VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

MODIFIKACE CYKLICKÉ TRIAXIÁLNÍ ZKOUŠKY

THE MODIFICATION OF THE CYCLIC TRIAXIAL TEST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Alice Nevrlá

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Alice Nevrlá
Název	Modifikace cyklické triaxiální zkoušky
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

.....

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením modulu pružnosti nestmelených materiálů pro podkladní vrstvy vozovek různými zkušebními postupy při zkoušení v cyklickém triaxiálním přístroji u nás a v zahraničí a jejich srovnáním. Praktická část pak řeší porovnání metod uvedených v normě ČSN EN 13286-7 při stanovování modulu pružnosti recyklátu směsného, jemnozrnné zeminy a elektrárenského popílku.

ABSTRACT:

This bachelor's thesis focuses on determining resilient modulus of unbound granular material for subbase and subgrade pavement construction using different types of cyclic load triaxial testing procedures in Czech Republic and abroad and compares them. The practical part then deals with comparison of methods presented in Czech Standard ČSN EN 13286-7 used for resilient modulus determination of mixed recycled material, fine-grained soil and fly ash.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Cyklická triaxiální zkouška, modul pružnosti, nestmelené směsi, recyklát směsný, jemnozrnná zemina, elektrárenský popílek.

KEYWORDS:

Repeated/cyclic triaxial test, resilient/elastic modulus, unbound granular material, mixed recycled material, fine-grained soil, fly ash.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

NEVRLÁ, Alice. *Modifikace cyklické triaxiální zkoušky*. Brno, 2012. 45 s., 36 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Alice Nevrlá
VUT v Brně, FAST

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2012

Alice Nevrlá

……

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji panu Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, Ing. Karlu Pechovi za program pro zpracování výsledků a dále Ing. Petru Páchovi a Pavlu Strakovi za pomoc a konstruktivní nápady v laboratoři. Děkuji taky Martinovi Pěknicovi za jazykovou korekci.

V Brně dne 25. 5. 2012

Alice Nevrlá

.....

OBSAH:

1. Úvod 10
2. Cíl práce 11
3. Teoretická část 12
3.1 Cyklická triaxiální zkouška 12
3.2 Napětí a deformace 12
3.3 Metody a postupy dle ČSN EN 13286-7 15
3.4 Modul pružnosti 17
3.5 Triaxiální přístroj a jeho modifikace 19
3.6 Variabilita při zkoušení v cyklickém triaxiálním přístroji 24
3.7 Různé postupy při přípravě zkušebních těles 26
3.8 Charakteristiky použitých materiálů 27
3.8.1 Recyklát směsný 27
3.8.2 Jemnozrnná zemina 27
3.8.3 Popílky 28
4. Praktická část 29
4.1 Materiál pro zkoušení 29
4.2 Příprava vzorků 30
4.3 Zkoušení 33
5. Zhodnocení práce 39
6. Závěr 41
7. Seznam použité literatury 43
Příloha - výsledky a grafy 45

Seznam obrázků:

Obrázek 1:	Normálová a tečná napětí působící na stěny elementárního šestistěnu	12
Obrázek 2:	Složky napětí působícího na vozovku	13
Obrázek 3:	Napětí aplikované na vzorek v cyklickém triaxiálním přístroji [3]	14
Obrázek 4:	Závislost napětí a deformace na počtu zatěžovacích cyklů [3]	15
Obrázek 5:	Volba úrovně napětí dle umístění ve vozovce [3]	16
Obrázek 6:	Hlavní části triaxiálního přístroje	19
Obrázek 7:	Triaxiální přístroj - přiblížení	19
Obrázek 8:	Schéma triaxiální komory a systémů pro měření osové a radiální deformace s použitím lineárních snímačů deformace [1]	22
Obrázek 9:	Schéma triaxiální komory a systémů pro měření osového přetvoření použitím lineárních snímačů deformace a radiálního přetvořeni použitím pružných kroužků [1]	22
Obrázek 10:	Upínaní vzorku do přístroje - vzorek s porézními destičkami (vlevo) a vzorek s membránou a O kroužky (vpravo)	24
Obrázek 11:	Směsný recyklát 0/4	29
Obrázek 12:	Jemnozrnná zemina	30
Obrázek 13:	Elektrárenský popílek	30
Obrázek 14:	Hydraulický lis s formou	31
Obrázek 15:	Vzorek recyklátu směsného zarovnaný samonivelační stěrkou	32
Obrázek 16:	Vytlačování vzorku z formy pomocí otočeného lisu a vzorek elektrárenského popílku zadělaný samonivelační stěrkou	32
Obrázek 17:	Kompletní sada vzorků	33

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Kondiciování - metoda A 35
Tabulka 2: Kondiciování - metoda B 35
Tabulka 3: Úrovně napětí pro pružné chování - metoda A 36
Tabulka 4: Úrovně napětí pro pružné chování - metoda B 37
Tabulka 5: Úrovně napětí pro pružné chování - vlastní nastavení 1 38
Tabulka 6: Úrovně napětí pro pružné chování - vlastní nastavení 2 39
Tabulka 7: Výsledné rozmezí modulu pružnosti recyklátu směsného 40
Tabulka 8: Výsledné rozmezí modulu pružnosti zeminy F6CI 40
Tabulka 9: Výsledné rozmezí modulu pružnosti elektrárenského popílku 41

Seznam rovnic a vztahů:

(1) Rovnosti tečných napětí 12
(2) Tenzor napětí 12
(3) Porovnání normálových napětí 13
(4) Zjednodušení bočních normálových napětí 14
(5) Hookův zákon 17
(6) Výpočet modulu pružnosti pro metodu A (z normy) 17
(7) Pružné osové napětí 17
(8) Pružné radiální napětí 17
(9) Výpočet modulu pružnosti pro metodu B (z normy) 18
(10) „Resilient Modulus“ pro cyklování s proměnlivým komorovým tlakem 18
(11) „Resilient Modulus“ pro cyklování s konstantním komorovým tlakem 18

1. Úvod

Vozovka je během své životnosti opakovaně zatěžována dopravou a kumulace těžkých vozidel společně s vlivem klimatických podmínek způsobují její porušení. Vyjíždění kolejí a vznik trhlin v podélném i příčném směru reprezentují typické deformace, jejichž výsledkem je snížení životnosti, zvýšení nákladů na údržbu i nákladů uživatelů.

V dnešní ekonomické situaci hrají finance zásadní roli v navrhování vozovek. Z tohoto důvodu je velmi důležité zvážit použití druhotných materiálů v konstrukcích vozovek. Pro jeho bezpečné použití je však nutné pro tento materiál přesně specifikovat jeho vlastnosti a určit předpokládané chování při použití v konstrukčních vrstvách vozovky. Proto je kladen velký důraz na použití funkčních zkoušek, které lépe než empirické zkoušky simulují chování zhutněných směsí v konstrukci vozovky.

Cyklická triaxiální zkouška nejlépe ze současných zkušebních metod vystihuje zatížení vozovky silničním provozem v laboratorních podmínkách. Výsledkem cyklického triaxiálního zkoušení je stanovení návrhového modulu pružnosti zkoušeného materiálu a trvalé deformace při velkém počtu impulzního zatížení. Právě návrhový modul pružnosti je velmi důležitý při srovnávání pevnostních charakteristik. [9]

Modul pružnosti materiálu je závislý na mnoha faktorech: testovací metodě, vlhkosti, hustotě, velikosti zkušebního tělesa, zatěžovacímu tlaku, deviátoru napětí, historii zatěžování a dalších. Pro jeden vzorek určitého materiálu může vyjít mnoho různých hodnot modulu pružnosti v závislosti na napjatosti. Proto je také určení způsobu provádění zkoušky a výběr vhodných výsledných hodnot modulu pružnosti pro navržení vrstev vozovky velmi komplexní proces.

V minulosti byly snahy korelovat vztah mezi cyklickou zkouškou a statickým zatěžováním, ale odpověď na tento problém není jednotná vzhledem ke komplexnímu chování zrnitých materiálů. Přesto se ale díky lepší dostupnosti přístroje často k určení modulu pružnosti používá zkouška CBR (California Bearing Ratio - Kalifornský poměr únosnosti). Tato zkouška srovnává pevnost zkoušené zeminy s pevností vztažného drceného materiálu a vyjadřuje se v %.

V literatuře (zejména americké) lze najít převodní vztah k modulu pružnosti podloží $E \approx 10 \times CBR$ nebo $E = 17{,}6 \times CBR^{0{,}64}$. Je třeba si však uvědomit, že se jedná o vztahy obecné, které se nehodí pro každý zhutněný materiál v podloží vozovky, a proto se v nových EN objevila zkouška stanovení modulu pružnosti v cyklickém zatěžovacím přístroji. [3]

2. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vyhledání a srovnání různých zkušebních postupů cyklické triaxiální zkoušky v zahraničí a u nás. Ve světě, především v USA, ale i v Austrálii, je běžnou funkční zkouškou simulující dopravní zatížení v podkladních vrstvách vozovky, určenou pro stanovení modulu pružnosti a trvalých deformací. V České republice se zatím použití této zkoušky připravuje v silničních laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně.

Praktická část této bakalářské práce se věnuje cyklickému triaxiálnímu zkoušení na sadách vzorků ze směsného recyklátu, zeminy a elektrárenského popílku, zjištění jejich modulů pružnosti, jejich porovnání a porovnání metod, uvedených v normě ČSN EN 13286-7: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy, Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.

3. Teoretická část

3.1 Cyklická triaxiální zkouška

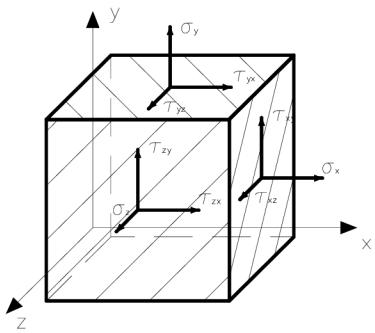
Cyklická triaxiální zkouška (Repeated/Cyclic Load Triaxial) nám umožňuje zkoumat pružné a plastické chování nestmelených směsí v podkladních vrstvách vozovky. Tato laboratorní zkouška patří mezi funkční zkoušky, což znamená, že se snaží simulovat namáhání od dopravního zatížení v reálné vozovce. Tímto jsme schopni určit mechanické vlastnosti materiálů, důležité pro výpočet konstrukčních vrstev vozovky. Jde nám především o zjištění návrhového modulu pružnosti a trvalých deformací.

Zkouška je založena na principu zatěžování válcových vzorků cyklickým napětím známé hodnoty, přičemž se měří osové a radiální deformace způsobené tímto zatěžováním [1]. Zkouška takto modeluje stav napjatosti, který odpovídá reakci na pojezd jednotlivého kola těžkého nákladního vozidla v místě přímo pod kolem. Zatížení je většinou prováděno sinusoidálními svislými pulsy s krátkými klidovými periodami.

3.2 Napětí a deformace

Vozovka je vystavena napětím složeným ze 3 složek: horizontálním, vertikálním a smykovým, vznikajících při pojezdu vozidel.

Tato napětí můžeme znázornit na elementárním šestistěnu (jednotková krychle, obrázek 1), na který působí normálová napětí $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ a tečná napětí $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$.



Obrázek 1: Normálová a tečná napětí působící na stěny elementárního šestistěnu

Přičemž platí, že:

$$\tau_{yx} = -\tau_{xy}, \qquad \tau_{yx} = -\tau_{xy}, \qquad \tau_{yx} = -\tau_{xy}. \tag{1}$$

Matice

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{2}$$

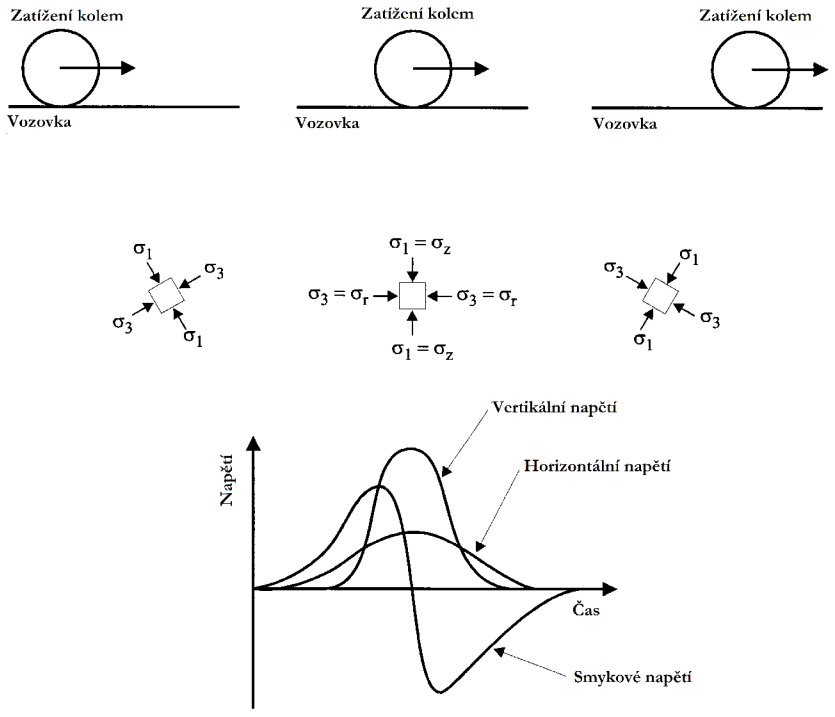
je v teorii pružnosti nazývána tenzorem napětí a je diagonálně symetrická.

