzské laboratoře v součinnosti s národním dopravcem SNCF [27] bylo sledování odezvy mezivrstvy vzniklé mezi zemní plání a podkladní vrstvou při zkoušce resilient modulus. Byly vyrobeny vzorky s 4 různými podíly jemnozrnných částic a každý se třemi odlišnými vlhkostmi. Vzorek byl zatěžován frekvencí 5 Hz. Postupně byly při víceúrovňové zkoušce plastického přetvoření aplikovány dráhy cyklického napětí 45 kPa, 90 kPa, 145 kPa a 200 kPa vždy 30 000 cykly při konstantním komorovém tlaku 30 kPa.

Při navýšení cyklického napětí dochází k nárůstu trvalé deformace. S rostoucím počtem cyklů dochází k dosažení pružného stavu a konstantní hodnotě resilient modulu (Obr. 65). Počet cyklů nutných ke stabilizaci hodnoty resilient modulu závisí na aplikovaném napětí, obsahu jemnozrnných částic a vlhkosti. Stabilizace pružných deformací byla zmíněna u vlivu působícího napětí na resilient modul u zemní pláně. U vzorku s nejvyšším obsahem jemnozrnných částic je patrné při navýšení vlhkosti snížení resilient modulu (Obr. 66). [27]



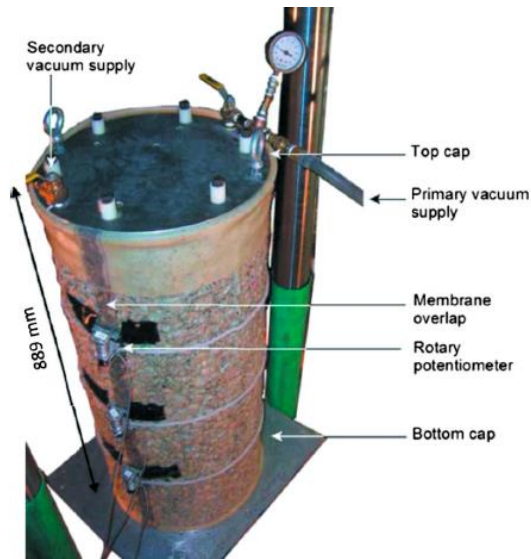
Obr. 65 Postupná stabilizace hodnoty resilient modulu [27]



Obr. 66 Vliv znečištění na resilient modul [27]

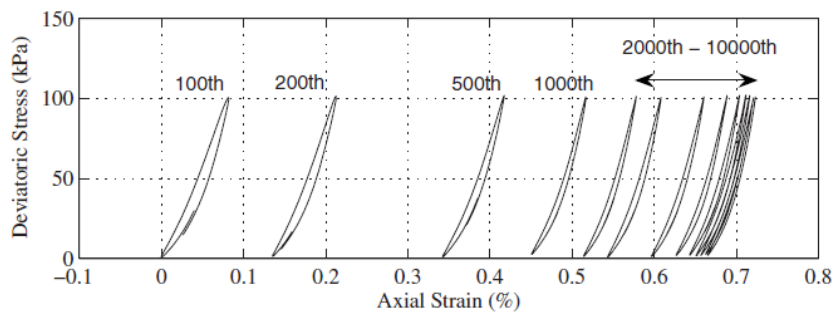
Pro zkoušení hrubozrnných materiálů musí být použity triaxiální komory odpovídajících rozměrů. Podmínkou je, že minimální průměr zkušební vzorku musí být šestinásobný vůči maximální velikosti zrna kameniva. [12]

Alternativní triaxiální zařízení pro zkoušení hrubozrnného materiálu bylo vyvinuto na univerzitě v Missouri [22]. Běžně je těleso zatěžováno komorovým tlakem v triaxiální komoře. Principem je náhrada komorového tlaku vakuem, který je vyvinut uvnitř vzorku formou zpětného tlaku (Obr. 67). Princip této metody umožňuje i ČSN EN 13286-7 u metody B, resp. zatížení s cyklickým osovým napětím a konstantním komorovým tlakem.



Obr. 67 Zkušební vzorek šterku [22]

Při cyklickém zatěžování působil konstantní komorový tlak 20,7 kPa prostřednictvím vakua a deviator napětí se rovnal 100 kPa při frekvenci 1 Hz. Dle počtu cyklů se jedná o zkoušku plastického přetvoření v souvislosti s ČSN EN 13286-7. Dle výsledných naměřených hodnot z laboratorní zkoušky je s rostoucím počtem cyklů patrný pokles nárůstu plastické deformace (Obr. 68). [22]

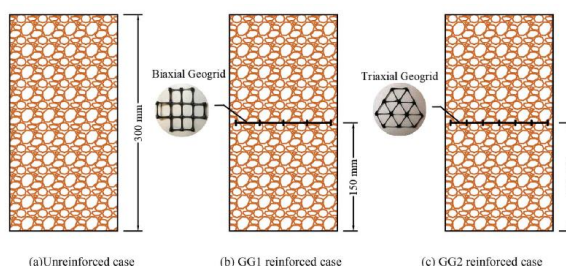


Obr. 68 Závislost poměrného přetvoření a napětí v čase [22]



## 5.2.2. Geomřížky

Primární funkcí geomřížek je zvýšení horizontální tuhosti a snížení trvalé deformace působícím zatížením. Účinek zpevnění podél výztužného prvku závisí na typu použité geomřížky, zrnitosti kameniva a působící síle (Obr. 69). Vyztužení funguje správně, když dochází k efektu zazubení mezi zrna kameniva a mřížkou. V opačném případě nedochází k spolupůsobení a efekt zazubení působí jen mezi zrna štěrku. Za tohoto předpokladu lze říct, že výsledná tuhost vychází ze vzájemného spolupůsobení zrn kameniva a mřížky. [14] [30]

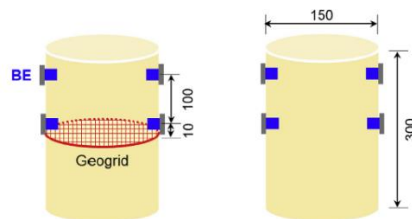


Obr. 69 Tvary geomřížek a umístění ve zkušebním vzorku [26]

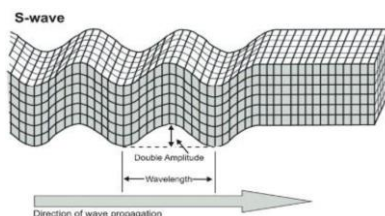
V rámci prvního výzkumu v Jižní Koreji [25] byl zkoumán vliv trvalé deformace vzorku kameniva nevyztuženého a vyztuženého geomřížkou na tuhosti. Zkouška trvalé deformace probíhala působením cyklického osového zatížení v triaxiální komoře v souladu s AASHTO T307.

U vyztuženého vzorku geomřížkou dochází ke snížení trvalé deformace ve srovnání s nevyztuženým vzorkem. V průběhu zatěžovacích cyklů se růst plastické deformace snižuje, a naopak pružná se zvyšuje až do ustálení hodnot. Hodnota pružného přetvoření je pro oba vzorky shodná a vliv vyztužení na resilient modulus je minimální. Z výsledků trvalého přetvoření lze konstatovat, že vložení výztužné geomřížky lze snížit sedání železničního tělesa. [25]

Tuhost kameniva lze vyjádřit smykovým modulem, který byl zmíněn v teoretické části. V polovině výšky a na horním konci vzorku se instalovala dvojice sestav piezokeramických snímačů (Obr. 70). Na jedné straně vzorku se vysílal signál S-vlny a na druhé zaznamenával její průběh (Obr. 71). Smykový modul se určí ze zaznamenané rychlosti šíření vlnění a objemové hmotnosti vzorku. [17] [25]



Obr. 70 Umístění sestav vysílače a přijímače [25]

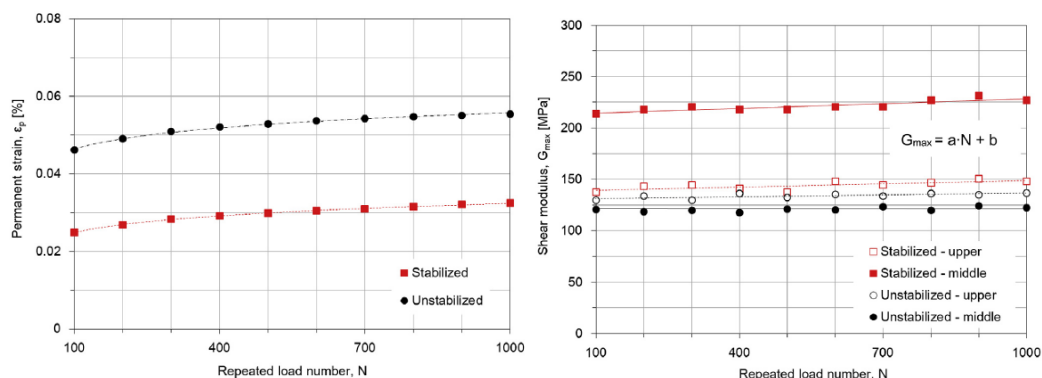


Obr. 71 Příčná S-vlna (shared wave) [17]

Smykový modul v závislosti na rychlosti vln

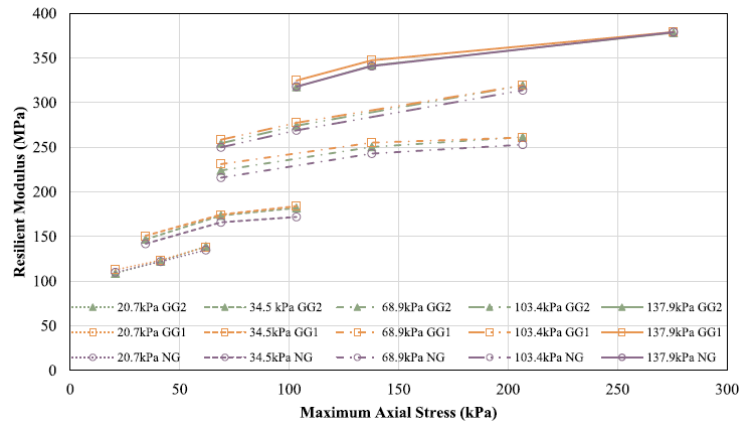
$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} = \rho * v_s^2$$

V oblasti geomřížky se naměřil výrazně vyšší smykový modul než na vrchní straně vyztuženého vzorku a u nevyztuženého vzorku na obou místech, kde hodnoty smykového modulu byly stejné (Obr. 72). Vlnění se nejrychleji šíří v oblasti vyztužené geomřížkou. Rozdíl smykového modulu po výšce vyztuženého vzorku odpovídá předpokladu zvýšení tuhosti v oblasti geomřížky. Rychlost šíření smykové vlny se v průběhu zatěžovacích cyklů zvyšuje čímž dochází k růstu smykového modulu. [25]



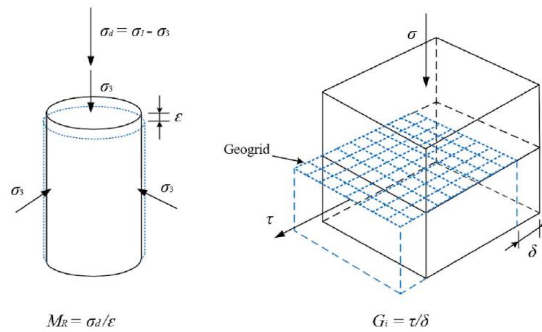
Obr. 72 Vliv vyztužení na trvalé deformaci a smykovém modulu [25]

Druhý výzkum v Číně [26] se zabýval resilient modulem a smykovým povrchovým resilient modulem u tělesa vyztuženého geomřížkou. Obě zkoušky vycházely ze základu normy AASHTO T307 s použitými vyššími úrovněmi napětí pro podkladní vrstvy. Výsledky cyklické zkoušky resilient modulu potvrdily fakt, že efekt zvýšení modulu díky vyztužení geomřížkou je minimální (Obr. 73). Hodnoty resilient modulu jsou závislé především na působícím napětí.

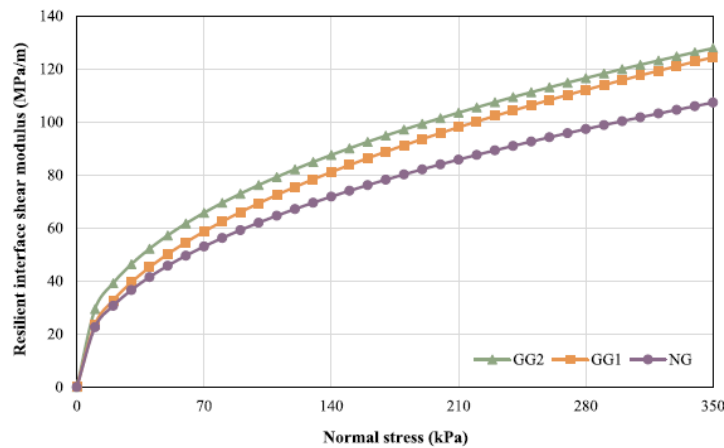


Obr. 73 Resilient modulus nevztuženého a vyztužených vzorků [26]

Smykový povrchový resilient modulus se rovná podílu smykového napětí a poměrného přetvoření v horizontálním směru. Zavedený modul charakterizuje vliv geomřížky na horizontální tuhost, obdobně jako smykový modul v předešlém výzkumu. Cyklická smyková zkouška se provedla na přístroji odpovídajícímu krabicovému smykovému přístroji (Obr. 74). Cyklické napětí působilo ve vodorovném směru a konstantní napětí ve směru vertikálním. Výhodou smykového přístroje je jeho velikost a užití odpovídající geomřížky, neboť u běžného triaxiálního přístroje se plocha rovná hutnicí formě. Z následujícího grafu je patrné zvýšení tuhosti v rovině vyztuženého prvku. S rostoucím normálovým napětím roste i modul (Obr. 75). Při vyšším cyklickém zatížení ve směru smýkání je modul nižší a efekt vyztužení klesá. [26]



Obr. 74 Cyklická triaxiální a smyková zkouška [26]

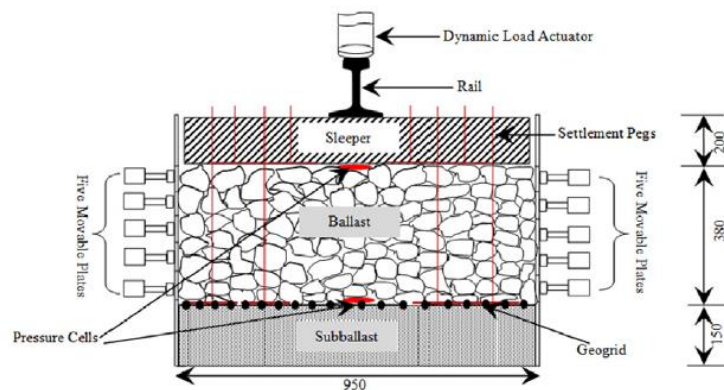


Obr. 75 Vliv vyztužení na smykovém povrchovém resilient modulu [26]

### 5.2.3. Frekvence

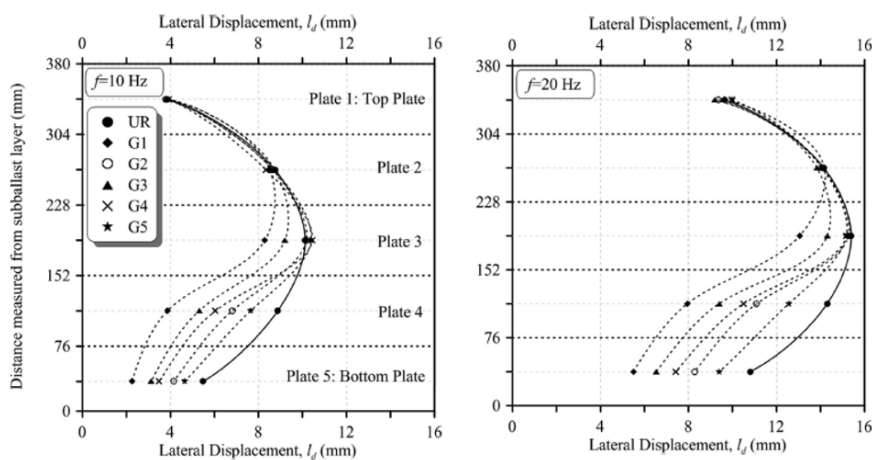
V teoretické části zmíněné zkušební postupy uvažují zatěžovací frekvence v rozsahu od 0,1 až do 10 Hz. Ve výzkumech z francouzské laboratoře [27] a univerzity v Illinois [24] byla shodně zvolena frekvence 5 Hz při výzkumu degradovaného šterku podkladních vrstev. Dle podkladů francouzské SNCF vyvolá vlak projíždějící 100 km/h působící frekvenci 5 Hz na podkladní vrstvu. Naopak na rozhraní podkladní vrstvy a kolejového lože by dle indického výzkumu [30] měla frekvence 10 Hz odpovídat rychlosti 73 km/h a vyšší frekvence 40 Hz rychlosti 292 km/h. Českým podmínkám provozu vlaků na koridorových tratích by dle dané práce odpovídala frekvence 20 Hz s rychlostí 146 km/h.

V rámci výzkumu na technickém institutu v Patně ve východní Indii [30] byl zkoumán vliv zvyšující se frekvence působícího osového zatížení na šterkovité kolejové lože a podkladní vrstvu vyztužené geomřížkou. Ke zkoušení nebyla využita triaxiální komora jako u ostatních citovaných výzkumů, ale nádoba tvaru kvádrů, ve které byla podkladní vrstva, kolejové lože, pražec s upevněním a kolejnicí (Obr. 76). Geomřížka byla vždy vložena mezi kolejové lože a podkladní vrstvu. Celkem bylo vyrobeno 5 vzorků s různými typy geomřížek a 1 vzorek nevyztužený. Na zkušební těleso bylo aplikováno 250 000 zatěžovacích cyklů pro jednotlivé frekvence 10, 20, 30, 40 Hz. Amplituda cyklického zatížení byla konstantní 300 kPa s působícím komorovým tlakem 10 kPa.