Existují takové 3 plochy dA vzájemně mezi sebou kolmé, pro které dosahují normálová napětí v libovolném bodě hodnot:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 \geq \sigma_{stř} = \sigma_2 \geq \sigma_{min} = \sigma_3 \qquad (3)$$

Směry normál na těchto třech plochách definují hlavní osy napětí v daném bodě. V hlavních osách jsou tečná napětí rovna nule. [4]

Obrázek 2 znázorňuje průběh napětí při pojezdu kola. V závislosti na čase se při pojezdu kola mění vertikální, horizontální a smyková napětí v podkladních vrstvách vozovky a vše je navíc doprovázeno otáčením směrů hlavních napětí. Tento způsob zatížení nelze v laboratořích ideálně simulovat konstantním komorovým tlakem. Konstantní komorový tlak simuluje napětí, které je přímo pod kolem, ale může se přibližovat i stavům napětí ve spodních podkladních vrstvách, kde při velké radiální vzdálenosti od zatížení kolem není vzhledem k roznosu zatížení tolik výrazný vliv vertikální složky napětí. [14]



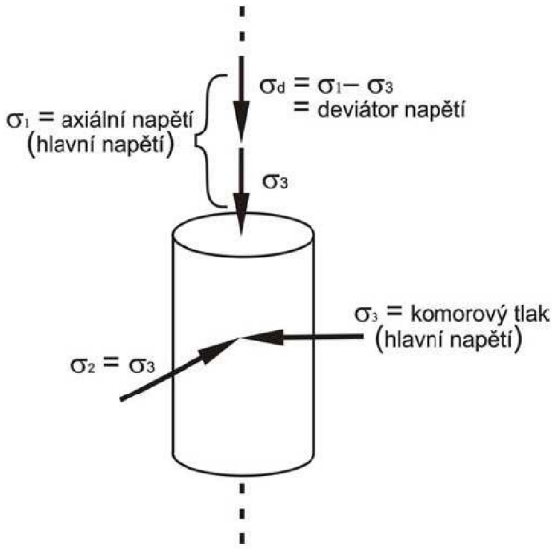
Obrázek 2: Složky napětí působícího na vozovku

V komoře triaxiálního přístroje pak představuje svislé napětí σ_1 reakci na svislé zatížení od dopravy, které způsobuje stlačování vozovky pod kolem vozidla. Boční napětí, tzv. komorový tlak, σ_2 a σ_3 vyjadřuje odpor okolního materiálu vůči svislému dopravnímu zatížení [3]. Při zkoušení v triaxiálním přístroji však pro jednoduchou realizaci se uvažuje

zjednodušení vztahu (3) na:

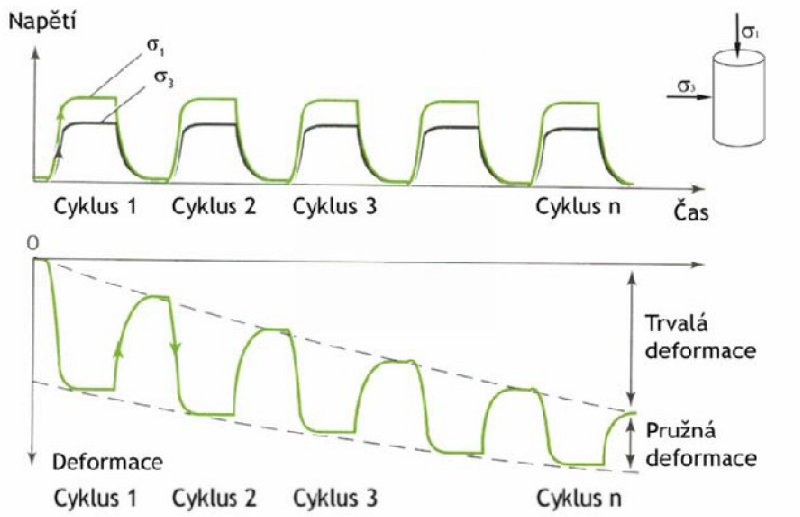
$$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3 \quad (4)$$

Rozdíl $\sigma_1 - \sigma_3$ se značí σ_d a nazývá se deviátor napětí.



Obrázek 3: Napětí aplikované na vzorek v cyklickém triaxiálním přístroji [3]

Jednotlivý pojezd kola způsobuje jeden puls napětí na elementárním šestistěnu. Během životnosti vozovky dochází při pojezdech aut k velmi vysokému množství těchto pulsů a dochází k pružným a trvalým deformacím vozovky. Pružné deformace po každém cyklu vymizí. Avšak po každém cyklu vždy přibude malé množství trvalé deformace, závislé na vlastnostech materiálu, velikosti napětí a také na historii zatěžování. Z obrázku 4 je patrné, že velikost trvalé deformace vznikající při jednom cyklu klesá se zvyšujícím se počtem cyklů. Pružné deformace jsou způsobené především deformacemi jednotlivých zrn, zatímco trvalé deformace jsou způsobené především drcením, abrazí povrchu částic a prokluzem zrn, čímž dochází ke zhutňování materiálu pod zatížením. [13]



Obrázek 4: Závislost napětí a deformace na počtu zatěžovacích cyklů [3]

3.3 Metody a postupy dle ČSN EN 13286-7

Evropská norma ČSN EN 13286-7 definuje dvě metody závisející na tlaku komory triaxiálního přístroje.

- **Metoda A:** Metoda proměnlivého komorového tlaku (VCP), kdy je komorový tlak cyklován ve stejné fázi jako osové zatížení. Její nutností je použití triaxiální tlakové komory. Tato metoda lépe vystihuje skutečný pojezd vozidla.
- **Metoda B:** Metoda stálého komorového tlaku (CCP), kde je pouze cyklické osové zatížení a komorový tlak je konstantní. Lze ji použít u spodních vrstev vozovky, kde výkyvy bočního napětí nejsou tolik výrazné, jelikož s rostoucí hloubkou se zvětšuje roznášecí plocha zatížení.

Pro obě tyto metody lze zvolit 2 úrovně maximálního napětí pokrývající rozsah napětí, kterému je materiál vystaven v terénu.

- **úroveň vysokého napětí** s maximálním deviátorem napětí**:**

  σ_d = 600kPa pro metodu A

  σ_d = 340kPa pro metodu B

- **úroveň nízkého napětí** s maximálním deviátorem napětí**:**

  σ_d = 300kPa pro metodu A

  σ_d = 240kPa pro metodu B

Volbu nízké nebo vysoké úrovně vysvětluje obrázek 5.

Obrázek 5: Volba úrovně napětí dle umístění ve vozovce [3]

Norma rovněž navrhuje tři zkušební postupy:

- **Postup pro měření pružného chování:**

  Velkým počtem cyklů a dráhou odpovídající maximálnímu napětí dojde k ustálení nevratných deformací a k docílení toho, že se materiál začne chovat pružně. Tato příprava se rovněž nazývá kondiciování vzorku. Následně se sleduje pružné chování. Používá se pro stanovení hodnot modulu pružnosti materiálu pro různé úrovně napětí.

- **Postup pro měření plastických deformací:**

  Její princip spočívá v tom, že se aplikuje velký počet zatěžovacích cyklů jedné kombinace napětí bez předchozího zatěžování. Tento postup se používá pro stanovení trvalých deformací materiálů pro určitou úroveň napětí, nebo parametrů modelů pro předvídání plastických deformací.

  Zkoušky plastické deformace mohou vést ke třem druhům chování:

  - ustálení plastických deformací - průběh typu A (stabilní deformační chování);
  - dočasné ustálení plastických deformací - průběh typu B (porušení nastane po velkém počtu zatěžovacích cyklů);
  - přírůstkový kolaps - průběh typu C (porušení po malém počtu zatěžovacích cyklů).

- **Vícestupňová zkouška:**

  Tento postup umožňuje rychlé posouzení trvalých deformací způsobených různými úrovněmi napětí. Spočívá v aplikaci několika zatěžovacích stupňů na stejný vzorek s postupně se zvyšujícími úrovněmi napětí. Používá se především pro stanovení trvalé deformace vzorku.

3.4 Modul pružnosti

Je míra odporu materiálu vůči deformaci, tj. míra tuhosti materiálu. Je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí v oblasti malých deformací. Jednotkou modulu pružnosti jsou obvykle megapascaly (MPa). [5]

Vztah

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{5}$$

se nazývá Hookův zákon pro jedno-osou napjatost, kde σ je normálové napětí a ε je poměrná deformace. Fyzikální konstanta E se nazývá Youngův modul pružnosti.

Závislost poměrného přetvoření a napětí se nazývá pracovní diagram. Tato závislost platí pro lineárně pružné materiály, jako je například ocel či beton. Zeminy se ale chovají odlišně. Nejdříve dochází k nárůstu trvalých deformací a poté se začnou chovat pružně [6]. Proto se také používá během cyklické triaxiální zkoušce při měření pružného chování nejprve kondiciování zkušebního vzorku.

Z Hookova zákona pak vychází vztah uvedený v normě ČSN EN 13286-7 pro určení modulu pružnosti pro metodu A s proměnlivým komorovým tlakem:

$$E_r = \frac{(\sigma_1^r)^2 + \sigma_1^r \sigma_3^r + 2(\sigma_3^r)^2}{\sigma_1^r \varepsilon_1^r + \sigma_3^r \varepsilon_1^r - 2\sigma_3^r \varepsilon_3^r}, \tag{6}$$

kde:

σ_1^r je pružné osové napětí, získané ze vztahu:

$$\sigma_1^r = \sigma_{1\,max} - \sigma_{1\,min}. \tag{7}$$

$\sigma_{1\,min}$ a $\sigma_{1\,max}$ jsou minimální a maximální hodnoty axiálního napětí σ_1, během jednoho zatěžovacího cyklu.

σ_3^r je pružné radiální napětí, získané ze vztahu:

$$\sigma_3^r = \sigma_{3\,max} - \sigma_{3\,min}. \tag{8}$$

$\sigma_{3\,min}$ a $\sigma_{3\,max}$ jsou minimální a maximální hodnoty radiálního napětí σ_3, během jednoho zatěžovacího cyklu.

ε_1^r je pružné osové přetvoření.

ε_3^r je pružné radiální přetvoření.

ČSN EN 13286-7 pro metodu B s konstantním komorovým tlakem uvádí vztah:

$$E_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r}, \tag{9}$$

ve kterém se radiální přetvoření neuvažují.

Na přístroji umístěném v silničních laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně v současně době není ještě vyřešeno přichycení snímačů radiálních přetvoření a proto bylo nutné i pro výpočet hodnot naměřených metodou A použít vztah pro výpočet modulu pružnosti uvedený v normě ČSN EN 13286-7 pro metodu B s konstantním komorovým tlakem, ve kterém se radiální přetvoření neuvažují. Toto zjednodušení je na stranu bezpečnou. Radiální přetvoření při posouzení nestmelených podkladních vrstev ovlivňuje výsledky minimálně.

V anglicky psaných materiálech používají pro označení modulu pružnosti symbol M_r (resilient modulus). Tímto rozlišují nelineární závislost modulu pružnosti na napětí u zrnitých materiálů.