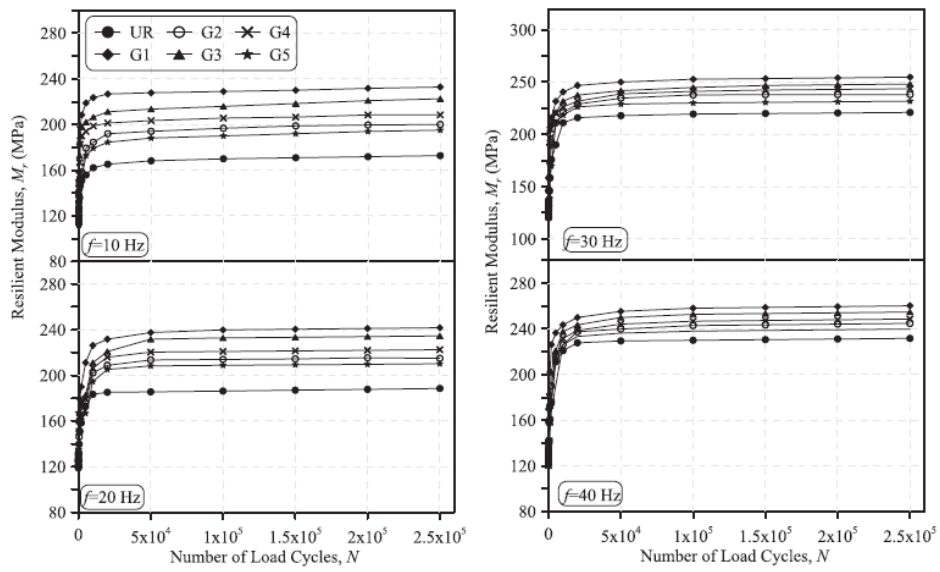
Obr. 76 Zkušební vzorek kolejového lože a podkladní vrstvy [30]

Vodorovná a svislá deformace narůstala v závislosti na zvyšující se frekvenci (Obr. 77). Snížení deformace je patrné u vyztužených vzorků, kde dochází ke spolupůsobení mřížky a kameniva. S rostoucí frekvencí klesá vliv vyztužení. Stabilizace trvalých deformací ve vodorovném i svislém směru nastala přibližně po 50 000 cyklech. Tento jev má vliv na výsledný resilient modul a koresponduje s předešlými výzkumy. S rostoucí frekvencí zatěžování se zvyšuje resilient modul (Obr. 78). Vložením vyztužné geomřížky se mírně navyšuje hodnota modulu. [30]

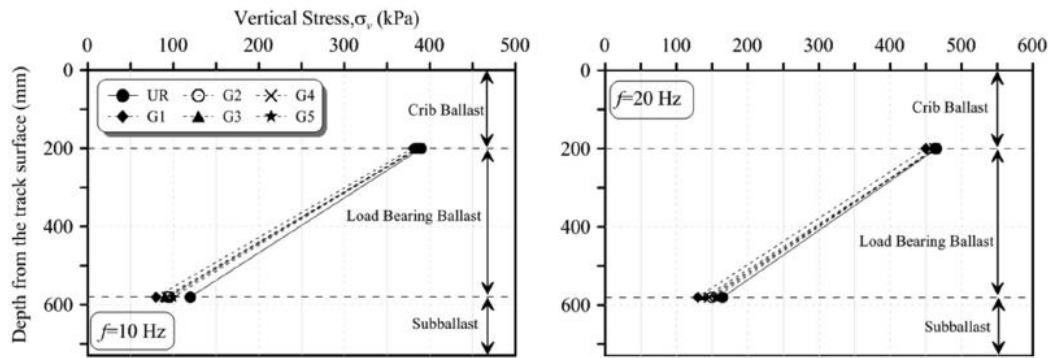


Obr. 77 Průběh vodorovné deformace po výšce vzorku [30]

Pro výzkum podkladních vrstev je vhodné znát průběh svislého napětí po výšce vzorku (Obr. 79). S rostoucí hloubkou klesá účinek zatížení od železniční dopravy a začíná převládat statické napětí. Poměr mezi naměřeným působícím cyklickým napětím na ložné ploše pražce a působícím statickým napětím se s rostoucí frekvencí zvyšuje. Efekt vyztužení má vliv na snížení působícího napětí, avšak obdobně s rostoucí frekvencí klesá. [30]



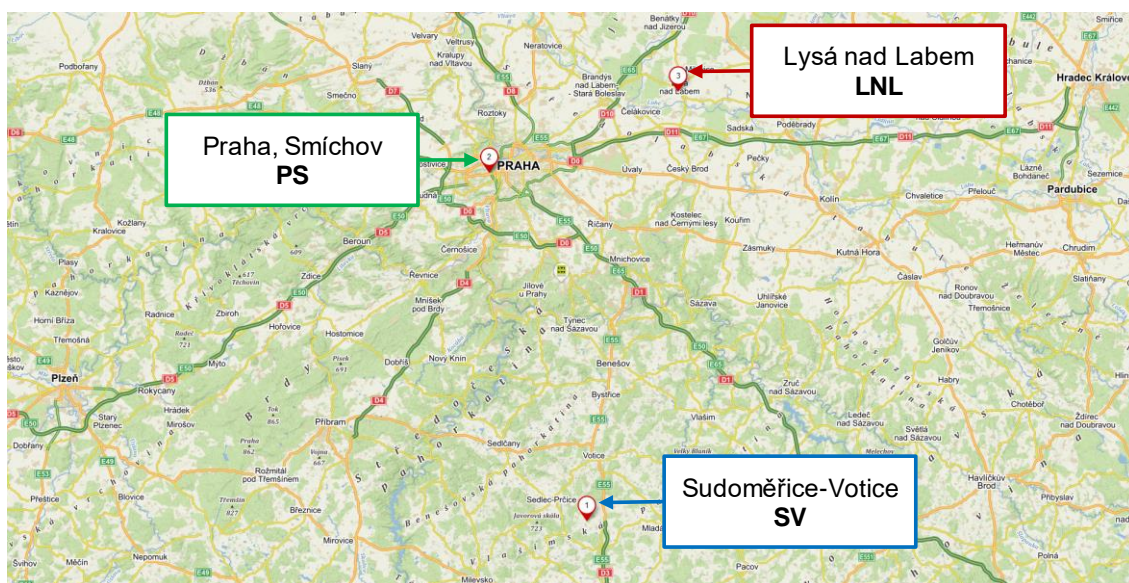
Obr. 78 Resilient modulus při frekvencích 10, 20, 30, 40 Hz [30]



Obr. 79 Průběh svislého napětí po výšce vzorku [30]

## 6. PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části je měření pružného chování odebraných vzorků zeminy při cyklickém zatěžování. V úvodu práce bylo zmíněno, že během cyklického zatěžování je možné určit hodnotu resilient modulu podle americké normy AASHTO T 307 a modulu pružnosti dle evropské, resp. české normy ČSN EN 13286-7. Výsledná deformační charakteristika je v obou případech podílem cyklického osového napětí a odpovídajícího pružného přetvoření. Pro zkoušky jsem vybral skupinu třech jemnozrnných zemín z vybraných lokalit (Obr. 80).



Obr. 80 Místa odběru zkoušených zemín [42]

Zemina z Lysé nad Labem pochází z ŽST v Lysé na Labem ležící na tratích 072, 231 a 232 dle KJŘ. Zeminu jsem použil v mé bakalářské práci. Vzorek zeminy ze stavby Sudoměřice-Votice pochází z km 101,070 tratě 220 dle KJŘ na čtvrtém železničním koridoru. Konkrétním místem je zářez za tunelem Mezno směrem na Prahu poblíž obce Střeziměř. Zemina z Prahy, Smíchova pochází ze založení stavby poblíž Plzeňské ulice směrem na Strahovský stadion (Obr. 81). V následné praktické části jsou vzorky pro snazší orientaci označovány zkratkami. Označení a data jednotlivých odběrů jsou uvedeny níže (Tab. 9).

Tab. 9 Zkušební zeminy [41]

Zemina	Použitá zkratka	Datum odběru
Lysá nad Labem	LNL	20.03.2019
Sudoměřice-Votice	SV	06.05.2020
Praha, Smíchov	PS	16.10.2020

Na zeminách **SV** a **PS** jsem provedl zkoušku přirozené vlhkosti, prosévání a Proctor Standard. Z křivky zrnitosti jsem stanovil podíl jednotlivých frakcí zrn. Z výsledné optimální vlhkosti při maximální suché objemové hmotnosti vycházely vlhkosti zkoušených vzorků. Dané zkoušky na zemině **LNL** nebyly prováděny, protože jsem zkoušky provedl v rámci své bakalářské práce [41].

Vzorky jsem k cyklickým zkouškám připravil s rozdílnými vlhkostmi. Zkušební vzorky pro zkoušky resilient modulu dle AASHTO T 307 jsem zhutnil na maximální objemovou hmotnost a odpovídající optimální vlhkost, o 2 % nižší vlhkost než optimální a in situ vlhkost při odběru zeminy. Rozdíl vlhkosti 2 % mi připadal dostatečný, aby byly viditelné změny v chování zeminy a zároveň aby snížení nebylo značné. Shodné snížení doporučuje i citovaná norma ČSN EN 13286-7. Ke zkouškám modulu pružnosti dle ČSN EN 13286-7 jsem zvolil u všech zemin o 2 % nižší vlhkosti než optimální. Vybranou zeminu s nevhodnějšími deformačními parametry jsem podrobil zkouškám při vlhkostech odpovídajících první zkoušce.

Popis jednotlivých zkušebních vzorků je rozšířen v části cyklických zkoušek. Jednotlivé vzorky jsou označeny v souladu se zavedenými zkratkami (Tab. 10). Přílohy s naměřenými daty jsou členěny do skupin zkoušek souvisejících s odběrem zeminy, resilient modulem a modulem pružnosti (Tab. 11).

Tab. 10 Zkušební vzorky

Zkušební metoda	Vzorek	Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Resilient Modulus	$W_{insitu}$	LNL_1	SV_1	PS_1
AASHTO T 307	$W_{opt-2\%}$	LNL_2	SV_6	PS_2
	$W_{opt}$	LNL_4	SV_3	PS_4
Modul pružnosti	$W_{insitu}$		SV_2	
ČSN EN 13286-7	$W_{opt-2\%}$	LNL_3	SV_7	PS_3
	$W_{opt}$		SV_4	

Tab. 11 Přílohy praktické části

Příloha		Skupina	Část
A	1	Odebrané zeminy	Vlhkost
	2		Prosévací zkouška
	3		Proctor Standard
B	1	Resilient Modulus	Triaxiální zkouška
	2		Pevnost v prostém tlaku
	3		Vlhkost
C	1	Modul pružnosti	Triaxiální zkouška
	2		Pevnost v prostém tlaku
	3		Vlhkost





Obr. 81 Odběr zeminy PS

## 6.1. Vlhkost

Vlhkost zeminy se rovná podílu hmotnosti vody a pevné fáze. Jedná se o základní popisnou vlastnost zemin a byla zmíněna v teoretické části. Principem zkoušky je odběr reprezentativního vzorku zeminy do misky, zvážení a vložení misky se zeminou do sušárny. V sušárně působí teplota mezi 105 až 110° C. Po vysušení se miska se zeminou zvaží. Rozdíl hmotností se rovná odpařené vodě ze zeminy. [38]

U odebraných zemin **SV** a **PS** jsem stanovil jejich přirozenou vlhkost in situ (Tab. 12). Rozdíl mezi optimální a přirozenou vlhkostí je u zemin **LNL** a **PS** větší než 6 %. Naopak u zeminy **SV** je rozdíl menší než 3 %.

Tab. 12 Přirozené vlhkosti zemin [41]

Vzorek			LNL	SV	PS
Místo			Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Přirozená vlhkost	$w_{in situ}$	[%]	21,47	14,45	21,82
Optimální vlhkost	$\Delta w$	[%]	15,00	12,00	15,00
Rozdíl	$w_{opt}$	[%]	6,47	2,45	6,82

Vlhkost jsem stanovoval při zkoušce Proctor Standard a po zkoušce pevnosti v prostém tlaku. Zkoušky modulu pružnosti a resilient modulu zde nejsou uvedeny, protože po nich vždy následovala zkouška pevnosti v prostém tlaku.

## 6.2. Prosévací zkouška

Zrnitostním rozbořem se rozumí znázornění podílu jednotlivých frakcí zrn v zemině. Jedná se o základní parametr klasifikace zemin, která byla popsána v teoretické části. Výsledná křivka zrnitosti se stanovuje z prosévací nebo sedimentační zkoušky. Zrna zeminy se mohou oddělovat na jednotlivých sítích nebo postupným usazováním v kapalině. Během hustoměrné zkoušky zrna zeminy klesají působením tíhové síly, kdy větší zrna sedimentují rychleji. Pohybem zrn dochází ke změně hustoty po výšce odměrného válce. Volba zkušební metody závisí na typu zkoumané zeminy. Písčité a štěrkovité zeminy se prosejí na sítích, naopak pro jemnozrné zeminy je vhodná sedimentace. Při prosévání zeminy s jemnozrnou příměsí by na zrnech zůstal jemný prach, a proto je nutné takovou zeminu před proséváním promýt. [39]

Zkoušené vzorky zemin byly vhodné pro kombinaci obou metod. U vzorků **PS** a **SV** jsem provedl prosévací rozbor (Obr. 82). Před samotnou zkouškou jsem vzorky nechal ponořené v misce s vodou. Vzorky zemin jsem promyl přes síta 2,00 mm a 0,063 mm. Vyplavení jemných částic se pozná podle odtékající čisté vody. U vzorku **PS** došlo k významnému odplavení jemných částic. Po vysušení jsem vzorky prošel na automatických prosévačkách síty 8,00; 5,60; 4,00; 2,00; 1,00; 0,50; 0,25; 0,125; 0,063 mm s dobou prosévání 10 minut (Obr. 83).



Obr. 82 Proseté zeminy SV a PS

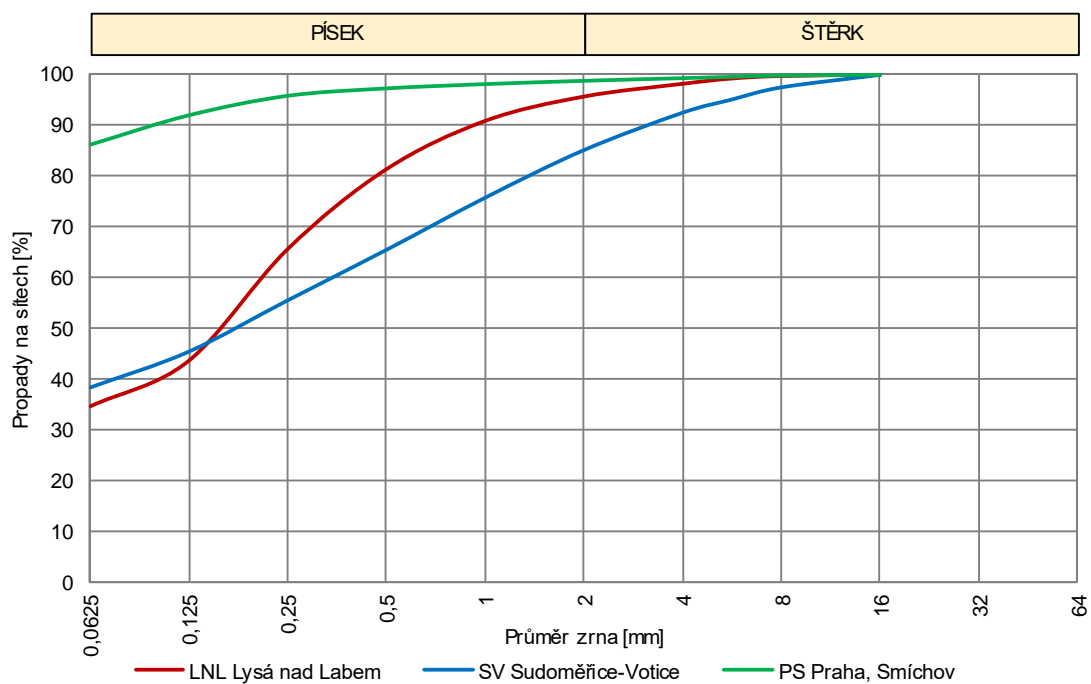
Z výsledků zkoušek je patrný významný podíl jemných částic u vzorku **PS**. Vzorky zemin **LNL** a **SV** mají shodný průběh zrnitosti. U zeminy **SV** je křivka přímější. V níže uvedené tabulce je uveden podíl jemnozrných, písčitých a štěrkovitých zemin (Tab. 13). Na následném grafu je znázorněn celkový průběh křivky zrnitosti zkoušených zemin (Graf 1).



Obr. 83 Promývací a prosévací zařízení

Tab. 13 Zrnitostní skladba zkušebních vzorků [41]

Vzorek			LNL	SV	PS
Místo			Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Jemnozrná zemina	F	[%]	34,57	38,16	86,23
Písčité zemina	S	[%]	61,14	46,93	12,59
Štěrkovitá zemina	G	[%]	4,29	14,91	1,18



Graf 1 Křivka zrnitosti zkušebních vzorků [41]

### 6.3. Maximální objemová hmotnost

Pro zkoušky cyklické a následně statické bylo nutné zkušební vzorky zhutnit. Zhutnění má vliv na výsledné pevnostní a deformační charakteristiky. Účinkem hutnicí energie dochází k vzájemnému přesunu zrn, snížení pórovitosti a zvýšení objemové hmotnosti zeminy. Výsledná objemová hmotnost je závislá na vlhkosti zeminy. Při optimální vlhkosti dosahuje zemina maximální suché objemové hmotnosti. Citlivost materiálu na změnu vlhkosti odpovídá tvaru, resp. zploštění křivky. Při výstavbě zemního tělesa železničního spodku je nutné stanovit u použitých zemin optimální vlhkost. [16]

Vztah mezi vlhkostí a suchou objemovou hmotností je předmětem zkoušky Proctor Standard. Několik vzorků zeminy s postupně zvyšující se vlhkostí je hutněno v moždíři. Pěch padá několika dopady na postupně 3 vrstvy v moždíři. Hmotnost pěchu, výška dopadu a počet rázů na každou vrstvu je závislý na použitém moždíři. U zkoušky Proctor Modifikovaný se hutní v 5 vrstvách a výše zmíněné parametry jsou vyšší. Hutnicí energie je přibližně  $2,7 \text{ MJ/m}^3$ . U zkoušky Proctor Standard je hutnicí energie nižší, a to  $0,6 \text{ MJ/m}^3$ . V závislosti na rozdílné hutnicí energii vychází křivka suché objemové hmotnosti rozdílná. [8]

Provedl jsem zkoušku Proctor Standard zemin **SV** (Obr. 84) a **PS** (Obr. 85). U obou zkoušených zemin byl počet vzorků a postup stejný. Připravil jsem 6 vzorků o hmotnosti 2,5 kg s rozdílným obsahem vody. Přidával jsem po 50 ml vody, které odpovídají přibližně 2 % hmotnosti. Před samotnou zkouškou vzorky zrály minimálně 24 hodin, aby došlo k rovnoměrnému rozložení vlhkosti.

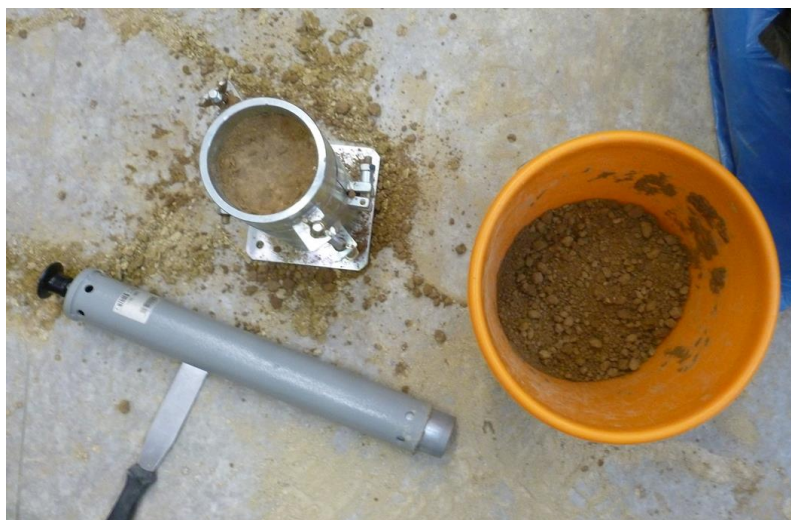


Obr. 84 Proctor Standard zeminy SV



Obr. 85 Proctor Standard zeminy PS

Postupně jsem vzorky zhutnil v moždíři typu A ve 3 vrstvách a každou vrstvu hutnil 25 údery (Obr. 86). Moždíř je vybavený snímatelným nástavcem a podstavou. Průměr činí 100 mm a výška 120 mm. Po hutnění jsem vzorek seříznul a zvážil. Na závěr jsem u každého vzorku stanovil vlhkost. Odebraná zemina z každého vzorku byla odvážena ve třech miskách.