Pro proměnlivý komorový tlak je vyjádřen vztahem:

$$M_r = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)\Delta(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\varepsilon_1^r \Delta(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\,\varepsilon_3^r \Delta\sigma_3}, \tag{10}$$

Pro konstantní komorový tlak vztahem:

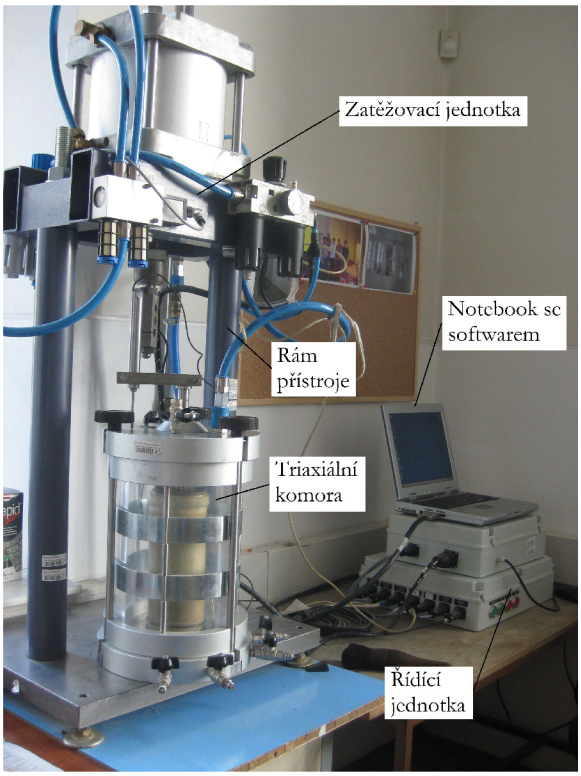
$$M_r = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_1^r}, \tag{11}$$

Modul pružnosti ovlivňuje spousta různých faktorů. Podle [17] jsou nejdůležitější:

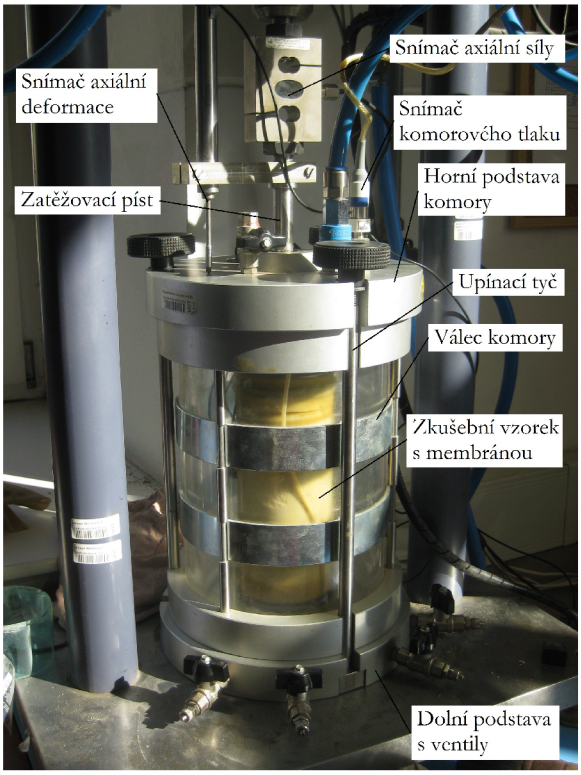
- **Svislé napětí na vzorek** – větší svislé napětí zvyšuje modul pružnosti.
- **Deviátor napětí** – ovlivňuje modul pružnosti ve srovnání se svislým méně.
- **Hutnost** – se zvyšující se hutností se může zvyšovat modul pružnosti materiálu.
- **Zrnitost, obsah jemných částic, velikost největšího zrna** – modul pružnosti se zvyšujícím se obsahem podle [17] obecně klesá. Pro vzorky s rovnoměrnou křivkou zrnitosti platí, že se zvyšující se velikostí největšího zrna roste modul pružnosti.
- **Vlhkost** – u vysušených a přiměřeně vlhkých vzorků není rozdíl tolik markantní, ale u vysoce saturovaných vzorků je rozdíl v modulu pružnosti již znatelný. Se zvyšující se vlhkostí klesá modul pružnosti. Tato závislost je způsobená pórovým tlakem
- **Historie zatěžování a počet cyklů**
- **Tvarový index a podíl drcených zrn –** vzorky obsahující drcené a ostrohranné zrna vykazují vyšší modul pružnosti než vzorky obsahující zaoblená a oblá zrna.

3.5 Triaxiální přístroj a jeho modifikace

Triaxiální přístroj a popis jeho částí je znázorněn na obrázku 6 a 7:



Obrázek 6: Hlavní části triaxiálního přístroje



Obrázek 7: Triaxiální přístroj - přiblížení

Tlaková komora

Tlaková komora cyklického triaxiálního přístroje má na rozdíl od standardních triaxiálních komor větší rozměry, které umožňují umístění snímačů síly a deformací uvnitř komory a má dodatečné prostupy pro vodiče elektrických měřících zařízení [1]. Její velikost je uzpůsobena velikosti vzorků. Velikost tlakové komory použité k měření v této bakalářské práci (540 mm x Ø130 mm) je vhodná pro vzorky o rozměrech 200 mm x Ø100 mm. Existují však i triaxiální komory větších rozměrů, které jsou vhodné pro zkoušení hrubozrnných materiálů.

Zatěžovací píst

Nejběžněji se používá hydraulický systém umožňující větší frekvence zatěžování, čímž i zrychlení zkoušky na rozdíl od pneumatického. Výhodou pneumatického systému je však jeho nízká cena a jednoduchost [1]. Pro tuto bakalářskou práci byl použit systém pneumatický nacházející se v silničních laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně. Součástí systému je kompresorová stanice.

Pracovní médium

Pro přenos tlaku se jako pracovní médium používá vzduch, voda nebo silikonový olej [1]. U přístrojů s vyšší frekvencí je však požadováno pracovní médium ve formě vody či oleje. Použití vzduchu je vzhledem k jeho vyšší stlačitelnosti výhodné využít u metody stálého komorového tlaku a doporučuje se, pokud není elektrické připojení přístrojů plně izolováno [7]. V této bakalářské práci bylo u všech metod použito jako pracovní médium vzduch.

Zatěžovací zařízení

Zatěžovací zařízení pro zkušební postupy s proměnlivým komorovým tlakem musí být schopno vyvozovat v pevně daných cyklech zatěžování a odlehčení. Proměnlivé opakované osové zatížení a komorový tlak musí setrvat během zatěžování v zadaném poměru, přičemž fázový posun mezi pulsy osového zatížení a komorového tlaku nesmí překročit 1 % doby cyklu a frekvence zatěžování se musí udržovat mezi 0,2 Hz a 10 Hz [1].

Pro zkušební postupy s konstantním komorovým tlakem musí být zatěžovací zařízení schopno aplikovat proměnlivé opakované osové zatížení v pevně daných cyklech zatěžování a odlehčení a během každého cyklu zatěžování se musí minimální a maximální hodnoty deviátoru napětí a konstantního komorového tlaku aplikovat s přesností ± 2 kPa

nebo 1 %, podle toho, co je větší. Kontrolní systém cyklického tlaku musí být schopen aplikovat maximální komorový tlak přinejmenším 70 kPa, přičemž komorový tlak lze také aplikovat částečným vakuem uvnitř vzorku. Frekvence zatěžování se musí rovněž udržovat mezi 0,2 Hz a 10 Hz. [1]

Snímače tlaku

Snímače tlaku sledují komorové tlaky v tlakové komoře nebo částečné vakuum uvnitř vzorku a musí mít vhodný rozsah citlivosti a přesnost ± 2 kPa [1]. Snímač komorové tlaku je na přístroji v silničních laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně umístěn na horní podstavě triaxiální komory.

Snímače osové síly

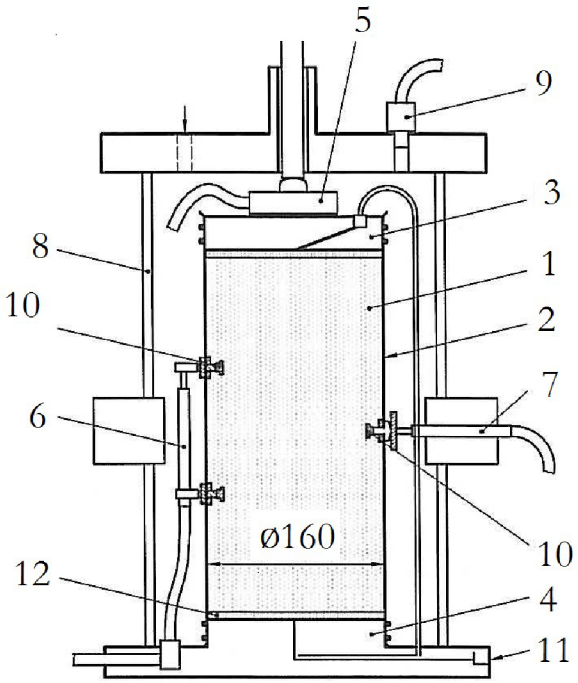
Osová síla aplikovaná na vzorek se sleduje snímačem s vhodným rozsahem a s přesností ± 2 kPa, který se má umístit uvnitř triaxiální tlakové komory, a to v přímém dotyku s horní podstavou. Na použitém přístroji v silničních laboratořích VUT FAST je snímač osové síly uchycený na zatěžovacím pístu.

Zařízení pro měření odezvy

Pro měření axiálních a radiálních deformací se v cyklických triaxiálních přístrojích používá měřičů LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Ty by měly být správně připevněny přímo na vzorek, z prováděcího hlediska je ovšem jednodušší je připevnit na horní podstavu nebo na komoru triaxiálního přístroje, což má ale za následek mírné ovlivnění výsledků.

Norma ČSN EN 13286-7 uvádí dva systémy pro měření osového a radiálního přetvoření:

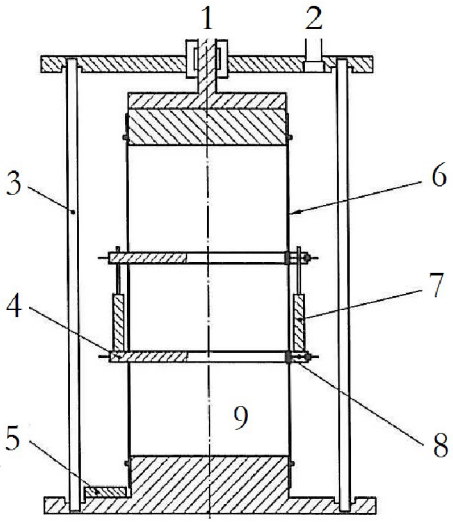
- Systém měření používající tři lineární snímače deformace pro měření osového přetvoření a tři lineární snímače deformace pro měření radiálního přetvoření, měřeného v polovině výšky vzorku [1]. (Obrázek 8)
- Systém měření používající lineární snímače deformace a kroužky s tenzometry, který používá dva lineární snímače deformace pro měření osového přetvoření a dva pružné kroužky z epoxidové pryskyřice vybavené tenzometry pro měření radiálního přetvoření. To se vyvodí z deformace pružného kroužku [1]. (Obrázek 9)



Legenda

1 Vzorek
2 Membrána
3 Horní podstava
4 Spodní podstava
5 Snímač síly
6 Osové lineární snímače deformace
7 Radiální lineární snímače deformace
8 Stěna triaxiální komory
9 Snímač tlaku
10 Stavěcí šrouby pro posuvné snímače
11 Drenážní otvor
12 Porézní destička

Obrázek 8: Schéma triaxiální komory a systémů pro měření osové a radiální deformace s použitím lineárních snímačů deformace [1]



Legenda

1 Zatěžovací píst
2 Ventil komorového tlaku
3 Stěna triaxiální komory
4 Kroužky
5 Snímač komorového tlaku
6 Membrány
7 Lineární snímače deformace
8 Stavěcí šrouby
9 Vzorek

Obrázek 9: Schéma triaxiální komory a systémů pro měření osového přetvoření použitím lineárních snímačů deformace a radiálního přetvořeni použitím pružných kroužků [1]

Osová a radiální přetvoření se měří s přesností $5 \cdot 10^{-3}\text{mm} + 10^{-3} \cdot L$ (kde L je naměřený posun v milimetrech). Odečty všech snímačů se musí zaznamenávat zvlášť.

Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 3.4 u použité triaxiální komory nebyly snímače radiální deformace použity vůbec.

Jiná zařízení

Je nutné zajistit odpovídající zařízení pro signalizací frekvence, druhu zkoušky a k záznamu jednotlivých zařízení navíc k měřicím přístrojům pro současné zaznamenávání osového zatížení, tlaku v komoře a osových a radiálních deformací. Systém záznamu pracuje na určité frekvenci, nebo je typem, schopným při dané frekvenci zkoušení zachytit minimum a maximum působícího napětí a tomu odpovídajícího přetvoření. [1]

Horní a spodní podstava

Horní a spodní podstava umožňují drenáž z obou konců vzorku. Jsou z pevného, nekorozivního, pro vodu nepropustného materiálu a musí mít rovný povrch pláště v dotyku s porézními destičkami kruhového profilu. Průměr horní a spodní desky je roven nebo je větší než počáteční průměr vzorku. [1]

Porézní destičky

Porézní destičky oddělují vzorek od horní a spodní podstavy a mají průměr, který se rovná nebo je o trochu menši než průměr vzorku [1]. Je důležité hlídat, aby nebyly ucpané.