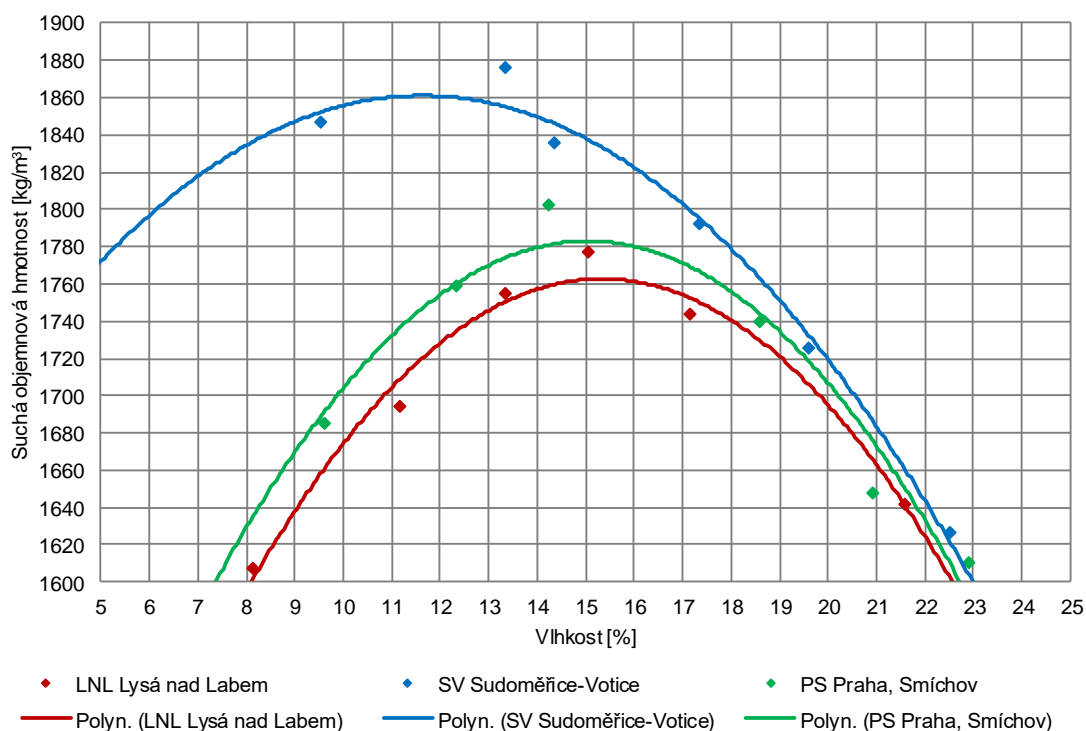


Obr. 86 Hutnicí forma a pých

Zeminy **LNL** a **PS** mají stejnou optimální vlhkost 15 %. Oba vzorky se vyznačují na první pohled vyšší plasticitou. Zemina **SV** dosahuje nejvyšší suché objemové hmotnosti při 12 % vlhkosti. Odpovídající suchá objemová hmotnost je vyšší než u ostatních zemín. Tabulka popisuje maximální suché objemové hmotnosti při optimální vlhkosti zemín (Tab. 14). V grafu jsou naměřené hodnoty suchých objemových hmotností a odpovídajících vlhkostí jednotlivých zemín proloženy polynemem druhého stupně (Graf 2).

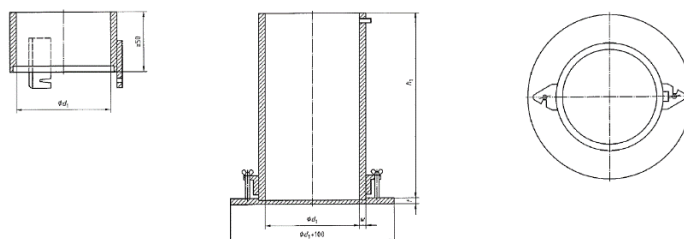
Tab. 14 Maximální objemová hmotnost a optimální vlhkost [41]

Vzorek			<b>LNL</b>	<b>SV</b>	<b>PS</b>
Místo			Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Maximální objemová hmotnost	$\rho_{dmax}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1760,00	1860,00	1780,00
Optimální vlhkost	$w_{opt}$	[%]	15,00	12,00	15,00



Graf 2 Hutní křivky zkušebních vzorků [41]

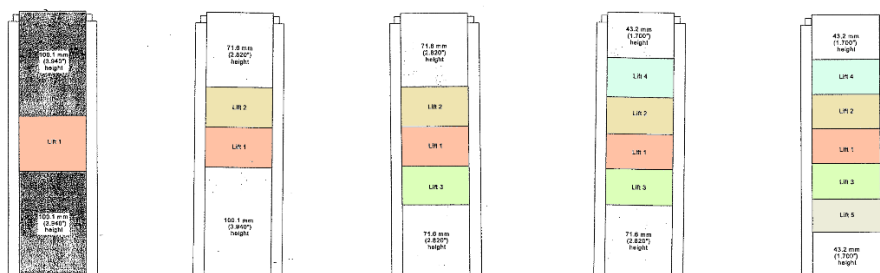
V teoretické části bylo zmíněno, že příprava vzorků je odlišná pro soudržné a nesoudržné zeminy. Soudržné zeminy mohou být zhutněny účinkem pýchování a nesoudržné vibrací. U vzorku zemní pláň lze zkoušet neporušený vzorek. Soudržné zeminy je vhodné zhutnit pýchováním v pěti vrstvách v hutní formě v souladu s postupem zkoušky Proctor Standard (Obr. 87). Na každou vrstvu se aplikuje stejný počet rázů a stejný hutní tlak. Konstantní hodnota hutní energie může způsobit rozdílnou objemovou hmotnost po výšce vzorku, kdy spodní vrstvy mají objemovou hmotnost vyšší. [6] [8] [9]



Obr. 87 Hutní forma [8]

Další možnou variantou hutnění je stlačování zeminy uvnitř formy prostřednictvím lisu v celkem pěti vrstvách (Obr. 88). Při stlačování je zemina postupně vkládána z obou stran a stlačuje se uvnitř formy. Na následujícím obrázku je znázorněn postup hutnění. V každém postupu se vkládají na svrchní

a spodní vrstvu klíny rozdílné velikosti, které vyplňují prostor mezi zemínou a zatěžovacím lisem. [6]



Obr. 88 Hutnění postupným stlačováním [6]

Pro nesoudržné zeminy je vhodné hutnění účinkem vibrací. Před hutněním se na povrch hutnicí formy nanese gumová membrána. Zemina je postupně v šesti vrstvách zhutněna vibračním pěchem. Vibrační pěch na vrstvu působí až do té doby, než se účinkem vibrací vrstva zhutní na požadovanou tloušťku. Při vibrokompresi se zemina stlačuje po dobu 90 s v jedné vrstvě. [6] [9]

Zemínu jsem vždy nechal částečně vyschnout při pokojové teplotě. Následně jsem odebral reprezentativní vzorek a po vysušení v sušárně stanovil vlhkost. Na základě znalosti vlhkosti jsem zemínu navlhčil, promíchal a nechal uzavřenou odstát obdobně jako u zkoušky maximální objemové hmotnosti. Vzorky zemín jsem pro cyklické zkoušky zhutnil v moždíři v 5 vrstvách vždy 25 dopady pěchu o hmotnosti 2,5 kg z výšky 305 mm. Průměr formy ke zhutnění vzorku do triaxiální komory je 100 mm a výška 200 mm. Hutnicí energie 0,6 MJ/m<sup>3</sup> odpovídá zkoušce Proctor Standard a její výpočet je uveden níže. [8]

Hutnicí energie

$$E = \frac{m_{PS} * h_{PS} * n_{PS} * n * g}{V} = \frac{2,5 * 305 * 25 * 5 * 9,81}{\pi * \frac{100^2}{4} * 200} = 0,595 \text{ MJ/m}^3$$

$m_{PS}$  – hmotnost pěchu;  $h_{PS}$  – výška dopadu pěchu;  $n_{PS}$  – počet dopadů na jednu vrstvu

$n$  – počet vrstev;  $g$  – tíhové zrychlení;  $V$  – objem moždíře

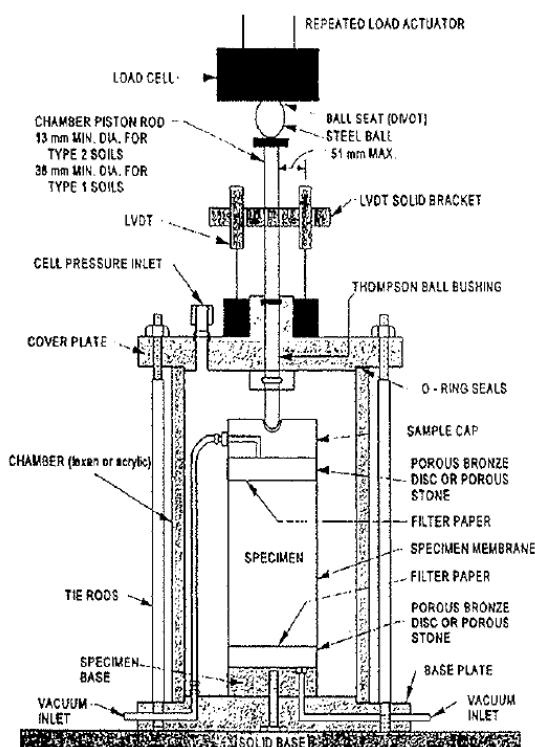
Po přípravě vzorku jsem těleso zvažil. Změřil jsem průměr vzorku a výšku vždy na třech místech. Navazující zkušební postup je uveden v následujících kapitolách resilient modulu a modulu pružnosti.

## 6.4. Resilient modulus

Předmětem americké normy AASHTO T 307 je stanovení resilient modulu během cyklického zatěžování v triaxiální komoře, které simuluje působící dopravní zatížení. Výsledné hodnoty lze využít při návrhu konstrukce podloží nebo při sledování odezvy konstrukce na cyklické zatížení. Zkušební metoda je určena pro neupravené zeminy zemní pláň, nebo nestmelené konstrukční a podkladní vrstvy. Zeminy, resp. kamenivo jsou klasifikovány typem 1 a 2. Zemina typu 1 odpovídá nesoudržné zemině a typ 2 soudržné zemině. Dle definice je s maximálním propadem 70 % na 2,0 mm síť, 20 % na 0,075 mm síť a nízkou plasticitou, která odpovídá indexu plasticity  $I_p < 10$  %, označena nesoudržná zemina typu 1. Míra zatížení během cyklické zkoušky se stanoví na základě uvažovaného umístění v podloží. Rozlišují se postupy pro zemní pláň a podkladní vrstvy. [6]

### 6.4.1. Zatěžovací zařízení

Zatěžovací zařízení se skládá z triaxiální komory, zatěžovacího pístu a měřících zařízení (Obr. 89). Působící komorový tlak může být aplikován prostřednictvím kapaliny, nebo vzduchu. Během zkoušky je měřen aktuální komorový tlak, osové zatížení a axiální posun. [6]



Obr. 89 Triaxiální komora dle AASHTO T 307 [6]



Siloměr by měl být umístěn na spoji pístu triaxiální komory a pístu zatěžovacího lisu. Osově deformace jsou zaznamenávány dvěma LVDT lineárními pružinovými snímači na povrchu triaxiální komory. Snímače jsou na opačné straně a ve stejné vzdálenosti od zatěžovacího pístu. Ze dvou čtení lze určit, zda nedochází k nesprávnému umístění nebo vychýlení vzorku. Poměr mezi měřenými amplitudami stlačení na snímačích by měl být menší než 1,1, avšak nejvýše 1,3. [6]

#### 6.4.2. Cyklické zatěžování

Vzorek zeminy je zatěžován cyklickým osovým zatížením a konstantním komorovým tlakem v triaxiální komoře. Zatěžovací křivka odpovídá níže uvedené funkci haversinus, která je poloviční hodnotou funkce versus sinus. Délka cyklického zatížení by měla trvat 0,1 s a celková délka jednoho cyklu mezi 1,0 až 3,1 s. Délka cyklu závisí na parametrech zatěžovacího lisu, kdy maximální frekvence je 1 Hz. [6]

Haversinus funkce

$$\text{haversin } \theta = \frac{1 - \cos \theta}{2} = \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{\text{versin } \theta}{2}$$

Resilient modulus je poměr amplitudy osového cyklického napětí a odpovídajícího poměrného pružného osového přetvoření. Na těleso působí v osovém směru deviator napětí. Součet cyklického a kontaktního napětí se rovná maximálnímu deviatoru napětí. Kontaktní zatížení udržuje pozitivní kontakt mezi zatěžovacím pístem a odpovídá minimálnímu deviatoru napětí. Cyklické zatížení simuluje účinek dopravy. Zkouška může být provedena za podmínek odvodněných při otevřené drenáži, nebo neodvodněných. [6]

Maximální osově zatížení

$$S_{max} = S_{cyclic} + S_{contact}; S_{contact} = 0,1 * S_{max}$$

$S_{max}$  – maximální deviator napětí;  $S_{cyclic}$  – cyklické napětí;  $S_{contact}$  – kontaktní napětí

Resilient modulus

$$M_r = \frac{S_{cyclic}}{\epsilon_r}$$

$\epsilon_r$  – pružné osově přetvoření

Rozlišuje se počáteční a následná zkušební 15 sekvenční fáze. Během počáteční fáze je na těleso aplikováno 1 000 cyklů osového zatížení. Počet cyklů nutných ke stabilizaci závisí na rozvoji trvalé deformace vzorku. Během počáteční fáze je těleso kondicionováno s cílem eliminace vzniku nežádoucích efektů během následující zkoušky. Během zkušební fáze se postupně aplikují

zatěžovací sekvence dle následující tabulky. Během každého stupně se aplikuje 100 zatěžovacích cyklů. Maximální dovolené trvalé osově přetvoření je 5 %. [6]

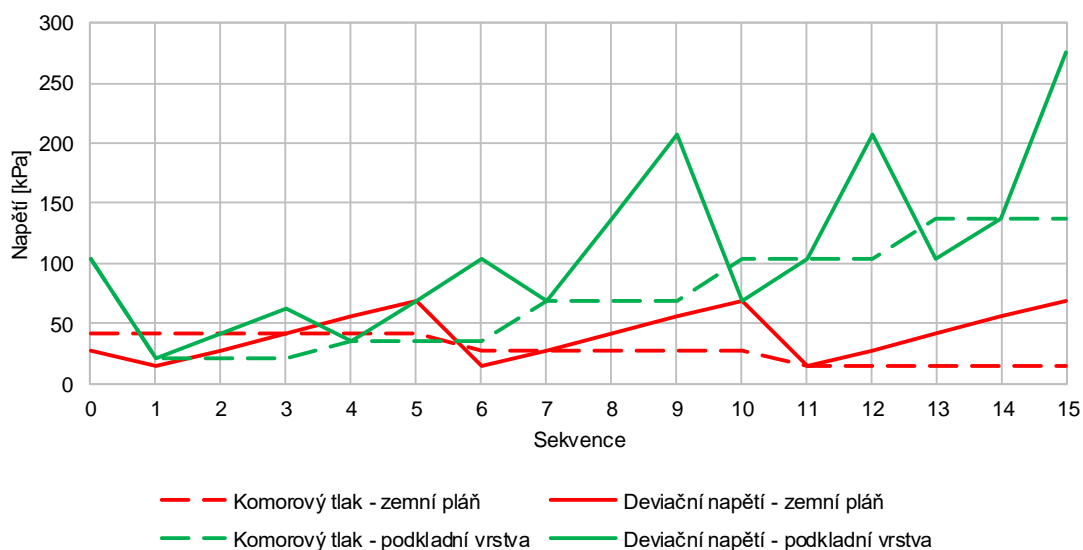
Jednotlivé hodnoty napětí jsou rozdílné pro zemní pláň a pro konstrukční vrstvy (Tab. 15). Svrchní vrstvy odolávají větším účinkům dopravního zatížení a teplotních změn. Z těchto důvodů jsou hodnoty aplikovaného maximálního osového napětí a komorového tlaku rozdílné (Graf 3). Při návrhu pražcového podloží je požadováno dosažení vyššího modulu přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku než na zemní pláni. [6] [14]

Tab. 15 Cyklická zkouška resilient modulus [6]

Sekvence	Zemní pláň		Podkladní vrstvy		Počet cyklů
	Komorový tlak $\sigma_3$	Deviační napětí $\sigma_d$	Komorový tlak $\sigma_3$	Deviační napětí $\sigma_d$	
	kPa	kPa	kPa	kPa	
0	41,4	27,6	103,4	103,4	1 000
1	41,4	13,8	20,7	20,7	100
2	41,4	27,6	20,7	41,4	100
3	41,4	41,4	20,7	62,1	100
4	41,4	55,2	34,5	34,5	100
5	41,4	68,9	34,5	68,9	100
6	27,6	13,8	34,5	103,4	100
7	27,6	27,6	68,9	68,9	100
8	27,6	41,4	68,9	137,9	100
9	27,6	55,2	68,9	206,8	100
10	27,6	68,9	103,4	68,9	100
11	13,8	13,8	103,4	103,4	100
12	13,8	27,6	103,4	206,8	100
13	13,8	41,4	137,9	103,4	100
14	13,8	55,2	137,9	137,9	100
15	13,8	68,9	137,9	275,8	100

U zeminy zemní pláň se po 5 sekvencích sníží komorový tlak. Působící osově napětí se postupně navyšuje s každou sekvencí. Když dojde ke snížení komorového tlaku, tak osově napětí poklesne na počáteční hodnotu, která se rovná komorovému tlaku při posledních pěti sekvencích. Postupné navyšování osového napětí se během zkoušky celkem třikrát opakuje a jeho hodnoty jsou shodné.

V případě zeminy, resp. kameniva podkladní vrstvy se působící komorový tlak naopak zvyšuje po třech sekvencích. Osově napětí postupně narůstá a při navýšení komorového tlaku se obdobně jako u zemní pláň sníží. Při prvních dvou snížení se osově napětí a komorový tlak rovnají. Během zbývajících dvou snížení osově napětí dosáhne původního komorového tlaku. Maximální hodnoty osového napětí postupně narůstají a postupné zvýšení během tří sekvencí se opakuje pětkrát.

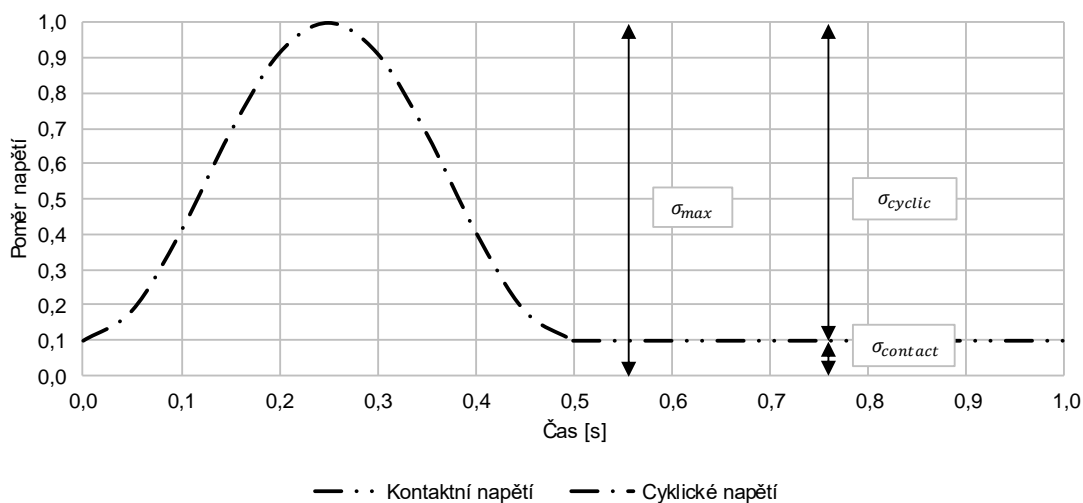


Graf 3 Cyklická zkouška resilient modulus [6]

### 6.4.3. Triaxiální zkouška

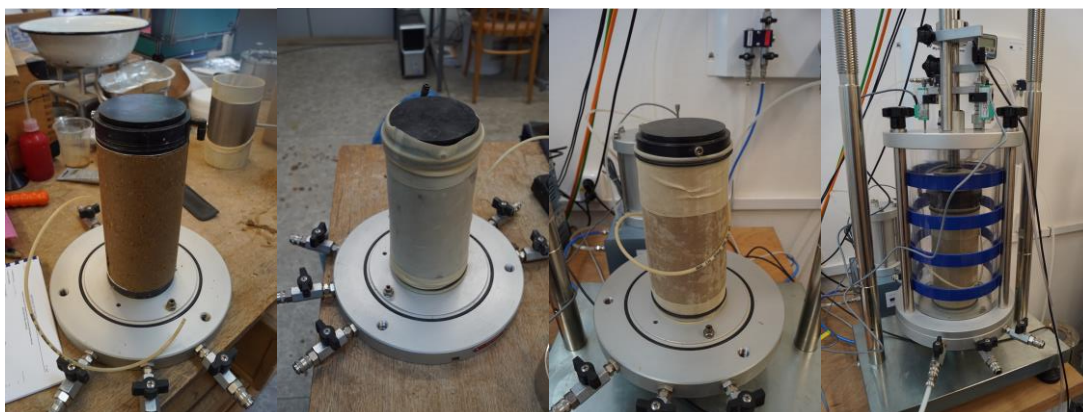
V úvodu praktické části bylo zmíněno, že jsem vzorky zemin z lokalit Lysé nad Labem – **LNL**, Sudoměřic-Votic – **SV** a Prahy, Smíchova – **PS** připravil se třemi rozdílnými vlhkostmi. Pro zkoušky jsem vybral in situ, -2 % od optimální a optimální vlhkost. Celkem 9 vzorků jsem podrobil cyklickým zkouškám.