Polopropustné filtry

V normě je uvedeno použití polopropustných filtrů, propustných pro vzduch a nepropustných pro vodu, které se umisťují mezi horní desku, vzorek a spodní desku při prováděni zkoušek s konstantní vlhkostí. Průměr těchto filtrů je roven průměru vzorku [1]. Při zkouškách pro tuto bakalářskou práci nebyly využity.

Membrána

Membrána poskytuje dostatečnou ochranu proti průsaku. Je možné použití dvou membrán, aby nedošlo k průsaku. Celková tloušťka membrán nesmí překročit 0,8 % průměru vzorku. Pro vyhovující uchycení vzorku nesmí mít neroztažená membrána průměr menší než 95 % průměru vzorku. Uzavírá se pryžovými O kroužky s neroztaženým vnitřním průměrem menším než 90 % průměru podstav. [1]

Upnutí vzorku do membrány může rovněž ovlivnit výsledky měření., jelikož membrána určitým způsobem zkušební těleso ztužuje.

Obrázek 10: Upínaní vzorku do přístroje - vzorek s porézními destičkami (vlevo) a vzorek s membránou a O kroužky (vpravo)

3.6 Variabilita při zkoušení v cyklickém triaxiálním přístroji

Zatímco evropská norma ČSN EN 13286-7 doporučuje u postupu pro výpočet modulu pružnosti kondiciování při napětích:

- **metoda A:** $\sigma_{3,min}$ = 10 kPa, $\sigma_{3,max}$ = 110 kPa, σ_d = 300 kPa (nízké napětí),
  $\sigma_{3,min}$ = 10 kPa, $\sigma_{3,max}$ = 110 kPa, σ_d = 600 kPa (vysoké napětí),
- **metoda B:** $\sigma_{3,konst.}$ = 70 kPa, σ_d = 200 kPa (nízké napětí),
  $\sigma_{3,konst.}$ = 70 kPa ,σ_d = 340 kPa (vysoké napětí),

po 20 000 cyklech, které doporučuje přerušit, pokud jsou plastická osová přetvoření a modul pružnosti konstantní. AASHTO v T 292-91 a T 294-92 (American Association of State Highway and Transportation Officials) podle [18] doporučuje kondiciování jen po 1 000 cyklech, při napětích:

- **T 292-91:** $\sigma_{3,konst.}$ = 103,4 kPa, σ_d = 82,3 kPa (pro zemní pláň),
  $\sigma_{3,konst.}$ = 137,8 kPa, σ_d = 103,4 kPa (pro podkladní vrstvy),
- **T 294-92:** $\sigma_{3,konst.}$ = 103,4 kPa, σ_d = 103,4 kPa.

V novějším předpisu AASHTO T 307-99 pak dokonce doporučuje podle [19] jen 500 – 1 000 při napětích:

- **T 307-99:** $\sigma_{3,konst.}$ = 41,4 kPa, σ_d = 27,6 kPa.

I při samotném zkoušení pružného chování se liší použitá napětí. ČSN EN 13286-7 doporučuje zkoušet při napětích:

- **metoda A:** $\sigma_{3,min}$ = 10 kPa, $\sigma_{3,max}$ = 20 - 260 kPa, σ_d = 0 - 300 kPa (nízké napětí),
  $\sigma_{3,min}$ = 10 kPa, $\sigma_{3,max}$ = 15 - 277 kPa, σ_d = 0 - 600 kPa (vysoké napětí)
  (obojí s cyklujícími se hodnotami komorového tlaku, se vzrůstající tendencí),
- **metoda B:** $\sigma_{3,konst.}$ = 20 - 150 kPa, σ_d = 20 - 300 kPa (nízké napětí),
  $\sigma_{3,konst.}$ = 20 - 150 kPa ,σ_d = 30 - 475 kPa (vysoké napětí)
  (obojí s postupným nárůstem hodnot komorového tlaku),

vždy po 100 cyklech v každém nastavení.

AASHTO doporučuje zkoušet při napětích:

- **T 292-91:** $\sigma_{3,konst.}$ = 13,8 - 103,4 kPa, σ_d = 20,7 - 103,4 kPa (pro zemní pláň),
  $\sigma_{3,konst.}$ = 20,7 - 137,8 kPa, σ_d = 34,5 - 275,6 kPa (pro podkladní vrstvy),
  (obojí s postupným klesáním hodnot komorového tlaku),
- **T 294-92:** $\sigma_{3,konst.}$ = 20,7 - 137,8 kPa, σ_d = 20,7 - 276,5 kPa
  (s postupným nárůstem hodnot komorového tlaku),
- **T 307-99:** $\sigma_{3,konst.}$ = 13,8 - 41,4 kPa ,σ_d = 13,8 - 68,9 kPa
  (s postupným klesáním hodnot komorového tlaku),

vždy po 50 cyklech v každém nastavení pro T292-91 s T 294-92 a po 100 cyklech v novější T307-99.

V Australských předpisech [20] se doporučuje užití napětí vždy po 100 cyklech v každém nastavení v rozmezí:

- **Austroads:** $\sigma_{3,konst.}$ = 20 - 150 kPa, σ_d = 100 - 600 kPa
  (s cyklujícími se hodnotami komorového tlaku, se vzrůstající tendencí).

Počet zatěžovacích cyklů má na výsledky významný vliv. Je dokázáno, že k ustálení pružných deformací dochází už při velmi nízkém deviátoru napětí (<69kPa [10psi]) přibližně při 100 000 cyklech. Při vyšší hodnotě deviátoru napětí dochází k ustálení již při přibližně 5 000 cyklech. [8]

V [17] se uvádí, že při použití cyklování při konstantním komorovém tlaku vychází hodnoty modulu pružnosti vyšší. Závislost však není konstantní a závisí na zatížení.

Frekvence zatěžování se nejčastěji uvádí 20 - 40 cyklů za minutu. Frekvence zatěžování by podle [2] neměla ovlivnit trvalé deformace, dokud klidová perioda trvá alespoň 0,33 s, pokud zemina nevykazuje tixotropní chování (rychlost deformace není úměrná napětí) a saturace není vysoká.

Vzorky mohou být saturované nebo suché. Častější bývá zkoušení nesaturovaných vzorků. Nedochází ve vzorku tímto k vysokým pórovým tlakům vedoucím k rozpadu zkušebního tělesa. Americké předpisy AASHTO dokonce zkoušení nesaturovaných vzorků doporučují.

Pro tuto bakalářskou práci jsem zvolila nesaturovanou verzi zkoušky, i z toho důvodu, že zavedení vody do triaxiální komory ještě není v silniční laboratoři Fakulty stavební VUT v Brně vyřešeno. Nesaturovaným vzorkem se předpokládá správné vyřešení odvodnění vozovky a jejích podkladních vrstev.

Zajímavostí je, že se mnohokrát v různých zdrojích uvádí, že pro měření plastických deformací by měl být pro každou dráhu deviatorického napětí nový vzorek, ale přesto se to kvůli časové náročnosti často nedodržuje.

3.7 Různé postupy při přípravě zkušebních těles

Nejen při zkoušení cyklickým triaxiálním přístrojem, ale už při samotné přípravě vzorků vzniká mnoho aspektů, které mohou do jisté míry ovlivnit výsledky zkoušek a je třeba je brát v úvahu.

Norma ČSN EN 13286-7 doporučuje pro přípravu vzorků použít tyto tři hutnící metody:

- **Hutnění vibrací a stlačováním**
- **Hutnění vibračním pěchem**
- **Proctor, standard, proctor modifikovaný**

Mě bylo panem Ing. Dušanem Stehlíkem, Ph.D. doporučeno použít pro zhutnění hydraulický lis. Zhutnění lisováním jemnozrnné zeminy je výhodné, protože zkušební těleso není oproti zhutnění vibračním kladivem a zhutnění metodou Proctor standard/modifikovaný připravováno po vrstvách a nedochází proto u cyklické triaxiální zkoušky k porušování na kontaktních plochách jednotlivých vrstev.

Bylo prokázáno, že použití různých způsobů hutnění i při dosažení stejné vlhkosti a objemové hmotnosti může vést k výrazným odlišnostem deformačního chování, zejména pak odolnosti proti vzniku plastických deformací. [1]

Aby bylo dosaženo stejné objemové hmotnosti a vlhkosti je kladen důraz na dodržení stejné hutnící energie a na přesnost měření výšky a průměru vzorku k určení objemové vlhkosti.

3.8 Charakteristiky použitých materiálů

3.8.1 Recyklát směsný

Vlastnosti směsného recyklátu výrazně ovlivňuje materiál, ze kterého je recyklát vyroben. Pro použití v konstrukčních vrstvách vozovky je důležité separovat z recyklátu materiály, jako je dřevo, plasty, cihly, sklo a výztuž, které směsný recyklát degradují a snižují pevnostní charakteristiky a jeho únosnost. Problémem směsného recyklátu, především toho s velkým obsahem cihelných a jemnozrnných částic, je jeho vysoká otlukovost, která se pohybuje mezi 60 – 70 % (vyhodnocení zkouškou Los Angeles). U přírodního kameniva se ovšem tato hodnota pohybuje v rozmezí 40 – 50 %. Proto není vhodné použití směsného recyklátu s vysokým obsahem cihelných částic do podkladních vrstev, ale doporučuje se použití do horní vrstvy násypu, či podloží vozovky. Snížením vlhkosti zeminy díky nasákavosti cihelného střepu je vhodné pro zlepšování nevhodných vlastností jemnozrnných zemin. Rovněž také zlepšuje křivku zrnitosti zeminy. U směsného recyklátu je velmi důležité sledovat nasycení vodou, především s obsahem soli. Ve stavu přirozené vlhkosti je odolnost proti mrazu dobrá, ale při nasycení vodou má výrazně klesající tendenci. [9]

3.8.2 Jemnozrnná zemina

Zeminy s vysokým obsahem jemných částic se pro použití v dopravních stavbách považují za málo vhodné a jíly až nevhodné. Proto se zeminy upravují za předpokladu, že jejich úprava je ekonomická vzhledem k jiným možný opatřením. Volba způsobu úpravy zemin závisí na jejich fyzikálně-mechanických vlastnostech a jejich chemickém složení.
Vlastnosti zeminy se zlepšují:

- **Mechanicky** - použitím příměsi zemin nebo jiných materiálů (např. popílku) vhodné zrnitosti a vlhkosti se dosáhne lepších mechanických vlastností upravené zeminy, lepší zpracovatelnosti, vyšší smykové pevnosti a nižší stlačitelnosti.
- **Příměsí pojiva** - se zlepší zhutnitelnost snížením vlhkosti zeminy, zvýší se únosnost, sníží se namrzavost a upraví se plastické vlastnosti zeminy. [10]

Zeminy obsahují různé chemické látky, z nichž některé mohou mít vliv na vlastnosti úpravy zemin pojivy. Před úpravou zemin je vhodné znát obsah chemických látek, protože mohou reagovat s pojivem a ovlivňovat výsledek zlepšení. V případě návrhu úpravy zemin pojivy se stanovuje vlhkost, zrnitost, index plasticity zeminy, zhutnitelnost podle Proctor standard nebo relativní hutnost, poměr únosnosti CBR a IBI a namrzavost. [10]

3.8.3 Popílky

Elektrárenský popílek vzniká při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Jedná se o nespalitelné anorganické příměsi, které byly buďto součástí rostlin, nebo byly do uhlí splaveny podzemní vodou. Čím je uhlí méně kvalitní, tím více těchto nespalitelných příměsí (popelovin) obsahuje. Popílek se skládá z velmi jemných částic, snadno roznášených větrem, se strukturou písčitého prachu. Popílek značně sesedá a v některých případech vytváří těsně pod povrchem tvrdou vrstvu. Má vysokou sorpční schopnost a značnou kapilární vzlínavost. V sorpci vody předčí popílek většinu půd. [12]

Při použití popílkového stabilizátu je jeho zpracovatelnost ovlivněna rychlostí chemických reakcí, způsobujících jeho zpevňování; ty začnou probíhat zpravidla již při navlhčení nebo aditivaci produktů. Tento proces je nutno respektovat při návrhu technologie zpracování na základě výsledků průkazních zkoušek.

Do aktivní zóny ztužujících vrstev násypu a přechodové oblasti mostů může být použit pouze popílkový stabilizát, což je zvlhčená směs popílku nebo popela s pojivem (vápno a/nebo cement). Samostatný druh stabilizátu je produkt z fluidního spalování. Používá se také kamenivo zpevněné popílkovou suspenzí (KAPS).

Do podkladních vrstev lze použít pouze popílkový stabilizát nebo popílkovou suspenzi, což je směs popílku (klasického, fluidního) a vody, popř. i pojiva (hydraulické maltoviny, vápenného hydrátu nebo cementu apod.), v tekutém stavu, v přesně stanoveném poměru mísení.

Pro kryt vozovky je možno použít technologii KAPS při splnění požadavků na vlastnosti popílkové suspenze.

Pro ověřování vlastností nestabilizovaných popílků se zjišťuje jejich přirozená vlhkost, objemová hmotnost a zrnitost a provádí se zkouška Proctor-Standard, CBR a chemický rozbor. Pro ověřování vlastností popílkového stabilizátu se zjišťuje vlhkost, míra zhutnění a modul přetvárnosti. U popílkové suspenze se zkouší tekutost, homogenita, zjišťuje se obsah nečistot, objemové změny a pevnost v prostém tlaku. [11]

4 Praktická část

4.1 Materiál pro zkoušení

Pro zkoušení v triaxiálním přístroji jsem použila 3 různé materiály:

- **recyklát směsný 0/4:** S4SM – písek hlinitý
  obsah jemných částic: 22 %
  maximální objemová hmotnost: 1908 kg/m^3
  w_{opt} = 10 % (Proctor modifikovaný)
  podmínečně vhodný pro podloží vozovky
  podmínečně vhodný pro technologické vrstvy násypu
  (recyklační linka Dufonev)

Obrázek 11: Směsný recyklát 0/4

- **jemnozrnná zemina F6CI:** jíl se střední plasticitou
  obsah jemných částic 97%
  maximální objemová hmotnost: 1850 kg/m^3
  w_{opt} = 15 % (Proctor modifikovaný)
  w_L = 42 %
  w_P = 18 %
  nevhodná do podloží vozovky
  podmínečně vhodná pro technologické vrstvy násypů
  (podloží garáží v areálu Veveří, FAST VUT v Brně)

Obrázek 12: Jemnozrnná zemina

- **elektrárenský popílek** (elektrárna Tisová)

Obrázek 13: Elektrárenský popílek

4.2 Příprava vzorků

Z každého materiálu jsem připravila vždy šestici válcových vzorků o průměru 100 mm a výšce 200 mm, z čehož byly vždy:

- 2 vzorky určené pro zkoušení pomocí metody A
- 2 vzorky určené pro zkoušení pomocí metody B
- 2 vzorky určené pro zkoušení vlastním nastavením

Rozměry vzorků vyhovují předpisu v normě ČSN EN 13286-7, kde se uvádí, že zkušební tělesa mají mít průměr větší, než pětinásobek maximální velikosti částice materiálu a výšku dvojnásobkem průměru, při splnění odchylky ± 2 %.

Nejdříve jsem připravila 6 zkušebních těles ze směsného recyklátu 0/4. Navážením 4 kg směsného recyklátu a navlhčením vodou jsem dosáhla požadované optimální vlhkosti 10 %. Zhutnění jsem provedla pomocí lisu (obrázek 14) z důvodu uvedeného v kapitole 3.7. Navlhčený recyklát jsem napěchovala do promazané hutnící formy se spodní kotvou. Uložením horní kotvy bylo zajištěno rovnoměrné roznášení síly lisu.

Vzorky jsem lisovala tlakem 400 kg/cm^2 po dobu 10 minut. Nejdříve se spodní kotvou, následně bez ní.

Obrázek 14: Hydraulický lis s formou

Pak jsem vzorek položila ve formě na vlhké místo po dobu 24h, a poté jsem ho odformovala. Mezi prvními vzorky (konkrétně 4 případy) vznikl při odformování problém, že se velké části recyklátu přilepily na vnitřek formy, čímž došlo ke znehodnocení vzorku. Tento problém vznikl pravděpodobně špatným promazáním formy či použitím špatného oleje a byl vyřešen výměnou oleje a velmi důkladným promazáním formy. Křivé vzorky jsem zarovnala a nerovnosti na spodních a horních podstavách jsem dorovnala samonivelační stěrkou (obrázek 15). Hotové vzorky jsem pak již bez formy uložila na vlhké a tmavé místo, kde zrály přibližně týden.

Obrázek 15: Vzorek recyklátu směsného zarovnaný samonivelační stěrkou

Dále jsem připravila 6 zkušebních těles z jemnozrnné zeminy F6CL. Rozdíl oproti recyklátu byl, že tato zemina již měla požadovanou vlhkost 15%.

Při přípravě těchto zkušebních těles (kromě prvního) bylo nutné použít menší tlak v lisu z důvodu únavy materiálu forem, především spojovacích šroubů. Zbývající vzorky byly tedy lisovány tlakem 200 kg/cm^2.

Naposledy jsem připravila 6 vzorků z elektrárenského popílku. U těch opět nastal problém s odformováním. Prvním řešením bylo nejdříve vytlačování otočeným hydraulickým lisem (obrázek 16). Bylo to řešení zajímavé, nicméně účinnějším řešením se nakonec ukázalo formu pro popílek nevymazávat vůbec. Přesto měl materiál tendenci lepit se ke stěnám formy a výsledné díry ve vzorku jsem musela dodatečně zadělat samonivelační stěrkou (obrázek 16).

Obrázek 16: Vytlačování vzorku z formy pomocí otočeného lisu a vzorek elektrárenského popílku zadělaný samonivelační stěrkou

Obrázek 17: Kompletní sada vzorků

4.3 Zkoušení

Při měření na triaxiálním přístroji jsem pro všechny metody použila nastavení pro úroveň nízkého napětí uvedenou v normě ČSN EN 13286-7. Zvolila jsem postup pro měření pružné deformace za účelem zjištění modulu pružnosti. Tento postup spočívá v tom, že se na vzorku nejdříve provede kondiciování důležité pro ustálení trvalých deformací, čímž je dosaženo pružného chování materiálu. Úroveň nízkého napětí jsem zvolila proto, že lépe vystihuje prostředí, kterému jsou vystaveny zkoušené materiály: recyklát směsný, zemina a popílek. Tyto materiály nevydrží velké tlaky a jsou určeny především do podloží vozovek s nízkým dopravním zatížením. Aplikovaná napětí dle normy jsou uvedena v tabulkách 1 a 2. Pro srovnání zde uvádím i úrovně vysokého napětí uvedené v normě. Kondiciování se provádí po 20 000 cyklech, ale je možné ho zastavit i při nižším počtu zatěžovacích cyklů, pokud jsou plastická osová přetvoření a modul pružnosti konstantní (přírůstek plastického osového přetvoření je menší než 10^{-7} na zatěžovací cyklus a pokud se modul pružnosti mění méně než 5 kPa na zatěžovací cyklus). [1]

Kondiciování

- **Metoda A:** viz tabulka 1
- **Metoda B:** viz tabulka 2
- **Vlastní nastavení:** Pro kondiciování byla použita stejná napětí jako pro metodu B.

Tabulka 1: Kondiciování - metoda A

Úroveň nízkého napětí				
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**		**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	min	max	min	max
20000	10	110	0	300

Úroveň vysokého napětí				
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**		**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	min	max	min	max
20000	10	110	0	600

Tabulka 2: Kondiciování - metoda B

Úroveň nízkého napětí			
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	konstatní	min	max
20000	70	0	200

Úroveň vysokého napětí			
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	konstatní	min	max
20000	70	0	340

Po ukončení přípravy vzorku jsem provedla opakované zatěžování pro zkoušení pružnosti. Pro úroveň nízkého napětí byla napětí aplikována v cyklických drahách vždy pro 100 cyklů podle normy ČSN EN 13286-7 Aplikovaná napětí jsou uvedena v tabulkách 3, 4, 5, a 6. Pro srovnání je vpravo od úrovně nízkého napětí i úroveň vysokého napětí uvedená v normě.

- **Metoda A:** viz tabulka 3
- **Metoda B:** viz tabulka 4
- **Vlastní nastavení 1** [a,b]**:** viz tabulka 5
- **Vlastní nastavení 2** [b]**:** viz tabulka 6

[a] Pro zkoušení při vlastním nastavením u vzorků recyklátu směsného jsem nechala cyklovat i komorový tlak. Tímto jsem se snažila na vzorek působit zatížením, které se snaží vystihnout prostředí těsně pod vozovkou.

[b] Jako vlastní nastavení jsem použila první tři stupně vícestupňového postupu uvedeného v normě ČSN EN 13286-7. Je určený pro rychlé posouzení trvalých deformací způsobených různými úrovněmi napětí. S použitím kondiciování je tento postup vhodný i pro měření pružného chování.

Hodnoty napětí se zaznamenávají a vyhodnocují při pořadí cyklů 90. - 100. Pro vyhodnocení výsledků jsem použila program vytvořený Ing. Karlem Pechou.

Tabulka 3: Úrovně napětí pro pružné chování – metoda A

Úroveň nízkého napětí				
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**		**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	min	max	min	max
100	10	60	0	0
100	10	110	0	0
100	10	185	0	0
100	10	260	0	0
100	10	60	0	30
100	10	110	0	60
100	10	185	0	105
100	10	260	0	150
100	10	60	0	75
100	10	110	0	150
100	10	160	0	225
100	10	210	0	300
100	10	35	0	75
100	10	60	0	150
100	10	85	0	225
100	10	110	0	300
100	10	20	0	60
100	10	30	0	120
100	10	35	0	150

Úroveň vysokého napětí				
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**		**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	min	max	min	max
100	10	60	0	0
100	10	110	0	0
100	10	185	0	0
100	10	260	0	0
100	10	77	0	100
100	10	143	0	200
100	10	210	0	300
100	10	277	0	400
100	10	60	0	150
100	10	110	0	300
100	10	160	0	450
100	10	210	0	600
100	10	35	0	150
100	10	60	0	300
100	10	85	0	450
100	10	110	0	600
100	10	15	0	75
100	10	20	0	150
100	10	25	0	225

Tabulka 4: Úrovně napětí pro pružné chování – metoda B

Úroveň nízkého napětí			
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	konstatní	min	max
100	20	0	20
100	20	0	35
100	20	0	50
100	20	0	70
100	35	0	35
100	35	0	50
100	35	0	70
100	35	0	90
100	35	0	120
100	50	0	50
100	50	0	70
100	50	0	90
100	50	0	120
100	50	0	160
100	70	0	70
100	70	0	90
100	70	0	120
100	70	0	160
100	70	0	200
100	100	0	90
100	100	0	120
100	100	0	160
100	100	0	200
100	100	0	240
100	150	0	120
100	150	0	160
100	150	0	200
100	150	0	240
100	150	0	300

Úroveň vysokého napětí			
Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
	konstatní	min	max
100	20	0	30
100	20	0	50
100	20	0	80
100	20	0	115
100	35	0	50
100	35	0	80
100	35	0	115
100	35	0	150
100	35	0	200
100	50	0	80
100	50	0	115
100	50	0	150
100	50	0	200
100	50	0	280
100	70	0	115
100	70	0	150
100	70	0	200
100	70	0	280
100	70	0	340
100	100	0	150
100	100	0	200
100	100	0	280
100	100	0	340
100	100	0	400
100	150	0	200
100	150	0	280
100	150	0	340
100	150	0	400
100	150	0	475

Tabulka 5: Úrovně napětí pro pružné chování – vlastní nastavení 1

	Úroveň nízkého napětí				
	Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**		**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
		min	max	min	max
Zatěžovací stupeň 1	100	10	20	0	20
	100	10	20	0	40
	100	10	20	0	60
	100	10	20	0	80
	100	10	20	0	100
	100	10	20	0	120
Zatěžovací stupeň 2	100	10	45	0	60
	100	10	45	0	90
	100	10	45	0	120
	100	10	45	0	150
	100	10	45	0	180
	100	10	45	0	210
Zatěžovací stupeň 3	100	10	70	0	80
	100	10	70	0	120
	100	10	70	0	160
	100	10	70	0	200
	100	10	70	0	240
	100	10	70	0	280

Tabulka 6: Úrovně napětí pro pružné chování – vlastní nastavení 2

	Úroveň nízkého napětí			
	Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
		konstatní	min	max
Zatěžovací stupeň 1	100	20	0	20
	100	20	0	40
	100	20	0	60
	100	20	0	80
	100	20	0	100
	100	20	0	120
Zatěžovací stupeň 2	100	45	0	60
	100	45	0	90
	100	45	0	120
	100	45	0	150
	100	45	0	180
	100	45	0	210
Zatěžovací stupeň 3	100	70	0	80
	100	70	0	120
	100	70	0	160
	100	70	0	200
	100	70	0	240
	100	70	0	280

	Úroveň vysokého napětí			
	Počet cyklů	**Komorový tlak, σ_3 v kPa**	**Deviátor napětí, σ_d v kPa**	
		konstatní	min	max
Zatěžovací stupeň 1	100	20	0	50
	100	20	0	80
	100	20	0	110
	100	20	0	140
	100	20	0	170
	100	20	0	200
Zatěžovací stupeň 2	100	45	0	100
	100	45	0	180
	100	45	0	240
	100	45	0	300
	100	45	0	360
	100	45	0	420
Zatěžovací stupeň 3	100	70	0	120
	100	70	0	240
	100	70	0	320
	100	70	0	400
	100	70	0	480
	100	70	0	560

5. Zhodnocení práce

Zkoušení v triaxiálním přístroji probíhalo za účelem sledování pružného chování tří různých materiálů, určených do podloží vozovek s nízkým dopravním zatížením, za účelem zjištění jejich modulů pružnosti a porovnání metody A, metody B a vícestupňového postupu pro úroveň nízkého napětí uvedených v normě ČSN EN 13286-7.