Pro jemnozrné vzorky, které odpovídají soudržné zemině typu 2, jsem zvolil zkušební metodu pro zeminy zemní pláně s nižšími úrovněmi působícího napětí. Triaxiální zkouška probíhala jako neodvodněná. Zvolená zatěžovací křivka odpovídá haversinus funkci, kdy puls trvá 500 ms a zbývající perioda shodně 500 ms při frekvenci 1 Hz (Graf 4). Zvolená délka cyklického zatížení vychází z použitého dynamického triaxiálního přístroje.



Graf 4 Zatěžovací křivka haversinus

Na zhutněný vzorek jsem nanесl gumovou membránu pomocí pomocného vakuového válce. Na podstavu vzorku, která je součástí podstavy triaxiální komory, jsem dal filtrační papírek a položil zkušební vzorek. Gumovou membránu jsem na spodní podstavě postupně přichytil dvěma těsníci O kroužky. Na vrch vzorku jsem položil filtrační papírek a vrchní podstavu. Na podstavu jsem taktéž připevnil membránu O kroužky a utěsnil vzorek. Po kontrole usazení vzorku na podstavě komory jsem k ní připevnil triaxiální komoru s aretovaným pístem (Obr. 90). Bylo nutné si vždy dát pozor, aby byl píst nad úrovní svrchní podstavy a nedošlo k nechtěné deformaci vzorku.



Obr. 90 Postup vložení vzorku do triaxiální komory

Smontovanou triaxiální komoru jsem vložil do zatěžovacího zařízení. Po připevnění triaxiální komory k podstavě zatěžovacího rámu bylo možné spojit zatěžovací píst komory a zatěžovací lisu. Po spuštění triaxiálního zařízení a počítače včetně ovládacího softwaru bylo možné ovládat jednotlivé komponenty. Píst jsem nastavil do kontaktní polohy s horní podstavou vzorku. Napojil jsem zdroj komorového tlaku na triaxiální komoru, kdy během zkoušky na vzorek působil stlačený vzduch. K pístu jsem připevnil dva protilehlé LVDT snímače jejichž čidla se dotýkají vrchní podstavy triaxiální komory. Rozsah měřidel je 10 mm, protože cílem zkoušky je měření pružných deformací, které u zemin dosahují nízkých hodnot.

Takto sestavená aparatura je připravená na cyklickou zkoušku. Mezi zadávané vstupní parametry zkoušky patří zkušební postup, resp. úroveň zatížení, vlastnosti zkušební vzorku, počty cyklů, délka cyklu a interval sběru dat. Po nastavení softwaru Resilient Modulus jsem zkontroloval triaxiální přístroj a otevřel ventil komorového tlaku. Zahájením testu probíhala zkouška automaticky. Během jednotlivých mezifází dosáhl přístroj požadovaných hodnot napětí pro následnou sekvenci. Během kondicionování jsem těleso podrobil 1 000 cyklům a během každé zkušební sekvence 100 zatěžovacím cyklům. Zatěžovacích sekvencí bylo 15 v souladu s AASHTO T 307.

Ze zaznamenaných dat se dle AASHTO T 307 vyhodnocuje průměr a směrodatná odchylka z posledních 5 cyklů během sekvence. Data z textových souborů, které jsou výstupem ze softwaru dynamického triaxiálního přístroje, jsem převedl do prostředí tabulkového editoru. Principem mého tabulkové souboru v Microsoft Excel je automatické načítání dat z jednotlivých textových souborů cyklické zkoušky. Stanovil jsem průměrné hodnoty z celé sekvence a za posledních 5 cyklů během sekvence. Během analýzy dat jsem vyhodnotil naměřená data do tabulek a následně graficky znázornil:

- Komorový tlak
- Maximální osová, kontaktní a cyklická síla
- Maximální osová, kontaktní a cyklické napětí
- Pružná deformace a přetvoření
- Resilient Modulus
- Trvalá deformace a přetvoření
- Celková deformace a přetvoření

V přílohové části nejsou z důvodu zjednodušení uvedeny hodnoty osově síly a deformace, protože jsou přímo úměrou napětí, resp. přetvoření. V přílohových částech jsou uvedeny hodnoty, které jsou zprůměrovány v souladu s normou z posledních 5 cyklů během sekvence. Výše popsaný postup jsem aplikoval u všech 9 zkušebních vzorků.

Zkušební vzorky zemin z Lysé nad Labem, Sudoměřic-Votic a Prahy, Smíchova jsou popisovány ve zkratkách. Výsledky z jednotlivých zkoušek jsou shrnuty zvlášť pro jednotlivé zeminy.

- Lysá nad Labem: **LNL\_1, LNL\_2, LNL\_4** (Obr. 91) (Tab. 16) (Graf 5)
- Sudoměřice-Votice: **SV\_1, SV\_6, SV\_3** (Obr. 92) (Tab. 17) (Graf 6)
- Praha, Smíchov: **PS\_1, PS\_2, PS\_4** (Obr. 93) (Tab. 18) (Graf 7)



Obr. 91 Vzorky LNL\_1, LNL\_2, LNL\_4



Obr. 92 Vzorky SV\_1, SV\_6, SV\_3



Obr. 93 Vzorky PS\_1, PS\_2, PS\_4

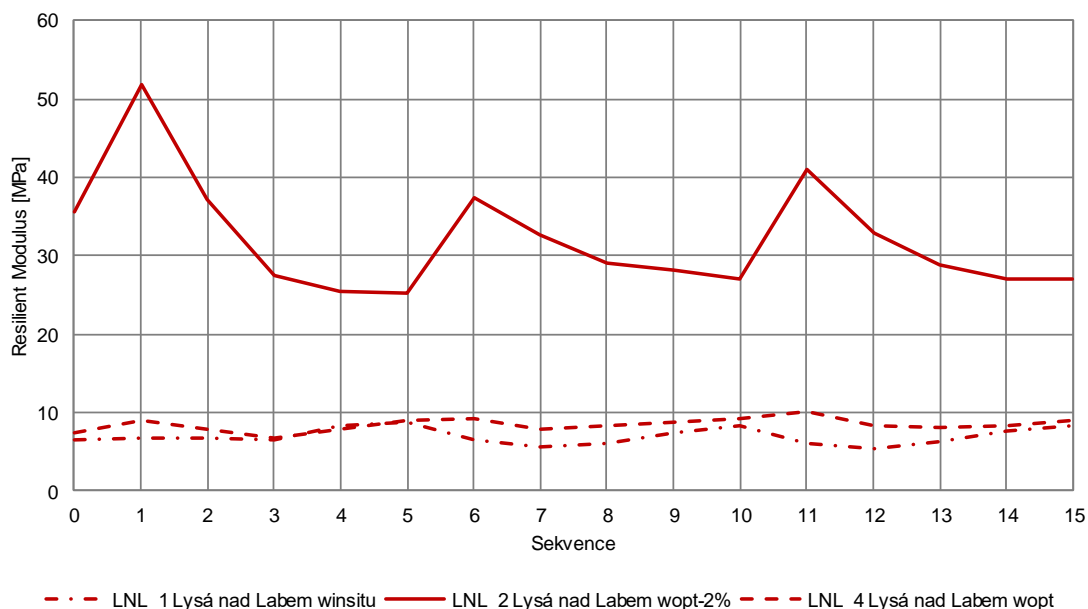
Z výsledků zkoušek je patrné, že průběh resilient modulu je v závislosti na působícím zatížení rozdílný. Po snížení komorového tlaku a osového napětí dochází k nárůstu a následnému poklesu pružného modulu, nebo naopak ke snížení a následném růstu. Zvýšení a následné snižování odpovídá vzorkům **LNL\_4** při optimální vlhkosti, **LNL\_2** při -2 % od optimální vlhkosti a **PS\_4** při optimální vlhkosti.

Snížení a následný vzestup je patrný u vzorků **LNL\_1** při in situ vlhkosti, **SV\_3** při optimální vlhkosti, **SV\_6** při -2 % od optimální vlhkosti a **PS\_2** při -2 % od optimální vlhkosti. Vzorek **SV\_1** při in situ vlhkosti odpovídá druhé skupině, avšak výrazné zlomy zde nejsou patrné. Obdobně vzorek **PS\_1** při in situ vlhkosti odpovídá ze začátku první skupině a následně druhé.

Hodnoty resilient modulu jsou podobné pro vzorky **SV\_3**, **PS\_4** při optimální vlhkosti a pro **SV\_6**, **PS\_2** při -2 % od optimální vlhkosti. Naopak u vzorku **LNL\_2** je resilient modulus při -2 % od optimální vlhkosti výrazně vyšší než výše jmenované vzorky. Při optimální vlhkosti je pro vzorek **LNL\_4** trend opačný a hodnoty jsou nízké. Při in situ vlhkosti jsou hodnoty všeobecně nejnižší. Nejvyšších hodnot dosahuje vzorek **SV\_1**. Naopak zbylé vzorky **LNL\_1** a **PS\_1** mají podobně nižší hodnoty. Dané rozdělení výsledků při in situ vlhkosti odpovídá rozdílu mezi vlhkostí optimální a vlhkostí při odběru vzorku, který je uveden v první kapitole praktické části.

Tab. 16 Resilient modulus LNL\_1, LNL\_2, LNL\_4

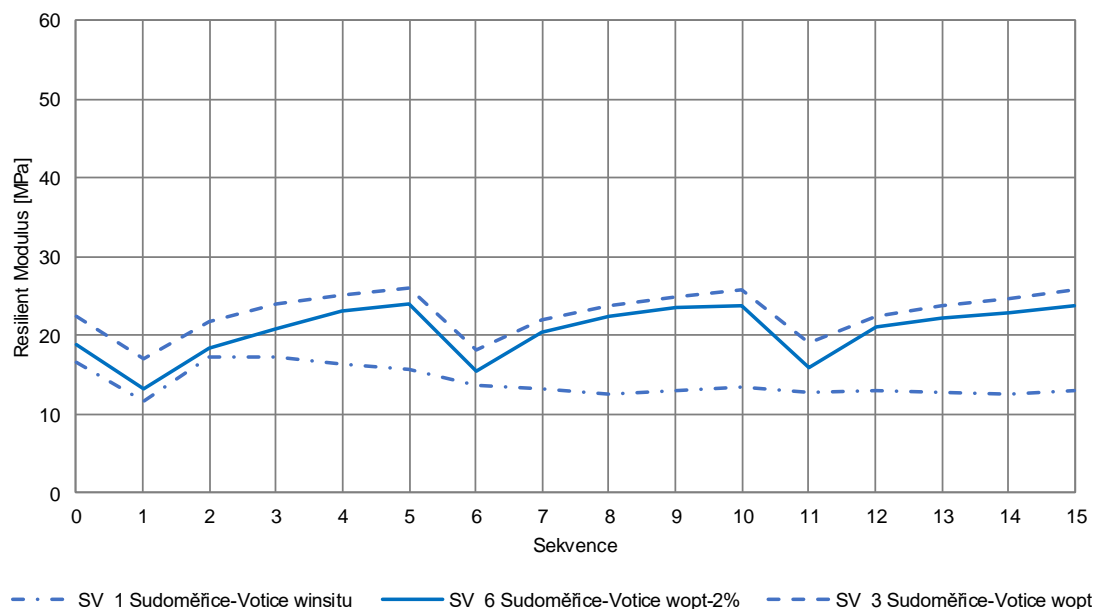
Vzorek			LNL_1	LNL_2	LNL_4
Místo			Lysá nad Labem	Lysá nad Labem	Lysá nad Labem
Vlhkost			winsitu	wopt-2%	wopt
Sekvence	Komorový tlak	Maximální deviator napětí	Resilient Modulus		
	$S_{cell}$	$S_{max}$	$M_r$		
[-]	[kPa]	[kPa]	[MPa]		
0	41,4	27,6	6,517	35,671	7,321
1	41,4	13,8	6,846	51,710	8,889
2	41,4	27,6	6,784	37,090	7,885
3	41,4	41,4	6,463	27,459	6,856
4	41,4	55,2	8,216	25,550	7,824
5	41,4	68,9	8,794	25,194	8,930
6	27,6	13,8	6,611	37,342	9,273
7	27,6	27,6	5,666	32,681	7,831
8	27,6	41,4	6,088	29,071	8,380
9	27,6	55,2	7,380	28,170	8,792
10	27,6	68,9	8,261	26,922	9,256
11	13,8	13,8	6,057	41,095	10,195
12	13,8	27,6	5,317	32,865	8,319
13	13,8	41,4	6,296	28,918	8,021
14	13,8	55,2	7,562	27,071	8,299
15	13,8	68,9	8,342	27,044	8,895
<b>Aritmetický průměr</b>			<b>6,979</b>	<b>31,879</b>	<b>8,510</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>			1,065	7,283	0,798



Graf 5 Resilient modulus LNL\_1, LNL\_2, LNL\_4

Tab. 17 Resilient modulus SV\_1, SV\_6, SV\_3

Vzorek			SV_1	SV_6	SV_3
Místo			Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice
Vlhkost			winsitu	wopt-2%	wopt
Sekvence	Komorový tlak	Maximální deviator napětí	Resilient Modulus		
	$S_{cell}$	$S_{max}$	$M_r$		
[-]	[kPa]	[kPa]	[MPa]		
0	41,4	27,6	16,656	18,717	22,384
1	41,4	13,8	11,523	13,299	17,075
2	41,4	27,6	17,182	18,476	21,848
3	41,4	41,4	17,327	20,929	24,032
4	41,4	55,2	16,449	23,193	25,144
5	41,4	68,9	15,688	24,100	25,916
6	27,6	13,8	13,689	15,465	18,200
7	27,6	27,6	13,164	20,484	22,015
8	27,6	41,4	12,636	22,338	23,704
9	27,6	55,2	12,991	23,435	24,844
10	27,6	68,9	13,398	23,796	25,802
11	13,8	13,8	12,762	15,869	19,028
12	13,8	27,6	12,917	21,058	22,329
13	13,8	41,4	12,674	22,260	23,693
14	13,8	55,2	12,582	22,860	24,733
15	13,8	68,9	13,036	23,822	25,787
<b>Aritmetický průměr</b>			<b>13,868</b>	<b>20,759</b>	<b>22,943</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>			1,839	3,433	2,851

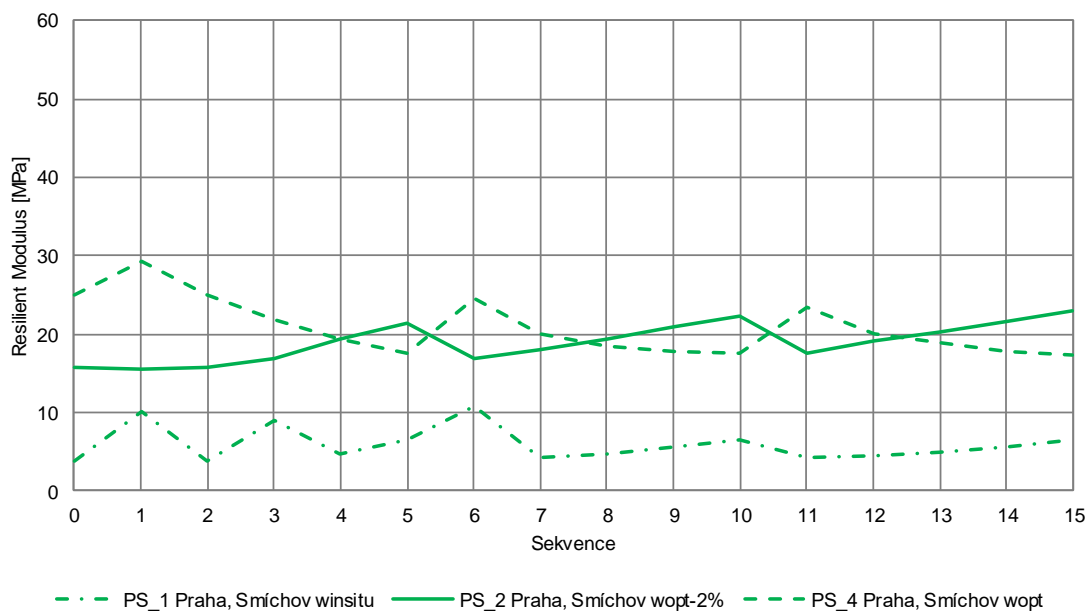


Graf 6 Resilient modulus SV\_1, SV\_6, SV\_3



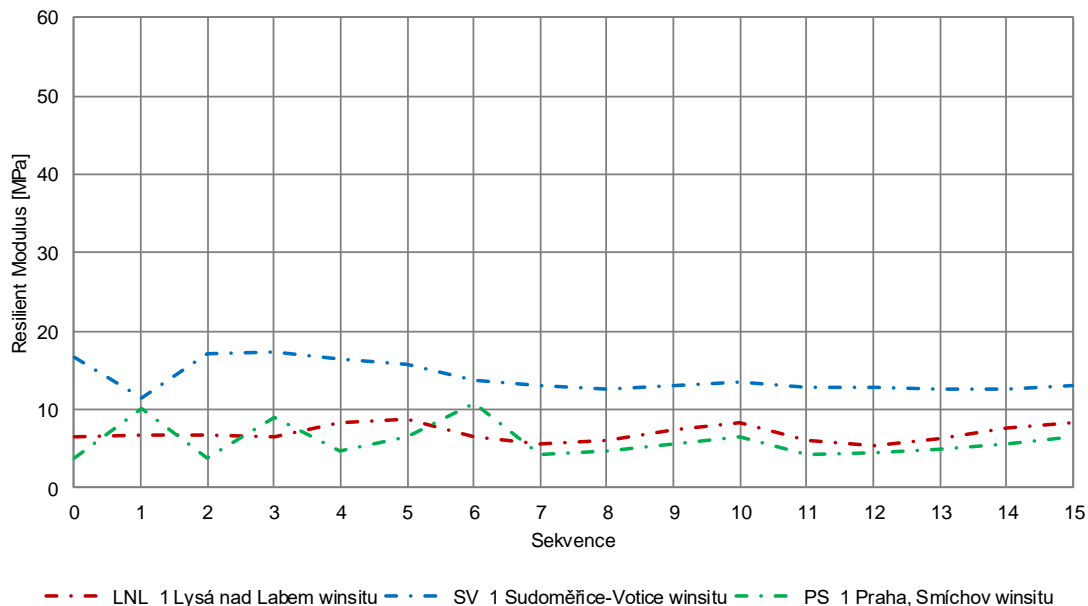
Tab. 18 Resilient modulus PS\_1, PS\_2, PS\_4