V příloze jsou zaznamenány výstupy měření z triaxiálního přístroje zpracované programem TRIAXIAL, upravené pomocí programu vytvořeného Ing. Karlem Pechou. Každá tabulka obsahuje nastavení komorového tlaku, deviátoru napětí a svislého napětí přístroje dle normy pro porovnání s naměřenými hodnotami, dále pak obsahuje vypočtená poměrná přetvoření (poměr změny původního rozměru k původnímu rozměru vzorku) a modul pružnosti. Graficky jsou znázorněny pracovní diagramy (závislosti poměrného přetvoření na svislém napětí). V tomto případě je na svislé ose pro lepší názornost poměrné přetvoření a na vodorovné svislé napětí. Dále jsou pak v příloze graficky znázorněny závislosti modulu pružnosti na svislém napětí po jednotlivých drahách.

Minimální a maximální hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé materiály a všechny metody jsou pro lepší názornost uvedeny v tabulkách 7, 8 a 9.

Z vyhodnocení v grafech a tabulkách 7, 8 a 9 byly vyřazeny některé nelogicky extrémní první a poslední hodnoty, označené v příloze červeně.

Tabulka 7: Výsledné rozmezí modulu pružnosti recyklátu směsného

recyklát směsný	modul pružnosti [Mpa]					
	metoda A		metoda B		vícestupňový postup	
č. vzorku	3	12	1	2	8	9
min	81,62	99,96	105,17	127,45	106,58	136,66
max	165,09	216,19	586,23	344,06	221,25	260,50

Tabulka 8: Výsledné rozmezí modulu pružnosti zeminy F6CI

zemina	modul pružnosti [Mpa]					
	metoda A		metoda B		vícestupňový postup	
č. vzorku	6	7	4	5	10	11
min	172,62	324,16	257,52	405,47	224,15	206,29
max	424,53	2143,98	1901,85	2404,62	756,62	532,61

Tabulka 9: Výsledné rozmezí modulu pružnosti elektrárenského popílku

elektrárenský popílek	modul pružnosti [Mpa]					
	metoda A		metoda B		vícestupňový postup	
č. vzorku	17	18	13	14	15	16
min	163,60	163,13	139,56	174,49	165,46	88,38
max	452,65	487,60	866,80	817,13	605,35	357,83

Výsledné návrhové moduly pružnosti směsného recyklátu vychází v rozmezí 82 - 586 MPa, což přibližně odpovídá modulu pružnosti měřenému statickou zatěžovací zkouškou in situ. Z tabulky 7 je možno vyčíst, že při použití metody B - tedy při konstantním komorovém tlaku vychází modul pružnosti vyšší. Potvrzuje to již uvedenou domněnku v kapitole 3.6, že při použití cyklování při konstantním komorovém tlaku vychází hodnoty modulu pružnosti vyšší.

U jemnozrnné zeminy vyšly při zkoušení nereálné hodnoty modulu pružnosti (až 2144 MPa). Je to pravděpodobně způsobeno tím, že tyto zeminy nejsou schopny odolávat tak vysokým zatížením, jaké simulují metoda A i B, vhodné pro zkoušení materiálů, určených do podloží vozovky. Výsledné moduly pružnosti určené vícestupňovým postupem, při kterém se aplikují menší napětí, vycházejí lépe, přesto je nelze považovat za správné.

Výsledné hodnoty modulu pružnosti elektrárenského popílku vycházejí poměrně vysoké (89 - 867 MPa), pravděpodobně došlo ke stmelení materiálu během týdenního zrání vzorků. Opět je z tabulky 9 zřejmé, že při použití metody B (konstantní komorový tlak) vychází modul pružnosti vyšší.

6. Závěr

Cyklická triaxiální zkouška je ve světě běžná jako funkční zkouška vhodná pro stanovení modulu pružnosti nestmelených materiálů pro návrh podkladních vrstev vozovky. Jelikož funkční zkoušky lépe charakterizují chování zhutněných směsí v konstrukci vozovky. Především v USA se zkouška běžně používá již řadu let, jak se dá zjistit z nejrůznějších materiálů. Vytvořili rozsáhlou databázi výsledků měření modulů pružnosti různých materiálů spolu s jejich charakteristikami [15]. Podle různých materiálů i v Austrálii proběhla řada výzkumu věnujících se tomuto tématu. V neposlední řadě jsou často zmiňovány i laboratoře v UK.

V České republice se zkoušením cyklického zatěžování nestmelených směsí do konstrukčních vrstev vozovek zabývá pouze silniční laboratoř Ústavu pozemních komunikací Fakulty stavební VUT v Brně.

Úkolem této bakalářské práce bylo zjistit a porovnat různé možnosti stanovení modulu pružnosti na základě zkoušení nestmelených směsí určených do podloží vozovky v cyklickém triaxiálním přístroji. Zjistila jsem, že jednotlivé zkušební postupy se často velmi liší, jak při přípravě zkušebního tělesa, tak při kondiciování a vlastním zkoušení, především v různých drahách napětí. Velmi se liší i samotné uspořádání cyklického triaxiálního přístroje, často jej jednotlivé laboratoře sestavovaly postupně a uzpůsobovaly ke svým potřebám.

K úplnému splnění tohoto úkolu by bylo potřeba mít přístup k zahraničním normám a předpisům, vzhledem k tomu, že v naprosté většině zahraničních článků a publikací se autoři pouze odkazují na normy a předpisy, k nimž je omezený přístup. Největším přínosem by určitě byl přímý přístup k dokumentům AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), či australských norem Austroads.

Cílem praktické části bylo vyzkoušet na vzorcích z různých materiálů různé metody měření. Z porovnání výsledných hodnot modulu pružnosti a jeho grafické závislosti na svislém napětí pro jednotlivé metody je zřejmé, že metoda A, simulující napětí, vyvolávaná dopravním zatížením těsně pod vozovkou, je zcela nevhodná pro materiály, jako je recyklát směsný, jemnozrnná zemina a elektrárenský popílek. Tyto materiály nejsou totiž pro toto prostředí určené. Pro další zkoušení metodou A bych doporučovala doplnění cyklického triaxiálního přístroje o snímače radiálních přetvoření.

Dále je patrné, že použití metody B není vhodné při zjišťování modulu pružnosti plastických materiálů v aktivní zóně, vhledem k vysokým aplikovaným napětím. Naopak

vícestupňový postup, v normě uvedený pro měření trvalých deformací, se jeví v kombinaci s kondiciováním jako metoda vhodná pro určení modulu pružnosti technologických vrstev náspů. Především proto, že lépe charakterizuje napětí v aktivní zóně, kde již vlivem roznosu zatížení podkladními vrstvami vozovky jsou působící napětí menší. Toto je patrné i z grafického výstupu.

Nereálné výsledné hodnoty návrhového modulu pružnosti jemnozrnné zeminy jsou pravděpodobně způsobeny velkým zatížením nevhodným pro tento materiál či reakcí na velké výkyvy zatížení.

Pro získání lépe vypovídajících hodnot by bylo potřeba vyzkoušet více vzorků, jelikož ze statistického hlediska je zkoušení jednotlivých materiálu určitou metodou vždy jen po dvou vzorcích příliš málo. Bohužel cyklická triaxiální zkouška je velmi náročná na čas. Je to způsobeno nejen samotným zkoušením, které trvá 5 - 8 hodin, ale i poměrně náročnou přípravou zkušebních těles.

7. Seznam použité literatury

[1] ČSN EN 13286-7: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy, Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji, Český normalizační institut, Praha, 2005

[2] ELLIOTT, R. P. - DENNIS, N. D. - QIU, Y.: Permanent Deformation of Subgrade Soils, Department of Civil Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, 1998

[3] VARAUS, M.: Speciální problémy dopravních staveb I, Téma 1: Zeminy, zlepšené zeminy, zemní práce, *přednáška předmětu BM02*, VUT Brno FAST, 2011

[4] SALAJKA, V.: Pružnost a plasticita, *přednáška předmětu CD03*, VUT Brno FAST, 2010

[5] UTHUS, L.: Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates, *disertační práce*, NTNU, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, 2007

[6] PECHA, K: Cyklické triaxiální zkoušení a stanovení modulu pružnosti, *bakalářská práce*, VUT Brno FAST, 2009

[7] HORNYCH, P.: COST 337, Unbound Granular Materials for Road Pavements, Working Group 2A – Review of Tests, Test Procedures and Methologies of Study, *Final Report,* Laboratoire Central des Points et Chaussées, Nantes, France, 1998

[8] KYATHAM, V. - WILLIS, M.: Predictive Equations for Determination of Resilient Modulus, Rowan University, Glassboro

[9] STEHLÍK, D.: Stavební a demoliční odpad v konstrukci pozemních komunikací, *Časopis stavebnictví [online]*, duben 2008, Dostupné z <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=718>

[10] TP 94: Úprava zemin, *technické podmínky*, Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2009, Dostupné z <http://www.pjpk.cz/TP%2094.pdf>

[11] TP 93: Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů, *technické podmínky*, Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2003, Dostupné z <http://www.pjpk.cz/TP%2093.pdf>

[12] SEVERA, T. - FRÁNA, J.: Rekultivace a využití elektrárenských popílků, Dostupné z: <http://www.sevi.wz.cz/PUPN/popilek.pdf>

[13] KETCHART, K. - WU, J. T. H.: Performance Test for Geosynthetic, Reinforced Soil Including Effects of Preloading, Reinforced Soil Research Center, University of Colorado at Denver, 2001

[14] TUTUMLUER, E. - SEYHAN, Ü. – CHAN, J.: Characterization of Granular Materials Subjected to Complex Static and Dynamic Loadings, University of Illinois

[15] STEJSKALOVÁ, P.: Funkční zkoušení materiálů do vozovek pozemních komunikací, *diplomová práce*, VUT Brno FAST, 2006

[16] LEITNEROVÁ, H.: Funkční zkoušení zemin a materiálů pro pozemní komunikace, *diplomová práce*, VUT Brno FAST, 2005

[17] LEKARP, F. - ISACSSON, U. - DAWSON, A.: State of The Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, 2000

[18] PING, W. V. - XIONG, W. - YANG, Z.: Implementing Resilient Modulus Test for Design of Pavement Structures in Florida, *Final Report*, Department of Civil & Environmental Engineering, Florida A&M University, Tallahassee, 2003

[19] DURHAM, G. N. - MARR, W. A. - DEGROFF, W. L.: Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM International, West Conshohocken, 2003

PŘÍLOHA

VÝSLEDKY A GRAFY

1. Recyklát směsný – metoda B **P1**
2. Recyklát směsný – metoda B **P3**
3. Recyklát směsný – metoda A **P5**
4. Jemnozrnná zemina – metoda B **P7**
5. Jemnozrnná zemina – metoda B **P9**
6. Jemnozrnná zemina – metoda A **P11**
7. Jemnozrnná zemina – metoda A **P13**
8. Recyklát směsný – vlastní nastavení **P15**
9. Recyklát směsný – vlastní nastavení **P17**
10. Jemnozrnná zemina – vlastní nastavení **P19**
11. Jemnozrnná zemina – vlastní nastavení **P21**
12. Recyklát směsný – metoda A **P23**
13. Elektrárenský popílek – metoda B **P25**
14. Elektrárenský popílek – metoda B **P27**
15. Elektrárenský popílek – vlastní nastavení **P29**
16. Elektrárenský popílek – vlastní nastavení **P31**
17. Elektrárenský popílek – metoda A **P33**
18. Elektrárenský popílek – metoda A **P35**

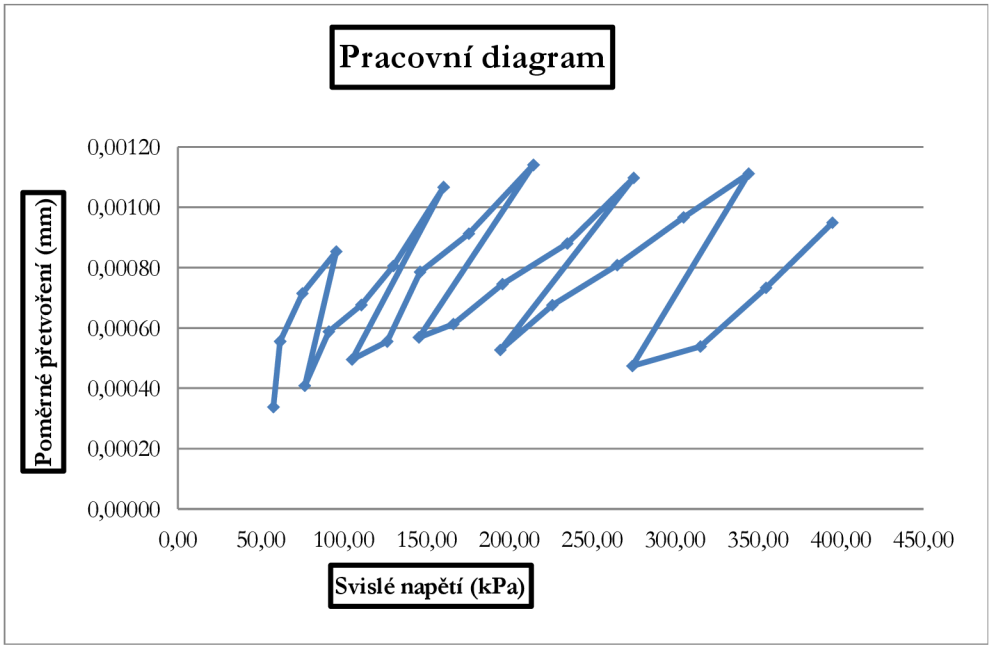
Cyklická triaxiální zkouška

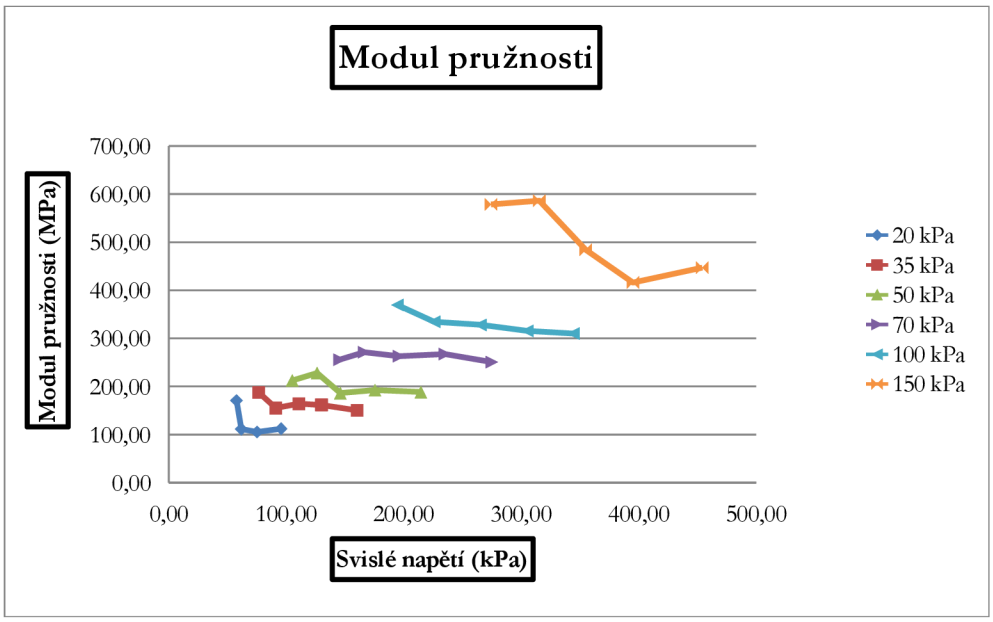
Vzorek číslo 1 **Vlhkost** 10%
Ozn. materiálu recyklát směsný 0/4 **Hmotnost vzorku** 3,124 kg
Metoda zkoušení B

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	31,78	25,91	57,69	0,0003	170,82
20,00	35,00	55,00	20,29	41,45	61,74	0,0006	111,25
20,00	50,00	70,00	19,64	55,50	75,14	0,0007	105,17
20,00	70,00	90,00	19,93	75,74	95,67	0,0009	112,14
35,00	35,00	70,00	34,28	42,30	76,58	0,0004	187,55
35,00	50,00	85,00	35,02	56,07	91,09	0,0006	155,05
35,00	70,00	105,00	34,95	75,86	110,81	0,0007	163,90
35,00	90,00	125,00	35,16	94,97	130,13	0,0008	161,58
35,00	120,00	155,00	35,06	125,35	160,41	0,0011	150,34
50,00	50,00	100,00	49,11	56,02	105,13	0,0005	212,23
50,00	70,00	120,00	50,09	76,28	126,36	0,0006	227,68
50,00	90,00	140,00	50,12	96,01	146,13	0,0008	186,01
50,00	120,00	170,00	49,98	125,64	175,63	0,0009	192,42
50,00	160,00	210,00	50,02	164,63	214,65	0,0011	188,22
70,00	70,00	140,00	69,13	76,34	145,47	0,0006	255,73
70,00	90,00	160,00	70,08	96,16	166,24	0,0006	271,42
70,00	120,00	190,00	69,91	126,00	195,92	0,0007	262,74
70,00	160,00	230,00	69,93	165,12	235,04	0,0009	267,17
70,00	200,00	270,00	70,06	205,02	275,08	0,0011	250,64
100,00	90,00	190,00	98,92	95,73	194,66	0,0005	369,43
100,00	120,00	220,00	100,18	125,82	226,00	0,0007	334,59
100,00	160,00	260,00	100,01	165,19	265,21	0,0008	328,08
100,00	200,00	300,00	100,03	205,16	305,19	0,0010	315,71
100,00	240,00	340,00	99,82	244,68	344,51	0,0011	309,91
150,00	120,00	270,00	148,56	125,79	274,35	0,0005	578,69
150,00	160,00	310,00	150,10	165,33	315,44	0,0005	586,23
150,00	200,00	350,00	149,97	205,03	355,00	0,0007	484,41
150,00	240,00	390,00	149,94	245,10	395,04	0,00	416,31
150,00	300,00	450,00	150,07	304,11	454,18	0,0010	447,18

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	1	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný 0/4	**Hmotnost vzorku**	3,124 kg
Metoda zkoušení	B		





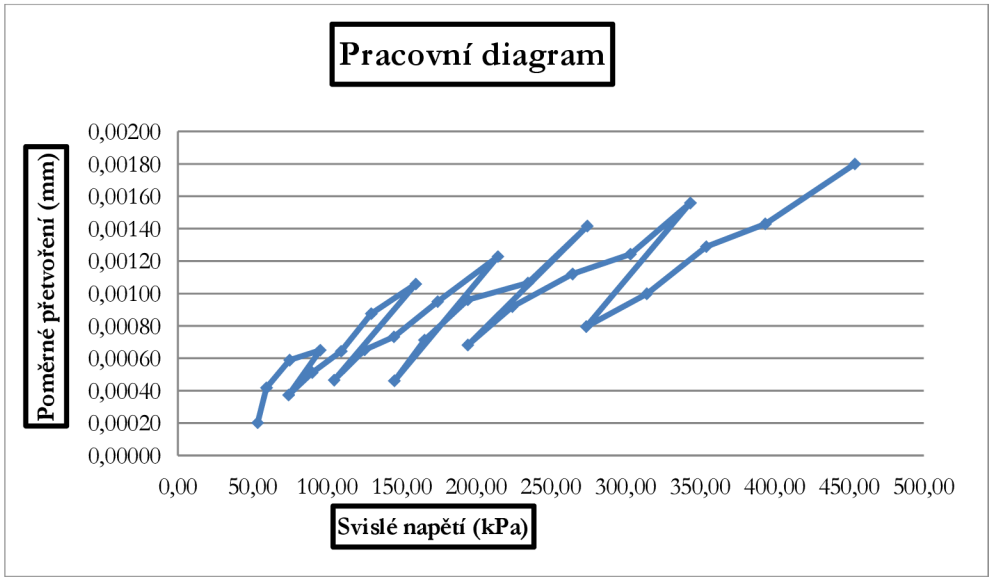
Cyklická triaxiální zkouška

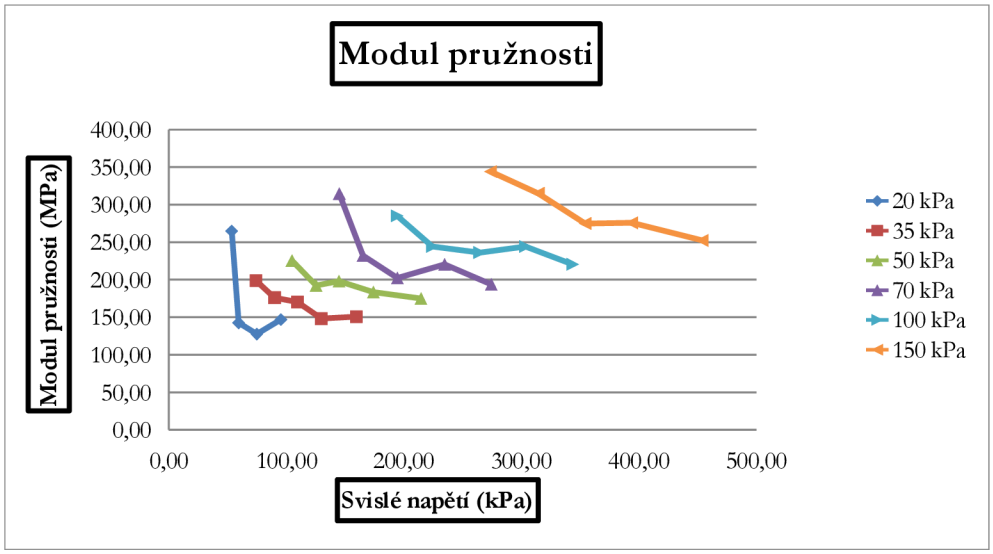
Vzorek číslo 2 **Vlhkost** 10%
Ozn. materiálu recyklát směsný **Hmotnost vzorku** 3,343 kg
Metoda zkoušení B

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**komorový tlak [kPa]**	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**poměrné přetvoření [-]**	**modul pružnosti [MPa]**
20,00	20,00	40,00	28,54	24,94	53,48	0,0002	264,85
20,00	35,00	55,00	19,77	39,64	59,41	0,0004	142,47
20,00	50,00	70,00	19,86	55,12	74,98	0,0006	127,45
20,00	70,00	90,00	20,10	75,32	95,42	0,0006	146,85
35,00	35,00	70,00	34,60	39,66	74,26	0,0004	198,83
35,00	50,00	85,00	35,18	54,84	90,02	0,0005	176,08
35,00	70,00	105,00	34,95	74,56	109,51	0,0006	170,35
35,00	90,00	125,00	35,10	94,62	129,72	0,0009	148,12
35,00	120,00	155,00	35,00	124,58	159,57	0,0011	150,83
50,00	50,00	100,00	49,49	55,28	104,78	0,0005	225,47
50,00	70,00	120,00	50,02	75,20	125,22	0,0007	192,28
50,00	90,00	140,00	50,17	94,72	144,89	0,0007	197,97
50,00	120,00	170,00	49,92	124,24	174,16	0,0009	183,37
50,00	160,00	210,00	50,19	164,41	214,61	0,0012	174,85
70,00	70,00	140,00	69,48	75,65	145,13	0,0005	314,61
70,00	90,00	160,00	69,87	95,49	165,35	0,0007	232,11
70,00	120,00	190,00	70,09	124,39	194,48	0,0010	202,28
70,00	160,00	230,00	69,98	164,76	234,73	0,0011	220,40
70,00	200,00	270,00	70,08	204,39	274,47	0,0014	193,83
100,00	90,00	190,00	99,24	95,08	194,32	0,0007	285,04
100,00	120,00	220,00	100,18	124,14	224,32	0,0009	244,26
100,00	160,00	260,00	99,97	164,62	264,59	0,0011	236,18
100,00	200,00	300,00	99,98	203,49	303,47	0,0012	244,15
100,00	240,00	340,00	100,02	243,64	343,66	0,0016	220,55
150,00	120,00	270,00	149,11	124,67	273,78	0,0008	344,06
150,00	160,00	310,00	149,86	164,60	314,46	0,0010	315,04
150,00	200,00	350,00	150,07	204,28	354,35	0,0013	275,00
150,00	240,00	390,00	150,05	243,90	393,95	0,0014	275,69
150,00	300,00	450,00	150,16	303,76	453,92	0,00	252,32

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	2	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný	**Hmotnost vzorku**	3,343 kg
Metoda zkoušení	B		