Vzorek			PS_1	PS_2	PS_4
Místo			Praha, Smíchov	Praha, Smíchov	Praha, Smíchov
Vlhkost			winsitu	wopt-2%	wopt
Sekvence	Komorový tlak	Maximální deviator napětí	Resilient Modulus		
	$S_{cell}$	$S_{max}$	$M_r$		
[-]	[kPa]	[kPa]	[MPa]		
0	41,4	27,6	3,797	15,855	25,015
1	41,4	13,8	10,115	15,484	29,370
2	41,4	27,6	3,703	15,777	25,099
3	41,4	41,4	8,970	16,948	21,790
4	41,4	55,2	4,610	19,392	19,434
5	41,4	68,9	6,600	21,438	17,670
6	27,6	13,8	10,751	16,783	24,605
7	27,6	27,6	4,230	18,066	19,951
8	27,6	41,4	4,792	19,430	18,434
9	27,6	55,2	5,725	21,008	17,813
10	27,6	68,9	6,585	22,352	17,556
11	13,8	13,8	4,219	17,631	23,356
12	13,8	27,6	4,381	19,122	20,100
13	13,8	41,4	5,041	20,194	18,819
14	13,8	55,2	5,506	21,709	17,693
15	13,8	68,9	6,518	23,069	17,413
<b>Aritmetický průměr</b>			<b>6,116</b>	<b>19,227</b>	<b>20,607</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>			2,203	2,401	3,549

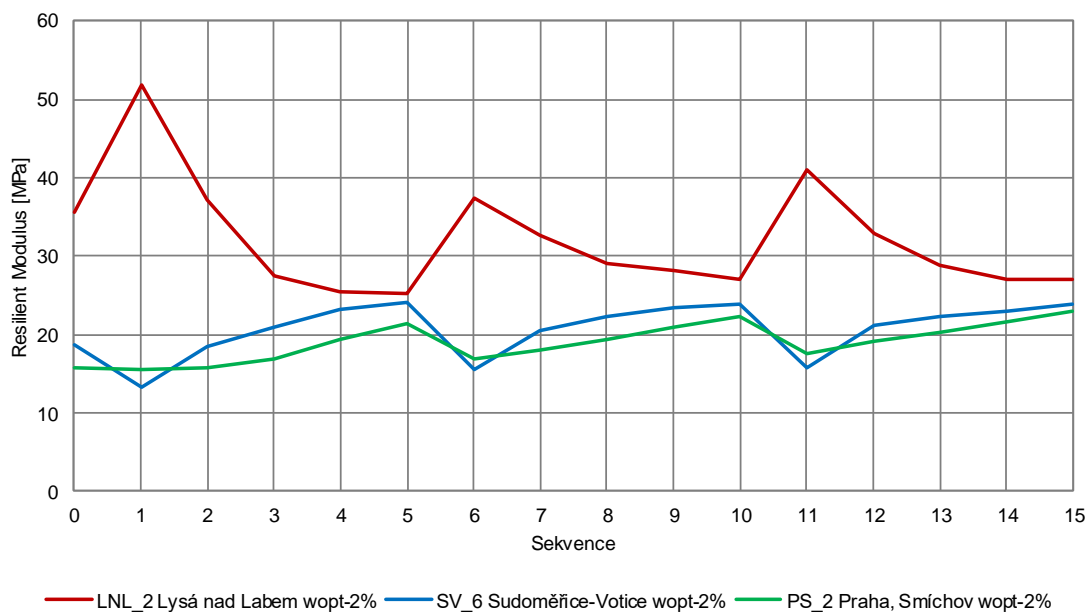


Graf 7 Resilient modulus PS\_1, PS\_2, PS\_4

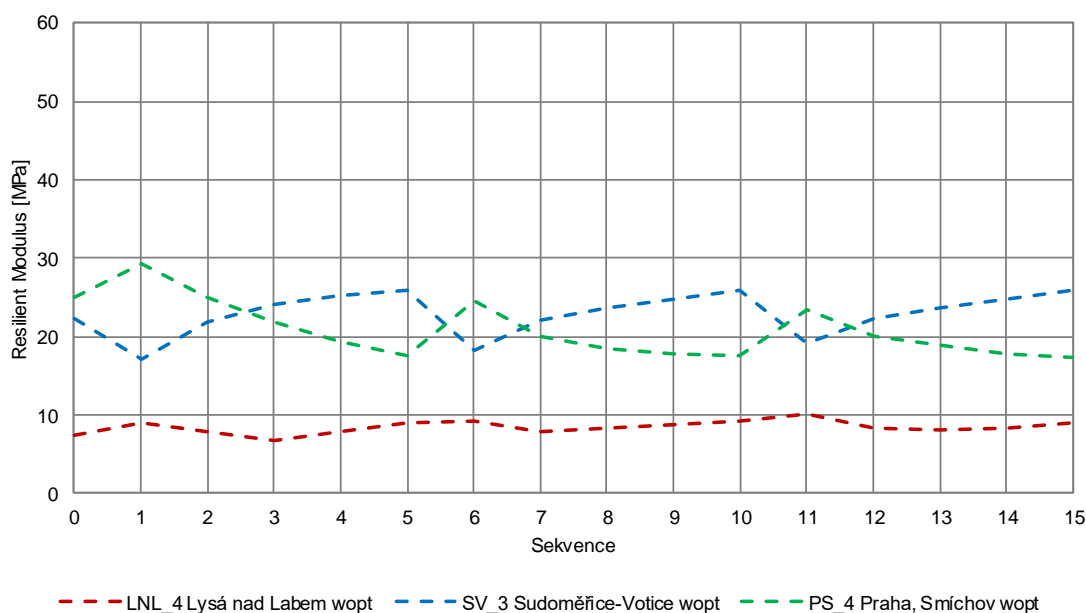
Následně jsem znázornil výsledky zkoušek v závislosti na vlhkosti vzorku. Dle výše uvedeného popisu byly zeminy zkoušeny při in situ (Graf 8), při -2 % od optimální (Graf 9) a při optimální vlhkosti (Graf 10).



Graf 8 Resilient modulus in situ vlhkost



Graf 9 Resilient modulus -2 % od optimální vlhkosti



Graf 10 Resilient modulus optimální vlhkost

Souhrnně lze říct, že hodnota resilient modulu závisí na řadě faktorů. V rešeršní části byly zmíněny faktory vlhkosti, působícího napětí a typu zeminy. Výsledky třech zkušných zemín jsou závislé na jmenovaných faktorech. Všechny tři zeminy byly jemnozrnného charakteru, avšak s rozdílným podílem jednotlivých částic a tvarem křivky zrnitosti. Na zkušné soudržné zeminy mělo ve většině případů větší vliv osová napětí. Výsledné křivky průběhu resilient modulu během cyklické zkoušky se mění v závislosti na osovém napětí. Vliv změny komorového tlaku na tvaru, resp. celkovém sklonu křivky není znát.

U vzorků **LNL\_4** při optimální vlhkosti, **LNL\_1** při in situ vlhkosti a **PS\_1** při in situ vlhkosti došlo k výrazné plastické deformaci. Maximální povolená hodnota 5 % osového přetvoření byla překročena. Výsledky jsou zde uváděny, avšak dané vzorky zemín jsou při zvolených vlhkostech pro zkoušku nevhodné. U zkušebního postupu dle ČSN EN 13286-7 jsem od těchto vzorků ustoupil z důvodů vyšších hodnot napětí při celé zkoušce a dvacetinásobnému počtu cyklů během kondicionování. Průměrné naměřené hodnoty resilient modulu budou následně porovnány s modulem pružnosti (Tab. 19).

Tab. 19 Průměrné hodnoty resilient modulu

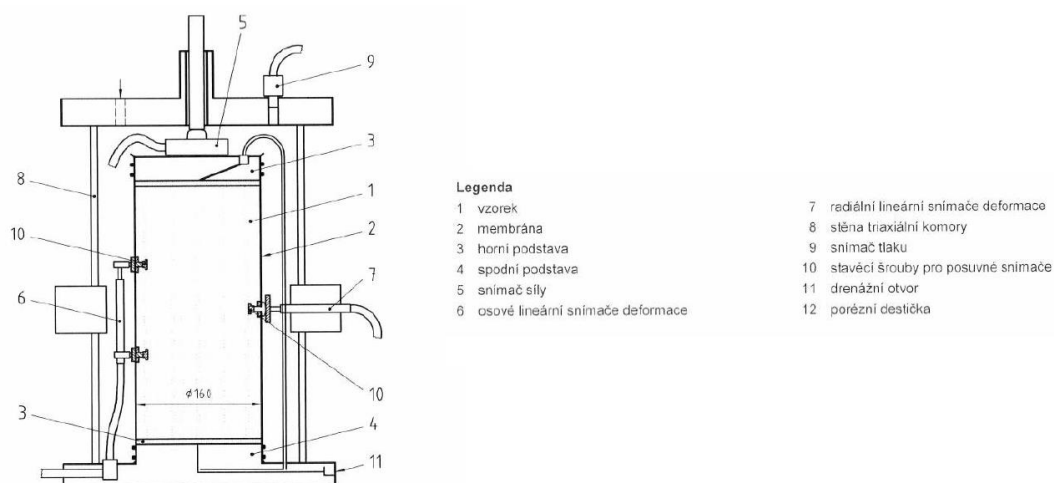
Místo	Lysá nad Labem		Sudoměřice-Votice		Praha, Smíchov	
Vlhkost	<b>Resilient Modulus</b>					
	$M_r$					
	[MPa]					
<b>winsitu</b>	LNL_1	<b>6,979</b>	SV_1	<b>13,868</b>	PS_1	<b>6,116</b>
<b>wopt-2%</b>	LNL_2	<b>31,879</b>	SV_6	<b>20,759</b>	PS_2	<b>19,227</b>
<b>wopt</b>	LNL_4	<b>8,510</b>	SV_3	<b>22,943</b>	PS_4	<b>20,607</b>

## 6.5. Modul pružnosti

Cyklická triaxiální zkouška dle ČSN EN 13286-7 je určena pro nestmelené vrstvy. Během zkoušky se určí modul pružnosti. V závislosti na působícím napětí se rozlišují dvě metody. Obě varianty jsou s proměnlivým osovým zatížením a liší se proměnlivým (metoda A), resp. konstantním (metoda B) komorovým tlakem. Na těleso mohou během cyklické zkoušky působit vyšší nebo nižší hodnoty zatížení. Zkušební postup je obdobný jako u resilient modulu. [9]

### 6.5.1. Zatěžovací zařízení

Vzorek je umístěn uvnitř triaxiální komory, na kterou působí zatěžovací píst a sledované hodnoty jsou zaznamenány měřicími zařízeními (Obr. 94). Během zkoušky se měří aktuální komorový tlak, osová zatížení, vertikální a horizontální posun. Siloměr by měl být umístěn uvnitř triaxiální komory. Osová a radiální deformace je zaznamenávána snímači připevněnými na vzorek. Požadavky na měřicí zařízení jsou složitější než u předešlého postupu. V rámci praktické části jsem v závislosti na vybavení přístroje měřil vertikální posun snímači na svrchní podstavě komory v souladu s AASHTO T 307. [9]



Obr. 94 Triaxiální komora dle ČSN 13 286-7 [9]

### 6.5.2. Cyklické zatěžování

Zkouška pružného chování je vhodná pro stanovení modulu pružnosti, který je závislý na hodnotě napětí, nebo pro parametry nelineárních pružnostních modelů. Při zkoušce plastických deformací se provádí analýza trvalých deformací pod určitým napětím. Při vícestupňové zkoušce se analyzují plastické deformace materiálu při navyšujících se úrovních napětí. Modul pružnosti se stanovuje i u zkoušek plastického chování. [9]

Modul pružnosti se rovná podílu pružného osového napětí a odpovídající pružné osově deformace. Pružné osově napětí je rozdílem maximálního a minimálního deviátoru napětí, resp. osového napětí. Definice modulu je shodná s předešlou zkouškou resilient modulu. Zatížení jsou ve stejné fázi u metody proměnného komorového tlaku a u obou metod působí frekvenčně v rozsahu 0,2 až 10 Hz. [9]

### Pružné chování

Před samotnou pružnou zkouškou je těleso zatěžováno 20 000 cykly, kterými se ustálí plastické deformace a materiál se déle chová pružně. Počáteční zatěžování je možné ukončit dříve za předpokladu ustálení plastických deformací a konstantního modulu pružnosti. Zkouška pružného chování materiálu je založená na cyklickém zatěžování vzorku jednotlivými dráhami napětí. Během sekvence je těleso zatíženo 100 cykly. Postupně se aplikuje 19 sekvencí u metody A, nebo 29 sekvencí u metody B. Vyšší počet sekvencí není vzhledem k vysokým hodnotám napětí nutný a počet může být shodný s metodou A. Během zkoušky nesmí dojít k přetvoření většímu než 2 %. [9]

Modul pružnosti při proměnném komorovém tlaku (metoda A)

$$E_r = \frac{\sigma_1^{r^2} + \sigma_1^r * \sigma_3^r - 2 * \sigma_3^{r^2}}{\sigma_1^r * \varepsilon_1^r + \sigma_3^r * \varepsilon_1^r - 2 * \sigma_3^{r^2} * \varepsilon_3^r}$$

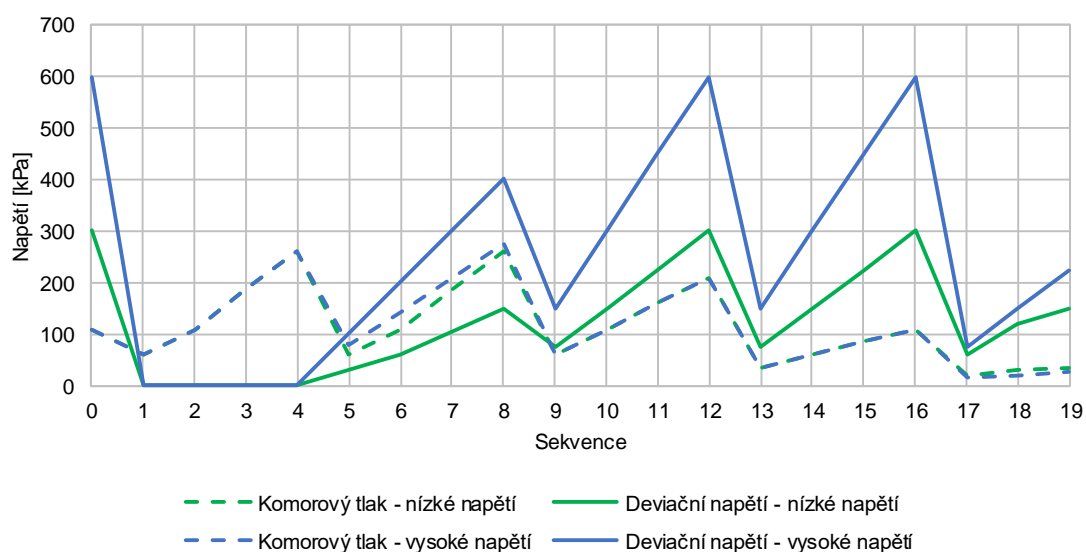
$\sigma_1^r = \sigma_1^{\max} - \sigma_1^{\min}$  – pružné osově napětí;  $\sigma_3^r = \sigma_3^{\max} - \sigma_3^{\min}$  – pružný komorový tlak

Modul pružnosti při konstantním komorovém tlaku (metoda B)

$$E_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r}$$

$\varepsilon_1^r$  – pružné osově přetvoření;  $\varepsilon_3^r$  – pružné radiální přetvoření

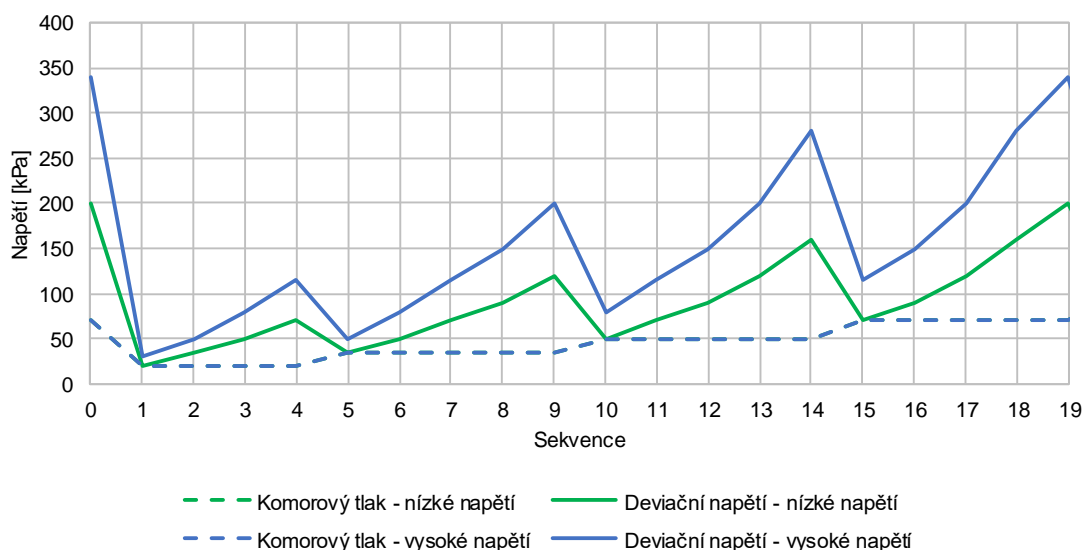
Maximální hodnota napětí a následné dráhy napětí se volí z následujících možností. Rozlišují se úrovně napětí vysokého a nízkého. Hodnoty vysokého napětí odpovídají horním podkladním vrstvám v pozemní komunikaci. Nízké napětí odpovídá spodním podkladním vrstvám. Hodnoty a dráhy napětí jsou stanoveny zvlášť pro metodu A i B (Graf 11) (Graf 12). Dráhy napětí jsou zde v tabulce uvedeny pouze pro metodu B, protože je předmětem praktické části (Tab. 20). Použitý dynamický triaxiální přístroj dokáže cyklovat pouze osově zatížení. [9]



Graf 11 Zkouška pružného chování dle metody A [9]

Tab. 20 Zkouška pružného chování dle metody B [9]

Sekvence	Nízké napětí		Vysoké napětí		Počet cyklů
	Komorový tlak $\sigma_3$	Deviátor napětí $\sigma_d$	Komorový tlak $\sigma_3$	Deviátor napětí $\sigma_d$	
	kPa	kPa	kPa	kPa	
0	70	200	70	340	20 000
1	20	20	20	30	100
2	20	35	20	50	100
3	20	50	20	80	100
4	20	70	20	115	100
5	35	35	35	50	100
6	35	50	35	80	100
7	35	70	35	115	100
8	35	90	35	150	100
9	35	120	35	200	100
10	50	50	50	80	100
11	50	70	50	115	100
12	50	90	50	150	100
13	50	120	50	200	100
14	50	160	50	280	100
15	70	70	70	115	100
16	70	90	70	150	100
17	70	120	70	200	100
18	70	160	70	280	100
19	70	200	70	340	100



Graf 12 Zkouška pružného chování dle metody B [9]

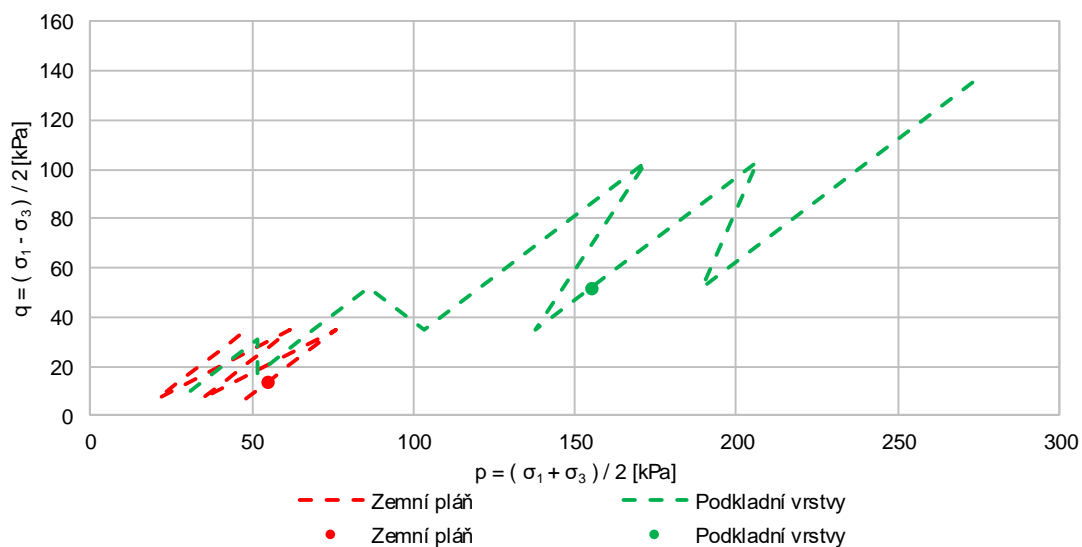
Konstantní hodnota komorového tlaku je u metody B udržována během 4, resp. 5 sekvencí a následně je navýšena. Amplituda osového napětí se po každé sekvenci navyšuje. Ke snížení osového napětí dochází, když se zvýší komorový tlak. Osově napětí se nesnižuje na minimum, ale vždy na o úroveň vyšší napětí než v předešlém postupu. Obdobně maximální dosažená hodnota amplitudy se zvyšuje. Během 19 sekvencí se postup navyšování osového napětí čtyřikrát opakuje.

Ve srovnání s AASHTO T 307 jsou dráhy napětí metody B odlišné v celkovém průběhu, maximálních hodnotách a počtu sekvencí. Cyklické zatěžování probíhá minimálně během 19 sekvencí na místo 15. Metoda A nebude porovnáována, neboť během zkoušky působí cyklický komorový tlak.

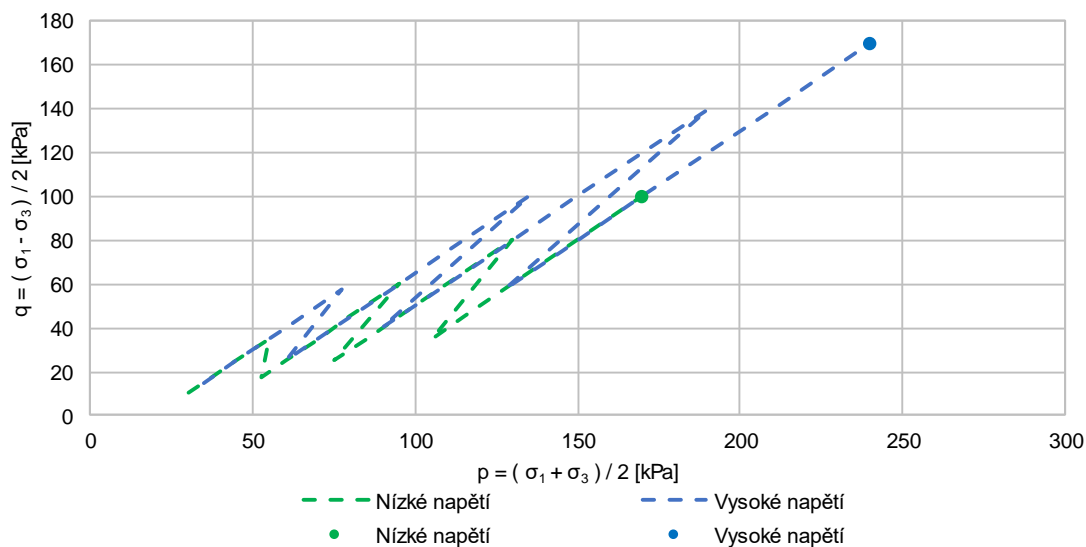
Na začátku teoretické části byly zmíněny hodnoty  $p$  a  $q$ , které odpovídají střední hodnotě normálového a maximální hodnotě tangenciálního napětí. Pomocí  $p$  a  $q$  hodnot jsou na následujících grafech porovnány zkoušky resilient modulu a modulu pružnosti (Graf 13) (Graf 14). Nárůst hodnoty  $p$  znamená zpevnění, a naopak nárůst  $q$  deformaci vzorku.

U zkoušky dle ČSN EN 13286-7 jsou komorový tlak a osově zatížení během přípravné fáze rovny maximálnímu zatížení během následné pružné zkoušky. Maximální hodnoty  $p$  je dosaženo u zkoušky podkladní vrstvy podle postupu AASHTO T 307. Nejvyšší hodnota  $q$  je u vyšších napětí pro podkladní vrstvy dle ČSN EN 13286-7. Všeobecně lze říct, že dráhy napětí podle ČSN EN 13286-7 se shodují s dráhami napětí pro podkladní vrstvy dle AASHTO T 307. Hodnoty zatížení pro zemní pláň jsou nižší. V rámci praktické části byly porovnávány nižší

hodnoty dle AASHTO T 307 a ČSN EN 13286-7. U obou zatěžovacích postupů je podobný tvar zatěžovací křivky deviačního napětí a komorového tlaku.



Graf 13 Hodnoty p a q dle AASHTO T 307



Graf 14 Hodnoty p a q dle ČSN EN 13 286-7

Klasifikaci materiálů z výše popsané pružné zkoušky lze provést na základě trvalého přetvoření a modulu pružnosti (Tab. 21). Charakteristická hodnota trvalého přetvoření  $\epsilon_c$  je rovna rozdílu trvalého přetvoření po 20 000 a 100 cyklech. Charakteristický modul pružnosti  $E_c$  se stanoví pro určité hodnoty napětí. Postup je vhodný pro podkladní vrstvy s nižším dopravním zatížením a pro metodu A s vyššími úrovněmi napětí. [9]



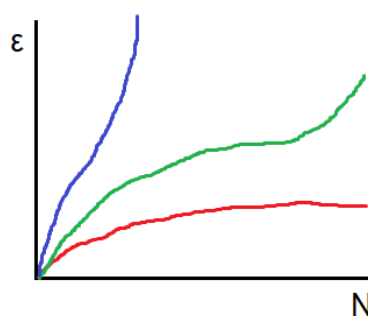
Tab. 21 Klasifikace dle pružné zkoušky [9]

Třída	Modul pružnosti $E_c$	Trvalé osové přetvoření $\epsilon_c$
C1	500 <	< 0,0025
C2	500 <	0,0025 < 0,006
	250 < 500	< 0,006
C3	250 <	0,006 <

### Plastické chování

Zkouška se zaměřuje na rozvoj trvalých deformací. Dělí se na jednostupňovou a vícestupňovou zkoušku. Obdobně jako u pružné zkoušky se rozlišuje členění na vysoké a nízké napětí v podkladních vrstvách. Při jednostupňové zkoušce se aplikuje jedna dráha napětí a těleso je zatěžováno 80 000 cykly. Dráha napětí by měla vycházet ze stanovených napětí pružné zkoušky. Na těleso působí konstantní, nebo proměnný komorový tlak. Maximální dovolené přetvoření se rovná 2 %. U vícestupňové zkoušky se těleso zatěžuje několika drahami napětí. Během zkoušky působí na těleso konstantní komorový tlak. Každá dráha napětí je aplikována 10 000 cykly. Maximální přetvoření se rovná 0,5 %. [9]

Klasifikace dle plastické zkoušky vychází z průběhu plastické deformace. V průběhu zatěžování může dojít k ustálení plastické deformace (červená křivka), dočasnému ustálení (zelená křivka) a porušení při nízkém počtu aplikovaných cyklů (modrá křivka) (Obr. 95). Z tohoto předpokladu lze definovat dvě hodnoty kritického napětí, na základě kterých je možno materiál charakterizovat. Jsou to mezní hodnoty ustálení plastických deformací a dočasného ustálení plastických deformací. [9]



Obr. 95 Průběh plastické deformace [9]

#### 6.5.3. Triaxiální zkouška

Vzorky zemin **LNL\_3**, **SV\_7** a **PS\_3** jsem připravil na vlhkost o 2 % nižší než optimální vlhkost. Zvolená vlhkost vychází z mého předpokladu, že u zkoušených zemin bude lepší odolnost proti vzniku trvalých deformací při nižší vlhkosti než optimální. Pouze u zeminy **SV** jsem připravil navíc vzorky **SV\_2**

při in situ a **SV\_4** při optimální vlhkosti, resp. stejně jako u zkoušky Resilient Modulu. Postupně jsem celkem 5 vzorků podrobil cyklickým zkouškám s nižšími úrovněmi napětí a za neodvodněného stavu (Obr. 96).



Obr. 96 Vzorky LNL\_3, SV\_2, SV\_7, SV\_4, PS\_3

Vzhledem k vysokému počtu cyklů během přípravy vzorku jsem přistoupil k cyklickému zatěžování při frekvenci 5 Hz. Během následné zkoušky pružného chování jsem frekvenci snížil na 1 Hz stejně jako u zkoušky resilient modulu. Tvar zatěžovací křivky odpovídal funkci haversinus. Zkoušku pružného chování jsem v závislosti na typu triaxiálního přístroje prováděl jako metodu B, která znamená proměnné osově napětí a konstantní komorový tlak.

Osazení vzorku a příprava triaxiální zkoušky modulu pružnosti je shodná se zkouškou resilient modulu. Do ovládacího softwaru jsem nahrál sekvence v souladu s ČSN EN 13286-7. Samotná zkouška sestávala vždy z dvou částí a obě musely být zvlášť zahájeny. Nejdříve jsem zahájil přípravnou fázi s 20 000 zatěžovacími cykly. Po skončení zkoušky jsem těleso nechal v komoře a zahájil pružnou zkoušku, kdy na vzorek během 19 sekvencí působilo pokaždé 100 zatěžovacích cyklů.

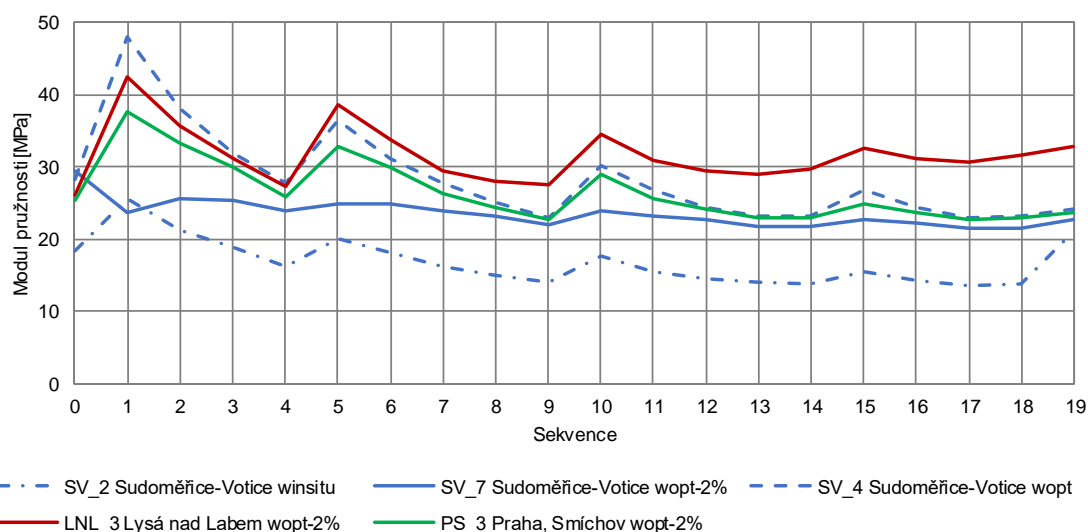
Z obou fází jsem zpracovával hodnoty komorového tlaku, osově napětí, pružného, trvalého, celkového přetvoření a výsledného modulu pružnosti. V souladu s ČSN EN 13286-7 se během přípravné fáze zaznamenávají a průměrují hodnoty při zvolených cyklech a 10 následujících. Během zkoušky pružného chování jsem stanovil průměr z hodnot mezi 90. až 100. zatěžovacím cyklem. Zmíněný tabulkový soubor jsem upravil pro analýzu dat s vyšším počtem cyklů během přípravné fáze a vyššího počtu následných sekvencí.

Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahuje vzorek **LNL\_3**. Zkušební vzorky **SV\_4** při optimální vlhkosti a **PS\_3** dosahují mírně nižších hodnot, ale celkově s rostoucím počtem cyklů křivka modulu pružnosti klesá. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorků **SV\_7** při -2 % od optimální vlhkosti a následně **SV\_2** při in situ vlhkosti. Při zvýšení komorového tlaku a snížení osově napětí docházelo k nárůstu modulu pružnosti a následnému snížení u všech vzorků

kromě vzorku **SV\_7** při -2 % od optimální vlhkosti. U tohoto vzorku byly zlomy ve výsledné křivce minimální a ze začátku zkoušky došlo k poklesu a následnému nárůstu modulu. Výsledné hodnoty modulu pružnosti pro 5 zkoušených vzorků jsou souhrnně uvedeny a znázorněny níže (Tab. 22) (Graf 15). Porovnal jsem průměrné hodnoty resilient modulu a modulu pružnosti (Tab. 23) (Tab. 24). Modul pružnosti odpovídá u zeminy **LNL** resilient modulu. U ostatních zemin je modul pružnosti vyšší než odpovídající resilient modul. U zeminy **PS** je procentuální nárůst oproti hodnotě resilient modulu nejvyšší. Zemina **SV**, která byla jako jediná zkoušená při třech zvolených vlhkostech, dosahuje vyšších hodnot při in situ vlhkosti a optimální vlhkosti než při -2 % od optimální vlhkosti.

Tab. 22 Modul pružnosti během zkoušky pružného chování

Vzorek			LNL_3	SV_2	SV_7	SV_4	PS_3
Místo			Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Vlhkost			wopt-2%	winsitu	wopt-2%	wopt	wopt-2%
Sekvence	Komorový tlak	Maximální deviator napětí	Modul pružnosti				
			$E_r$				
	$\sigma_3$	$\sigma_d^{max}$					
[-]	[kPa]	[kPa]	[MPa]				
0	70,0	200,0	26,159	18,252	29,304	28,123	25,362
1	20,0	20,0	42,501	25,629	23,590	47,936	37,577
2	20,0	35,0	35,612	21,176	25,672	38,044	33,348
3	20,0	50,0	31,167	18,771	25,320	31,918	29,969
4	20,0	70,0	27,162	16,245	23,905	27,668	25,828
5	35,0	35,0	38,530	19,998	24,816	36,457	32,863
6	35,0	50,0	33,710	18,073	24,743	31,140	29,979
7	35,0	70,0	29,373	16,246	23,828	27,846	26,352
8	35,0	90,0	27,861	14,938	23,050	24,966	24,420
9	35,0	120,0	27,432	13,946	22,036	22,974	22,776
10	50,0	50,0	34,466	17,516	23,836	30,040	28,976
11	50,0	70,0	30,840	15,477	23,217	26,811	25,579
12	50,0	90,0	29,322	14,355	22,602	24,390	24,029
13	50,0	120,0	29,005	13,965	21,796	23,046	22,963
14	50,0	160,0	29,711	13,641	21,599	23,049	22,836
15	70,0	70,0	32,644	15,356	22,577	26,836	24,944
16	70,0	90,0	31,124	14,316	22,138	24,333	23,575
17	70,0	120,0	30,713	13,598	21,442	22,826	22,727
18	70,0	160,0	31,602	13,640	21,515	23,090	22,906
19	70,0	200,0	32,831	21,011	22,590	24,202	23,701
<b>Aritmetický průměr</b>			<b>31,588</b>	<b>16,807</b>	<b>23,479</b>	<b>28,285</b>	<b>26,536</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>			3,981	3,242	1,876	6,390	4,225



Graf 15 Modul pružnosti během zkoušky pružného chování

Tab. 23 Průměrné hodnoty modulu pružnosti

Místo	Lysá nad Labem		Sudoměřice-Votice		Praha, Smíchov	
Vlhkost	<b>Modul pružnosti</b>					
	$E_r$					
	[MPa]					
winsitu			SV_2	<b>16,807</b>		
wopt-2%	LNL_3	<b>31,588</b>	SV_7	<b>23,479</b>	PS_3	<b>26,536</b>
wopt			SV_4	<b>28,285</b>		

Tab. 24 Porovnání resiliency modulu a modulu pružnosti

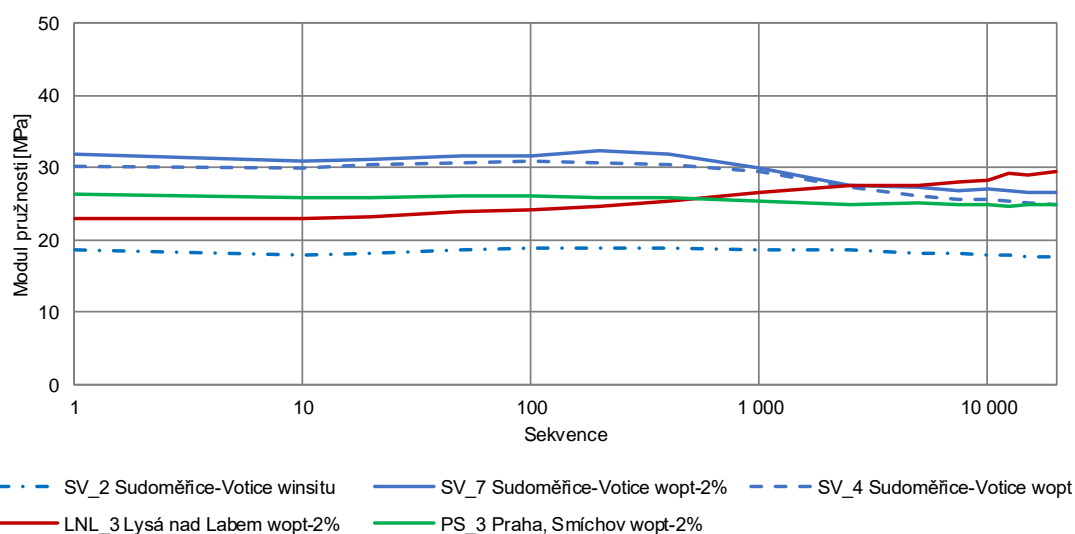
Místo	Lysá nad Labem		Sudoměřice-Votice		Praha, Smíchov	
Vlhkost	<b>Změna hodnoty modulu</b>					
	$(E_r - M_r) / M_r$					
	[%]					
winsitu			SV_2	21,20%		
			SV_1			
wopt-2%	LNL_3	-0,91%	SV_7	13,10%	PS_3	38,01%
	LNL_2		SV_6		PS_2	
wopt			SV_4	23,28%		
			SV_3			

U zkoušky dle ČSN 13286-7 jsem sledoval i rozdílný průběh modulu pružnosti během přípravy vzorku. Během počáteční fáze přípravy 20 000 cyklů dochází k ustálení trvalých deformací a dále pružných deformací, ze kterých vychází výsledný modul pružnosti. Následně jsem sledoval během 19 zatěžovacích sekvencí hodnoty trvalých deformací ustálené. Vyšší počet cyklů před zahájením samotné zkoušky pružného cyklického zatěžování má pozitivní vliv na získaná data. V řadě výzkumů v rešeršní části bylo doporučeno

užití vyššího počtu cyklů ke stabilizaci pružného chování zeminy. Z tabulkových a grafických výstupů lze souhrnně říct, že přibližně po 10 000 cyklech došlo k ustálení hodnoty modulu pružnosti (Tab. 25) (Graf 16).

Tab. 25 Modul pružnosti během zkoušky přípravné fáze

Vzorek			LNL_3	SV_2	SV_7	SV_4	PS_3
Místo			Lysá nad Labem	Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice	Sudoměřice-Votice	Praha, Smíchov
Vlhkost			wopt-2%	winsitu	wopt-2%	wopt	wopt-2%
Cyklus	Komorový tlak	Maximální deviator napětí	Modul pružnosti				
	$\sigma_3$	$\sigma_d^{max}$	$E_r$				
[-]	[kPa]	[kPa]	[MPa]				
1	70,0	200,0	22,791	18,546	31,935	30,167	26,203
10			22,858	17,746	30,775	29,865	25,741
20			23,256	18,099	31,099	30,365	25,799
50			23,766	18,499	31,550	30,675	26,001
100			24,213	18,793	31,710	30,936	26,045
200			24,635	18,930	32,350	30,740	25,783
400			25,393	18,907	31,794	30,279	25,689
1 000			26,482	18,664	29,891	29,317	25,316
2 500			27,597	18,456	27,521	27,252	24,954
5 000			27,478	18,203	27,144	25,947	25,006
7 500			28,084	18,035	26,888	25,609	24,937
10 000			28,289	17,872	26,913	25,538	24,747
12 500			29,107	17,832	26,822	25,219	24,593
15 000			28,935	17,673	26,619	25,071	24,883
20 000			29,500	17,518	26,551	24,867	24,740
<b>Aritmetický průměr</b>			<b>26,159</b>	<b>18,252</b>	<b>29,304</b>	<b>28,123</b>	<b>25,362</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>			2,432	0,468	2,380	2,485	0,552



Graf 16 Modul pružnosti během přípravné fáze

## 6.6. Pevnost v prostém tlaku

V teoretické části byly zmíněny typy triaxiálních zkoušek. Výstupem ze statických zkoušek jsou parametry úhlu vnitřního tření a soudržnosti zemin. Vzorky jsou porušeny při rozdílných hodnotách působícího komorového tlaku a deviátoru napětí. Zkušební postupy u nás vychází z norem ČSN EN 17892-8 a 9. U nasycených plastických jemnozrnných zemin je za neodvodněného stavu a rozdílného působícího komorového tlaku působící deviátor napětí při porušení téměř shodný. Výsledný úhel vnitřního tření je nulový. [16]

Pevnosti v prostém tlaku je možné určit u soudržných zemin nasycených vodou v souladu s ČSN EN 17892-7. Během zkoušky působí na těleso pouze osová síla s konstantním nárůstem deformace. Výsledná pevnost odpovídá napětí při porušení, nebo při poměrném přetvoření 15 %. Jedná se o přibližnou hodnotu obdobně jako u odvozené neodvodněné smykové pevnosti. Vzhledem k tomu, že vodorovné hlavní napětí je nulové, odpovídá neodvodněná smyková pevnost polovině pevnosti v prostém tlaku. Jemnozrnné zeminy mají nízkou propustnost. Nízkou propustností zeminy se zabrání odvodnění vzorku během zkoušky. [13]

Dle AASHTO T 307 může být po pružné zkoušce provedena smyková zkouška s konstantním nárůstem deformace rovným 1,00 %/min. až do porušení nebo 5 % přetvoření. Během smykové zkoušky by měl působit konstantní komorový tlak 27,6, resp. 34,5 kPa. [6]

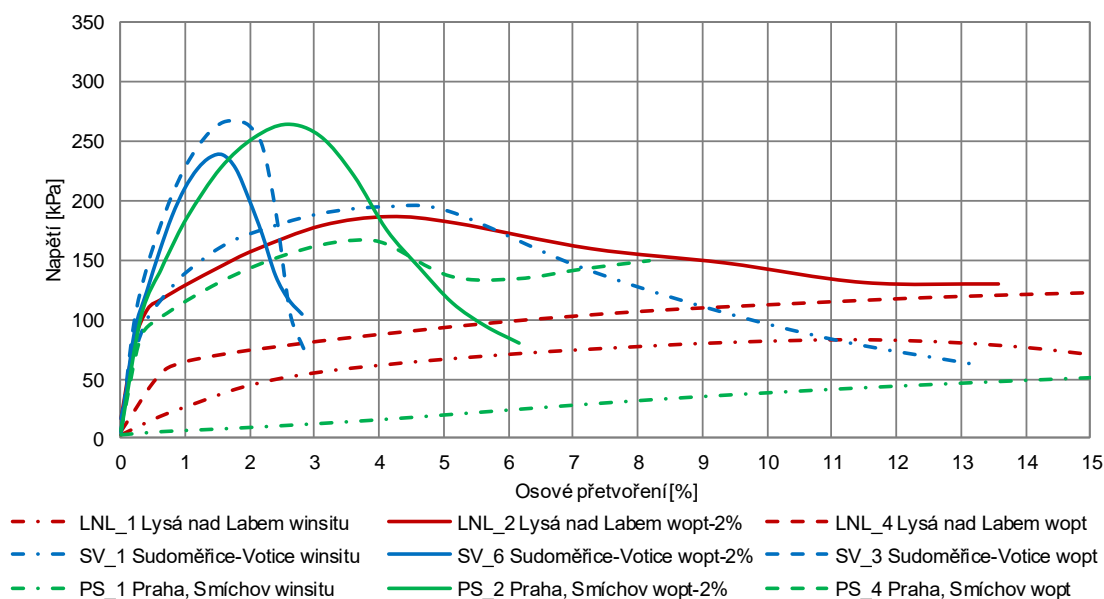
Vzorky jsem po provedených zkouškách resilient modulu a modulu pružnosti podrobil zkoušce pevnosti v prostém tlaku. Tělesa byla zatěžována s konstantním nárůstem deformace rychlostí 1,00 %/min. Posloupnost výsledků zkoušek v závislosti na typu zeminy a vlhkosti odpovídá předcházejícím pružným zkouškám.

U vzorků zeminy **LNL** (Obr. 97) dosahuje nejvyšší pevnosti vzorek **LNL\_2** při -2 % od optimální vlhkosti, následně **LNL\_4** při optimální vlhkosti a nejméně **LNL\_1** při in situ vlhkosti. U zeminy **SV** (Obr. 98) má nejvyšší pevnost vzorek **SV\_3** při optimální vlhkosti, poté **SV\_6** při -2 % od optimální vlhkosti a následně **SV\_1** při in situ vlhkosti. Poslední zkoušená zemina **PS** (Obr. 99) má pořadí stejné jako první zmíněná. Nejvyšší pevnost má vzorek **PS\_2** při -2 % od optimální vlhkosti, poté **PS\_4** při optimální vlhkosti a nejnižší **PS\_1** při in situ vlhkosti. Všeobecně nejvyšších pevnostních charakteristik jsem naměřil u zeminy **SV**, dále u **PS** a nejméně u **LNL**. Ze zatěžovací křivky jsem kromě pevnosti v prostém tlaku, resp. neodvodněné smykové pevnosti určil sečnový modul (Tab. 26). Při dosažení pevnosti jsem u většiny vzorků zkoušku ukončil. Vybrané

nasycené vzorky se projevovaly vysokou plasticitou a bylo nutné se zatěžováním pokračovat až do 15 % osového přetvoření (Graf 17).

Tab. 26 Pevnost v tlaku po zkoušce resilient modulus

Vzorek	Místo	Vlhkost	Pevnost v prostém tlaku	Neodvodněná smyková pevnost	Sečnový modul
			$q_u$	$c_u$	$E_{50}$
			[kPa]	[kPa]	[MPa]
LNL_1	Lysá nad Labem	winsitu	<b>82,794</b>	41,397	2,284
LNL_2	Lysá nad Labem	wopt-2%	<b>185,998</b>	92,999	28,394
LNL_4	Lysá nad Labem	wopt	<b>126,015</b>	63,008	5,885
SV_1	Sudoměřice-Votice	winsitu	<b>195,367</b>	97,683	22,265
SV_6	Sudoměřice-Votice	wopt-2%	<b>237,898</b>	118,949	31,202
SV_3	Sudoměřice-Votice	wopt	<b>267,137</b>	133,568	37,198
PS_1	Praha, Smíchov	winsitu	<b>51,582</b>	25,791	0,399
PS_2	Praha, Smíchov	wopt-2%	<b>263,578</b>	131,789	23,850
PS_4	Praha, Smíchov	wopt	<b>166,941</b>	83,470	25,558

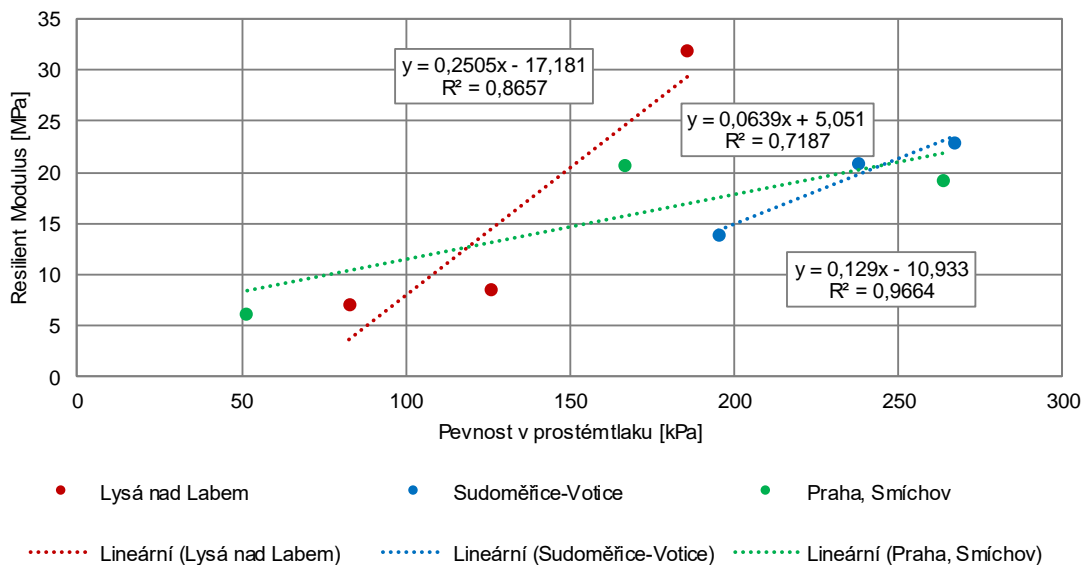


Graf 17 Pevnost v tlaku po zkoušce resilient modulus

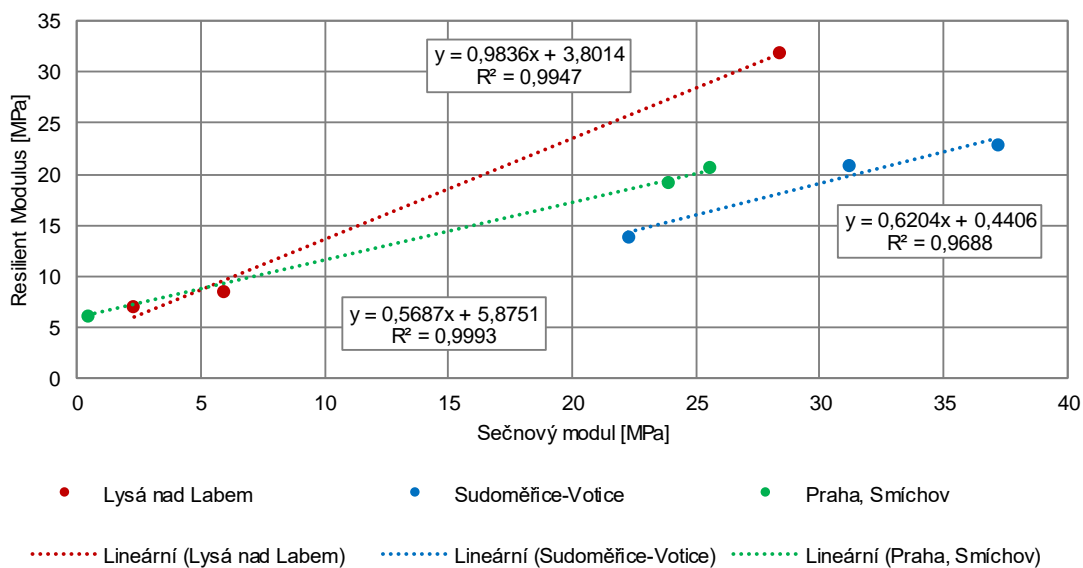
Definice sečnového modulu vychází z citované normy pro konsolidované triaxiální zkoušky a byla zmíněna v teoretické části. Naměřené hodnoty sečnového modulu mají u všech zemin stejnou posloupnost jako u pevnosti v prostém tlaku kromě vzorků **PS\_2** při -2 % od optimální vlhkosti a **PS\_4** při optimální vlhkosti.

Mezi zprůměrovanými deformačními a pevnostními charakteristikami byla u zkušebních vzorků shledána lineární závislost. U zeminy **SV** lze naměřené hodnoty pevnosti v prostém tlaku a průměrného resilient modulu v grafu proložit lineární funkcí (Graf 18). Naopak u jiných zemin jsem obdobný výsledek

v závislosti na pevnosti v prostém tlaku neshledal. U grafu sečného modulu a průměrného resilient modulu lze u všech třech zkoušených zemin proložit body přímkou (Graf 19). Samotné konstanty lineárních funkcí jsou u všech vzorků rozdílné.



Graf 18 Pevnost v tlaku a resilient modulu

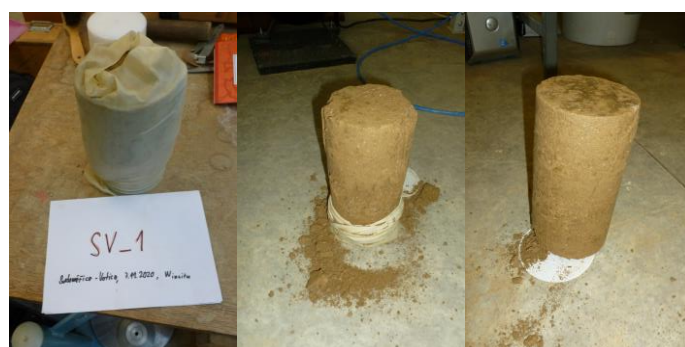


Graf 19 Sečnový modul a resilient modulu





Obr. 97 Porušené vzorky LNL\_1, LNL\_2, LNL\_4



Obr. 98 Porušené vzorky SV\_1, SV\_6, SV\_3



Obr. 99 Porušené vzorky PS\_1, PS\_2, PS\_4

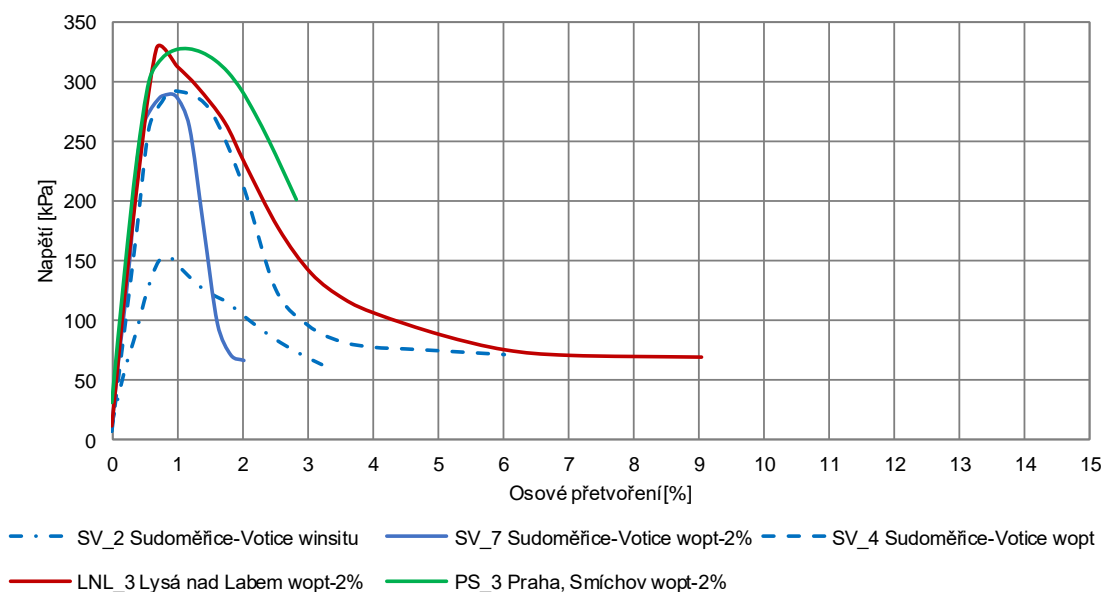
Zeminy, které byly podrobeny zkoušce modulu pružnosti, mají vyšší pevnost než předešlé vzorky (Obr. 100). U zemin došlo k mechanickému zlepšení účinkem přípravné fáze. Během té na těleso působí 20 000 zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 13286-7 na místo 1 000 cyklů dle AASHTO T 307. Vzorky jsou pevnější, avšak křehčí než u předešlé zkoušky. Posloupnost daných pevností u vybraných vzorků je shodná s pevnostmi po zkoušce resilient modulu.

Nejvyšší pevnosti vychází u vzorku **LNL\_3** a **PS\_3** při -2 % od optimální vlhkosti. Třetí zkoušenou zeminu jsem zkoušel při třech vlhkostech a dosahuje nižší pevnosti. Nejvyšších hodnot jsem naměřil u vzorku **SV\_4** při optimální vlhkosti, téměř shodné u **SV\_7** při -2 % od optimální vlhkosti a nejméně u **SV\_2** při in situ vlhkosti. Obdobně jako u předešlých vzorků jsem z průběhu zatěžovací křivky stanovil pevnost v prostém tlaku, neodvodněnou smykovou pevnost a

sečnový modul (Tab. 27). Zkoušené vzorky se porušily při přibližně 1 % osovém přetvoření (Graf 20).

Tab. 27 Pevnost v tlaku po zkoušce modulu pružnosti

Vzorek	Místo	Vlhkost	Pevnost v prostém tlaku	Neodvodněná smyková pevnost	Sečnový modul
			$q_u$	$c_u$	$E_{50}$
			[kPa]	[kPa]	[MPa]
LNL_3	Lysá nad Labem	wopt-2%	<b>327,020</b>	163,510	56,890
SV_2	Sudoměřice-Votice	winsitu	<b>152,445</b>	76,223	24,921
SV_7	Sudoměřice-Votice	wopt-2%	<b>288,448</b>	144,224	56,076
SV_4	Sudoměřice-Votice	wopt	<b>291,846</b>	145,923	46,114
PS_3	Praha, Smíchov	wopt-2%	<b>326,948</b>	163,474	65,856



Graf 20 Pevnost v tlaku po zkoušce modulu pružnosti



Obr. 100 Porušené vzorky LNL\_3, SV\_2, SV\_7, SV\_4, PS\_3

## 7. ZÁVĚR

V triaxiálním přístroji působí na vzorek zeminy komorový tlak a osově napětí. Během smykové zkoušky se při navýšení osového napětí vzorek zeminy poruší. Působením cyklického zatěžování lze vyvodit účinky napjatosti, které působí v pražcovém podloží při průjezdu vlaku. V dynamickém triaxiálním přístroji na těleso působí cyklické osově napětí a konstantní komorový tlak. Z průběhu cyklického zatěžování se stanoví deformační charakteristiky zemin. Principy cyklických triaxiálních zkoušek vychází z běžných zkoušek. Obdobně dynamické a statické zařízení se odlišují zejména v rozdílném způsobu zatěžování.

V rešeršní části jsem se zaměřil na zahraniční vědecké články, které se zabývaly působením cyklického napětí na zemní pláň a konstrukční vrstvy. Deformační charakteristika resilient modulu se stanoví z pružného přetváření zeminy při minimálních deformacích. Resilient modulus je možné odvodit ze znalosti hlavních napětí nebo pevnostních charakteristik zemin. Hodnota je proměnná v závislosti na působícím osovém napětí a komorovém tlaku. Z hlediska typu zeminy a její vlhkosti je modul rozdílný a může docházet k nárůstu trvalých deformací. U znečištěné vrstvy štěrkodrti konstrukční vrstvy bude modul nižší a trvalá deformace vyšší. Naopak u konstrukční vrstvy vyztužené geomřížkou dojde ke snížení trvalé deformace, avšak vyztužený prvek má na pružné přetváření minimální vliv. Při navýšení frekvence zatěžování roste hodnota resilient modulu.

Cílem praktické části bylo měření pružného chování zeminy během cyklického zatěžování. Stanovil jsem resilient modulus v souladu s postupem dle AASHTO T 307 a následně modul pružnosti podle ČSN EN 13286-7. Resilient modulus a modul pružnosti se rovnají podílu cyklického osového napětí a odpovídajícího pružného přetvoření. Vzorek je nejdříve zatěžován během přípravné fáze 1 000 zatěžovacími cykly v případě zkoušky resilient modulu, nebo 20 000 cykly u zkoušky modulu pružnosti. Následuje zkouška pružného přetváření, během které postupně působí rozdílné úrovně napětí. Při zkoušce resilient modulu jsem vzorek zatěžoval 15 úrovněmi napětí a v případě modulu pružnosti 19 úrovněmi napětí. Během jednotlivých úrovní napětí byly vzorky zatíženy 100 cykly.

Pro zkoušky jsem použil tři jemnozrnné zeminy. Před provedením cyklických zkoušek bylo nutné provést zkoušky vlhkosti, prosévání a Proctor Standard. Během zkoušky resilient modulu jsem vzorky jednotlivých zemin zkoušel při rozdílných vlhkostech. Z výsledků cyklických zkoušek lze konstatovat, že na průběh resilient modulu má vliv druh zeminy, její vlhkost a aplikované napětí. Naměřené hodnoty resilient modulu zkoušených jemnozrnných zemin se

pohybují v rozmezí od 5 do 50 MPa. Zeminy jsem zatěžoval úrovněmi napětí pro zemní pláň.

Při zkoušce modulu pružnosti podle ČSN EN 13286-7 jsem zatěžoval vzorky při stanovené vlhkosti. Naměřené hodnoty v rozmezí 15 až 50 MPa odpovídají předešlé zkoušce. Procentuální nárůst vůči hodnotě resilient modulu se pohyboval mezi 0 až 40 %. Hodnoty působících napětí byly v souladu s normou vyšší. Během přípravné fáze byla tělesa zatížena vyšším počtem cyklů. U zkoušených vzorků došlo k ustálení trvalých deformací. Vzorky se během následujících cyklů deformovaly pružně. Všeobecně lze říct, že počty cyklů stanovené v normách mohou být nedostatečné a k dosažení pružného chování je nutný vyšší počet cyklů. Po zkouškách pružného chování jsem vzorky porušil během zkoušky pevnosti v prostém tlaku. Posloupnost naměřených napětí při porušení odpovídá pružným zkouškám. Vzorky po zkoušce modulu pružnosti vykazovaly vyšší pevnosti.

Použité zkušební normy jsou určeny pro výstavbu pozemních komunikací. Na železniční těleso působí větší zatížení než na konstrukci vozovky. Druhá citovaná norma obsahuje i vyšší úrovně napětí, avšak celkově se nejedná o napětí vyvozené kolejovou dopravou. Pro laboratorní zkoušky chybí norma, která by stanovovala úrovně napětí pro vrstvy pražcového podloží. V poslední době jsou hojně diskutovaným tématem vysokorychlostní tratě. V závislosti na rychlosti vlaku roste zatěžovací frekvence, kterou by bylo vhodné při cyklických zkouškách uvážit. Zároveň by bylo potřeba stanovit požadované hodnoty, které lze uvažovat do konstrukčních vrstev a na zemní pláni železničního tělesa.

Závěrem bych konstatoval, že zkoušky resilient modulu a modulu pružnosti jsou odlišné v úrovních napětí a celkovém počtu cyklů, ale v celkovém principu a výsledných hodnotách se shodují. Zkoušky pružného přetváření zeminy jsou vhodné pro analýzu vrstev pražcového podloží.

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Pražcové podloží typu 2.1 [15].....	8
Obr. 2 Zemní těleso v náspu [15].....	8
Obr. 3 Elipsa napětí .....	9
Obr. 4 Elipsa cyklického napětí .....	9
Obr. 5 Bod a dráha napětí.....	10
Obr. 6 Dráha napětí .....	11
Obr. 7 Napětí během cyklické zkoušky .....	11
Obr. 8 Dráha napětí během cyklické zkoušky .....	12
Obr. 9 Mohrovy kružnice při porušení [12] .....	13
Obr. 10 Vrcholová a reziduální smyková pevnost .....	13
Obr. 11 Hysterezní křivka.....	15
Obr. 12 Klasifikační diagram zemin [14].....	17
Obr. 13 Izotropní a anizotropní zatížení .....	18
Obr. 14 Primární konsolidace [2].....	22
Obr. 15 Amplitudy zatížení a deformace [5] .....	24
Obr. 16 Hysterezní křivka [3].....	25
Obr. 17 Triaxiální přístroj a komora.....	27
Obr. 18 Schéma triaxiálního přístroje [12].....	27
Obr. 19 Zkušební vzorek [4].....	28
Obr. 20 Filtrační papíry .....	28
Obr. 21 Vrtaná sonda [1].....	29
Obr. 22 Vzorek po zhutnění a uzavření membránou .....	29
Obr. 23 Formy průměru 100 mm.....	30
Obr. 24 Vzorek v triaxiální komoře [3] .....	30
Obr. 25 Schéma triaxiálního přístroje [4].....	32
Obr. 26 Schéma dynamického triaxiálního přístroje [3].....	32
Obr. 27 Dynamický triaxiální přístroj .....	33
Obr. 28 Wykeham Farrance DYNATRIAX EmS [20].....	33

Obr. 29 Kompaktní dynamický kontrolér a zdroj .....	34
Obr. 30 Působící hlavní napětí během mezifáze .....	35
Obr. 31 Působící osová síla během cyklické fáze .....	36
Obr. 32 Působící osově napětí během cyklické sekvence .....	36
Obr. 33 Zatěžovací píst a triaxiální komora.....	38
Obr. 34 Schéma dynamického triaxiálního přístroje.....	38
Obr. 35 Objemové měřící zařízení .....	39
Obr. 36 Vzduchová nádrž .....	39
Obr. 37 Odvzdušňovací nádrž .....	40
Obr. 38 Panel s ventily .....	40
Obr. 39 Vzduchové/vodní válce .....	41
Obr. 40 Distribuční panel vody.....	41
Obr. 41 Triaxiální komora.....	42
Obr. 42 Ventily na spodní podstavě .....	42
Obr. 43 Průběh osového napětí v závislosti na deformaci [31] .....	43
Obr. 44 Průběh deformace v závislosti na počtu cyklů [31].....	44
Obr. 45 Železniční těleso [14] .....	44
Obr. 46 Zemní plán v ŽST Beroun .....	45
Obr. 47 Vodní režim zemní pláně [14].....	46
Obr. 48 Oktaedrická napětí [19] .....	47
Obr. 49 Veličiny zkoušky pevnosti v prostém tlaku [29] .....	49
Obr. 50 Korelace mezi resilient modulem a pevností v prostém tlaku [29].	49
Obr. 51 Změřený resilient modulus a CBR [28].....	50
Obr. 52 Korelace mezi resilient modulus a CBR [28].....	50
Obr. 53 Změřený resilient modulus a pevnost v tlaku [31] .....	51
Obr. 54 Resilient modulus v závislosti na osovém napětí [32] .....	51
Obr. 55 Resilient modulus v závislosti na působícím napětí [32] .....	53
Obr. 56 Stabilizace Resilient modulu [32] .....	53
Obr. 57 Pražcové podloží typu 2.1 a 2.2 [15] .....	54
Obr. 58 Rozprostřená podkladní vrstva v zast. Praha-Eden .....	55

Obr. 59 Pražcové podloží typu 3.2 a 3.6 [15] .....	56
Obr. 60 Integranulární napětí v závislosti na pórovitosti [24].....	57
Obr. 61 Nový a degradovaný štěrk [23].....	57
Obr. 62 Vliv rozdílné vlhkosti znečištění na statické zatěžování [23] .....	57
Obr. 63 Nový a recyklovaný štěrk, znečištění jílovitou zeminou [24].....	58
Obr. 64 Znečištění drceným štěrkem za rozdílných vlhkostí [24] .....	58
Obr. 65 Postupná stabilizace hodnoty resilient modulu [27].....	59
Obr. 66 Vliv znečištění na resilient modul [27] .....	60
Obr. 67 Zkušební vzorek štěrku [22] .....	61
Obr. 68 Závislost poměrného přetvoření a napětí v čase [22].....	61
Obr. 69 Tvary geomřížek a umístění ve zkušebním vzorku [26] .....	62
Obr. 70 Umístění sestav vysílače a přijímače [25].....	63
Obr. 71 Příčná S-vlna (shared wave) [17].....	63
Obr. 72 Vliv vyztužení na trvalé deformaci a smykovém modulu [25] .....	63
Obr. 73 Resilient modulus nevyztuženého a vyztužených vzorků [26].....	64
Obr. 74 Cyklická triaxiální a smyková zkouška [26] .....	64
Obr. 75 Vliv vyztužení na smykovém povrchovém resilient modulu [26]....	65
Obr. 76 Zkušební vzorek kolejového lože a podkladní vrstvy [30] .....	66
Obr. 77 Průběh vodorovné deformace po výšce vzorku [30] .....	66
Obr. 78 Resilient modulus při frekvencích 10, 20, 30, 40 Hz [30] .....	67
Obr. 79 Průběh svislého napětí po výšce vzorku [30] .....	67
Obr. 80 Místa odběru zkoušených zemin [42].....	68
Obr. 81 Odběr zeminy PS .....	70
Obr. 82 Proseté zeminy SV a PS .....	71
Obr. 83 Promývací a prosévací zařízení .....	72
Obr. 84 Proctor Standard zeminy SV .....	73
Obr. 85 Proctor Standard zeminy PS .....	73
Obr. 86 Hutní formy a pěch.....	74
Obr. 87 Hutní formy [8].....	75
Obr. 88 Hutnění postupným stlačováním [6] .....	76

Obr. 89 Triaxiální komora dle AASHTO T 307 [6].....	77
Obr. 90 Postup vložení vzorku do triaxiální komory .....	81
Obr. 91 Vzorky LNL_1, LNL_2, LNL_4.....	82
Obr. 92 Vzorky SV_1, SV_6, SV_3.....	83
Obr. 93 Vzorky PS_1, PS_2, PS_4.....	83
Obr. 94 Triaxiální komora dle ČSN 13 286-7 [9] .....	89
Obr. 95 Průběh plastické deformace [9].....	94
Obr. 96 Vzorky LNL_3, SV_2, SV_7, SV_4, PS_3.....	95
Obr. 97 Porušené vzorky LNL_1, LNL_2, LNL_4.....	102
Obr. 98 Porušené vzorky SV_1, SV_6, SV_3 .....	102
Obr. 99 Porušené vzorky PS_1, PS_2, PS_4 .....	102
Obr. 100 Porušené vzorky LNL_3, SV_2, SV_7, SV_4, PS_3.....	103



## 9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Orientační hodnoty Poissonova čísla [7] .....	15
Tab. 2 Orientační hodnoty modulu přetvárnosti [16] .....	15
Tab. 3 Poměry mezi fázemi zeminy [16] .....	16
Tab. 4 Skupiny zemin [14].....	17
Tab. 5 Triaxiální zkoušky [11] [12] [16].....	19
Tab. 6 Parametry cyklických zkoušek [3] [5] [6] [9] .....	26
Tab. 7 Parametry dynamického triaxiálu [20] .....	33
Tab. 8 Přílohy teoretické části.....	37
Tab. 9 Zkušební zeminy [41].....	68
Tab. 10 Zkušební vzorky.....	69
Tab. 11 Přílohy praktické části .....	69
Tab. 12 Přirozené vlhkosti zemin [41] .....	70
Tab. 13 Zrnitostní skladba zkušebních vzorků [41] .....	72
Tab. 14 Maximální objemová hmotnost a optimální vlhkost [41].....	74
Tab. 15 Cyklická zkouška resilient modulus [6].....	79
Tab. 16 Resilient modulus LNL_1, LNL_2, LNL_4 .....	84
Tab. 17 Resilient modulus SV_1, SV_6, SV_3 .....	85
Tab. 18 Resilient modulus PS_1, PS_2, PS_4 .....	86
Tab. 19 Průměrné hodnoty resilient modulu .....	88
Tab. 20 Zkouška pružného chování dle metody B [9] .....	91
Tab. 21 Klasifikace dle pružné zkoušky [9] .....	94
Tab. 22 Modul pružnosti během zkoušky pružného chování .....	96
Tab. 23 Průměrné hodnoty modulu pružnosti .....	97
Tab. 24 Porovnání resilient modulu a modulu pružnosti .....	97
Tab. 25 Modul pružnosti během zkoušky přípravné fáze .....	98
Tab. 26 Pevnost v tlaku po zkoušce resilient modulus.....	100
Tab. 27 Pevnost v tlaku po zkoušce modulu pružnosti .....	103

## 10. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Křivka zrnitosti zkušebních vzorků [41] .....	72
Graf 2 Hutnící křivky zkušebních vzorků [41] .....	75
Graf 3 Cyklická zkouška resilient modulus [6].....	80
Graf 4 Zatěžovací křivka haversinus .....	80
Graf 5 Resilient modulus LNL_1, LNL_2, LNL_4 .....	84
Graf 6 Resilient modulus SV_1, SV_6, SV_3.....	85
Graf 7 Resilient modulus PS_1, PS_2, PS_4.....	86
Graf 8 Resilient modulus in situ vlhkost .....	87
Graf 9 Resilient modulus -2 % od optimální vlhkosti .....	87
Graf 10 Resilient modulus optimální vlhkost .....	88
Graf 11 Zkouška pružného chování dle metody A [9] .....	91
Graf 12 Zkouška pružného chování dle metody B [9] .....	92
Graf 13 Hodnoty p a q dle AASHTO T 307 .....	93
Graf 14 Hodnoty p a q dle ČSN EN 13 286-7 .....	93
Graf 15 Modul pružnosti během zkoušky pružného chování.....	97
Graf 16 Modul pružnosti během přípravné fáze .....	98
Graf 17 Pevnost v tlaku po zkoušce resilient modulus .....	100
Graf 18 Pevnost v tlaku a resilient modulus .....	101
Graf 19 Sečnový modul a resilient modulus.....	101
Graf 20 Pevnost v tlaku po zkoušce modulu pružnosti .....	103

## 11. LITERATURA

- [1] ASTM D1587 Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes. 2015.
- [2] ASTM D2435 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. 2020.
- [3] ASTM D3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus. 2012.
- [4] ASTM D4767 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. 2011.
- [5] ASTM D5311 Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. 2013.
- [6] AASHTO T 307 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. 2000.
- [7] ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin. 2015.
- [8] ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška. 2011.
- [9] ČSN EN 13286-7 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji. 2005.
- [10] ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. 2012.
- [11] ČSN EN ISO 17892-8 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 8: Nekonsolidovaná neodvodněná triaxiální zkouška. 2018.
- [12] ČSN EN ISO 17892-9 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška v tlaku vodou nasycených zemin. 2018.
- [13] ČSN CEN ISO/TS 17892-7 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 7: Zkouška pevnosti v prostém tlaku u jemnozrnných zemin. 2018.
- [14] SŽDC S4 Železniční spodek. 2008.
- [15] SŽDC Vzorové listy Železniční spodek. 2008.
- [16] VANÍČEK, Ivan. Geomechanika 10: Mechanika zemin. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01437-1.

- [17] PRUŠKA, Jan. Dynamika geotechnických konstrukcí [přednášky]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2019
- [18] SALÁK, Jan. Mechanika zemin [přednášky]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2007.
- [19] kolektiv. Pružnost a pevnost [interaktivní učební text]. Brno: VUT, 2002 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://beta.fme.vutbr.cz/cpp/texty/>
- [20] CONTROL GROUP. Dynamic electromechanical triaxial systems DYNATRIAX EmS [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.controls-group.com/eng/soil-mechanics-testing-equipment/dynamic-electromechanical-triaxial-systems-dynatriax-ems.php>
- [21] MOHAJERANI, Abbas a Mehmet Ridvan OZEL. Resilient modulus of a stabilised fine-grained subgrade soil. ResearchGate [online]. 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/287596825>
- [22] LOUIS GE. A Large-Scale Triaxial Apparatus for Prototype Railroad Ballast Testing. ResearchGate [online]. 2009 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228408364>
- [23] QIAN, Yu, Erol TUTUMLUER, Debakanta MISHRA a Youssef M. A. HASHASH. Moisture Effects on Degraded Ballast Shear Strength Behavior. ResearchGate [online]. 2016 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/303901600>
- [24] EBRAHIMI, Ali, Tuncer B. EDIL a James M. TINJUM. Deformational behavior of fouled railway ballast. ResearchGate [online]. 2014 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/271715164>
- [25] BYUN, Yong-Hoon a Erol TUTUMLUER. Local stiffness characteristic of geogrid-stabilized aggregate in relation to accumulated permanent deformation behavior. ScienceDirect [online]. 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.005>
- [26] HAN, Bingye, Jianming LING, Xiang SHU, Weimin SONG, Richard L. BOUDREAU, Wei HU a Baoshan HUANG. Quantifying the effects of geogrid reinforcement in unbound granular base. ScienceDirect [online]. 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.009>
- [27] Anh-Minh Tang, Jean Canou, Jean-Claude Dupla a Nicolas Calon. Effects of water and fines contents on the resilient modulus of the interlayer soil of railway substructure. ResearchGate [online]. 2015

- [cit. 2020-10-17]. Dostupné z:  
<https://www.researchgate.net/publication/273306712>
- [28] S. Muthu Lakshmi a Pavithra Sm. Establishment of Correlation between CBR and Resilient Modulus of Subgrade. ResearchGate [online]. 2019 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z:  
<https://www.researchgate.net/publication/333679558>
- [29] Md Mostaqur Rahman, Kazi Moinul Islam a Sarah Gassman. Estimation of Resilient Modulus for Coarse-Grained Subgrade Soils from Quick Shear Tests for Mechanistic-Empirical Pavement Designs. MDPI [online]. 2019 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z:  
<https://www.mdpi.com/2411-9660/3/4/48>
- [30] Kumari Sweta, Syed Khaja a Karimullah Hussaini. Effect of geogrid on deformation response and resilient modulus of railroad ballast under cyclic loading. ScienceDirect [online]. 2020 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120690>
- [31] Dian Hastari Agustina a Adnan Zainorabidin. Evaluation of resilient modulus and unconfined compressive strength of subgrade. EDP Sciences [online]. 2020 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z:  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015601009>
- [32] Wen-Bo Chen, Wei-Qiang Feng a Jian-Hua Yin. Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content. ScienceDirect [online]. 2019 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117542>
- [33] DYNATRIAX EmS Instruction Manual: 31-WF70E06. Wykeham Farrance, 2018.
- [34] Banded triaxial cells Instruction Manual: 28-WF4050-WF4070-WF4100-WF4150. Wykeham Farrance, 2007.
- [35] Pneumatic system for constant pressure applications Instruction Manual: 28-WF4320. Wykeham Farrance, 2007.
- [36] Soil mechanics testing equipment. Controls [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.controls-group.com/eng/soil-mechanics-testing-equipment/>
- [37] KREJČÍŘÍKOVÁ, Hana. Železniční stavby 1. Praha: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-01-06157-2.
- [38] ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti. 2015.
- [39] ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti. 2017.
- [40] ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. 2010.

- [41] LUDVÍK, Jan. Zlepšené a stabilizované zeminy v pražcovém podloží. Praha, 2019. Bakalářská práce. Fakulta stavební ČVUT.
- [42] Mapy.cz [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z:  
<https://mapy.cz/turisticka?x=14.6468248&y=49.8291345&z=10>

## 12. SEZNAM PŘÍLOH

- A Odebrané zeminy
  - A.1 Vlhkost
  - A.2 Prosévací zkouška
  - A.3 Proctor Standard
- B Resilient Modulus
  - B.1 Triaxiální zkouška
  - B.2 Pevnost v prostém tlaku
  - B.3 Vlhkost
- C Modul pružnosti
  - C.1 Triaxiální zkouška
  - C.2 Pevnost v prostém tlaku
  - C.3 Vlhkost
- D Dynamický triaxiální přístroj
  - D.1 Software Resilient Modulus
  - D.2 Výstupní hodnoty