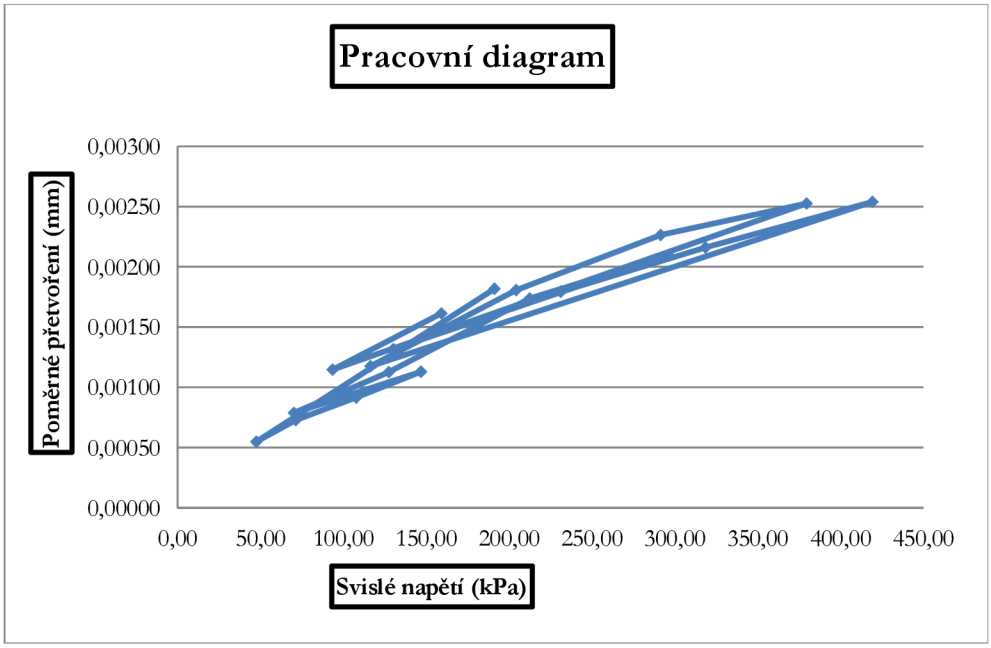
Cyklická triaxiální zkouška

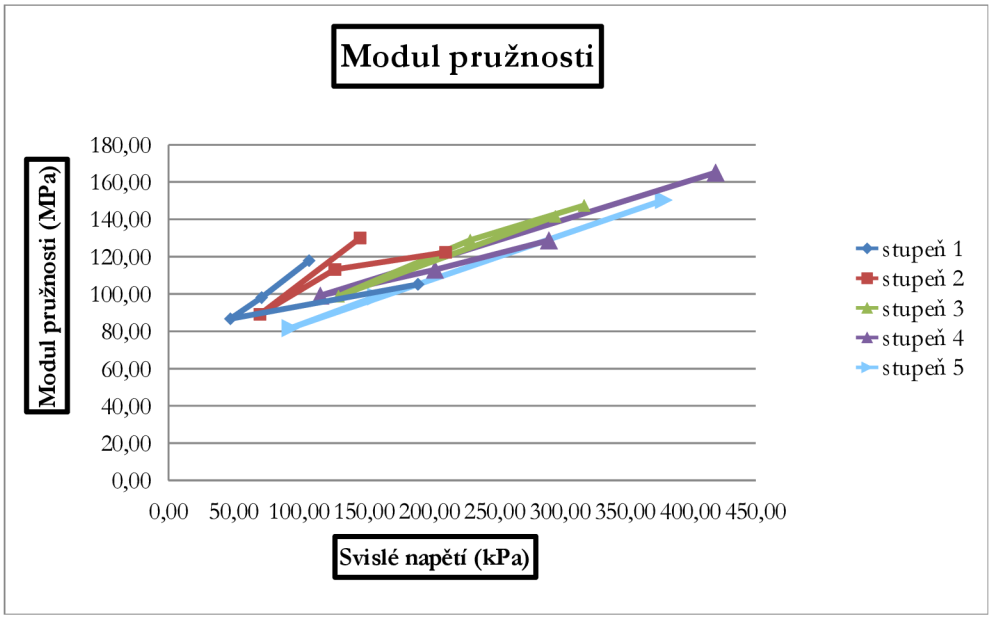
Vzorek číslo 3 **Vlhkost** 10%
Ozn. materiálu recyklát směsný 0/4 **Hmotnost vzorku** 3,075 kg
Metoda zkoušení A

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	36,41	154,84	191,24	0,0018	105,18
10,00	110,00	0,00	100,00	43,95	3,49	47,44	0,0005	86,63
10,00	185,00	0,00	175,00	65,14	6,18	71,32	0,0007	98,04
10,00	260,00	0,00	250,00	100,83	6,97	107,80	0,0009	117,84
10,00	60,00	30,00	80,00	137,14	9,71	146,84	0,0011	130,00
10,00	110,00	60,00	160,00	38,24	31,93	70,16	0,0008	89,13
10,00	185,00	105,00	280,00	63,30	64,15	127,44	0,0011	113,16
10,00	260,00	150,00	400,00	100,61	111,82	212,42	0,0017	122,33
10,00	60,00	75,00	125,00	137,24	159,22	296,46	0,0021	141,65
10,00	110,00	150,00	250,00	49,08	81,12	130,21	0,0013	98,89
10,00	160,00	225,00	375,00	73,02	158,16	231,18	0,0018	128,89
10,00	210,00	300,00	500,00	88,12	230,35	318,48	0,0022	147,48
10,00	35,00	75,00	100,00	112,21	307,06	419,27	0,0025	165,09
10,00	60,00	150,00	200,00	36,79	79,60	116,38	0,0012	99,13
10,00	85,00	225,00	300,00	48,45	155,80	204,26	0,0018	113,02
10,00	110,00	300,00	400,00	60,58	230,90	291,47	0,0023	128,72
10,00	20,00	60,00	70,00	73,18	306,34	379,52	0,0025	150,30
10,00	30,00	120,00	140,00	29,16	64,35	93,51	0,0011	81,62
10,00	35,00	150,00	175,00	33,93	125,19	159,12	0,0016	98,64

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	3	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný 0/4	**Hmotnost vzorku**	3,075 kg
Metoda zkoušení	A		





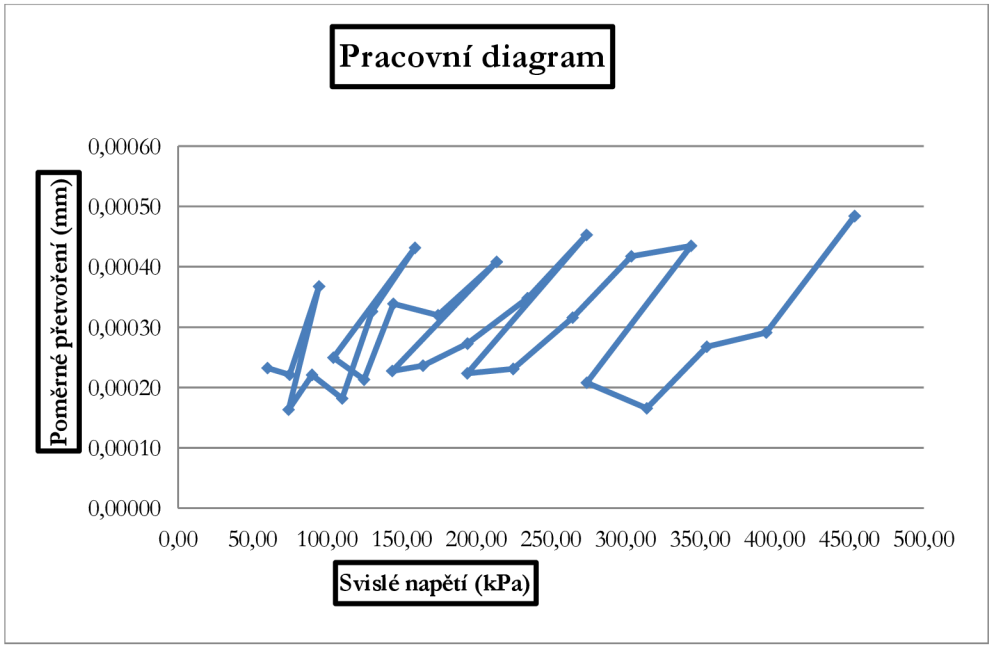
Cyklická triaxiální zkouška

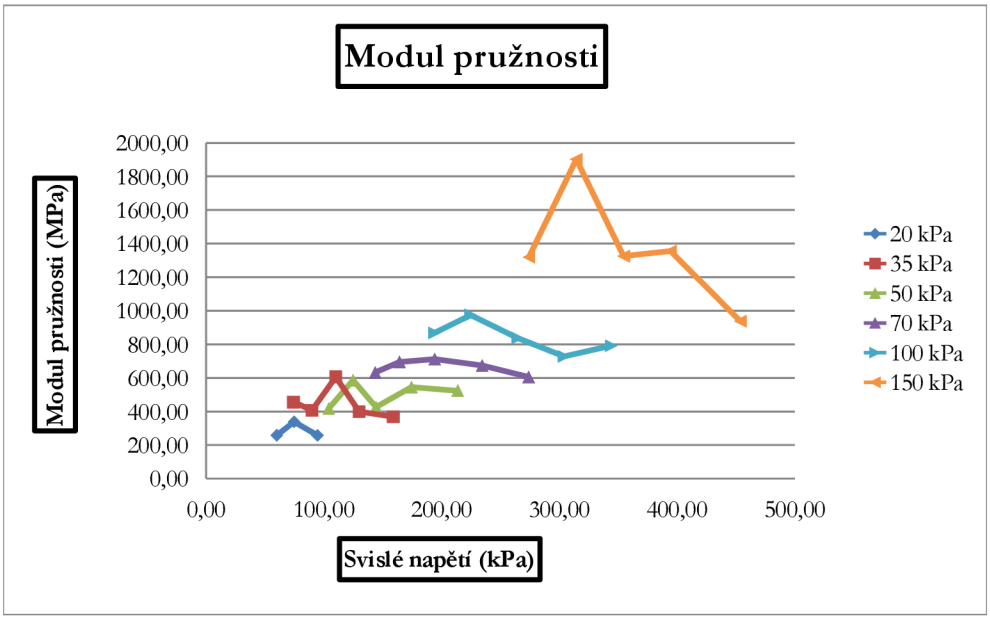
Vzorek číslo 4 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,300 kg
Metoda zkoušení B

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	32,62	20,62	53,24	0,0000	36265,96
20,00	35,00	55,00	20,12	39,89	60,00	0,0002	258,41
20,00	50,00	70,00	19,92	54,91	74,83	0,0002	338,39
20,00	70,00	90,00	19,96	74,66	94,62	0,0004	257,52
35,00	35,00	70,00	34,68	39,53	74,20	0,0002	455,51
35,00	50,00	85,00	34,83	55,10	89,93	0,0002	407,32
35,00	70,00	105,00	34,99	75,08	110,07	0,0002	606,39
35,00	90,00	125,00	35,18	94,90	130,08	0,0003	399,03
35,00	120,00	155,00	34,93	124,08	159,00	0,0004	368,61
50,00	50,00	100,00	49,57	54,62	104,19	0,0002	418,02
50,00	70,00	120,00	50,04	74,77	124,81	0,0002	586,22
50,00	90,00	140,00	50,31	94,12	144,43	0,0003	426,62
50,00	120,00	170,00	50,03	124,37	174,40	0,0003	545,37
50,00	160,00	210,00	49,84	163,92	213,76	0,0004	524,02
70,00	70,00	140,00	69,70	73,96	143,66	0,0002	632,11
70,00	90,00	160,00	70,00	94,27	164,26	0,0002	695,61
70,00	120,00	190,00	70,06	124,08	194,14	0,0003	712,13
70,00	160,00	230,00	69,99	164,45	234,44	0,0003	673,56
70,00	200,00	270,00	69,96	204,06	274,02	0,0005	605,01
100,00	90,00	190,00	99,34	94,62	193,96	0,0002	868,52
100,00	120,00	220,00	100,06	124,77	224,82	0,0002	975,24
100,00	160,00	260,00	100,18	164,45	264,62	0,0003	838,15
100,00	200,00	300,00	100,08	203,98	304,05	0,0004	728,44
100,00	240,00	340,00	99,87	244,25	344,12	0,0004	791,87
150,00	120,00	270,00	148,96	125,22	274,19	0,0002	1319,46
150,00	160,00	310,00	150,04	164,29	314,33	0,0002	1901,85
150,00	200,00	350,00	150,21	204,41	354,62	0,0003	1325,10
150,00	240,00	390,00	150,03	244,43	394,45	0,0003	1355,79
150,00	300,00	450,00	149,97	303,80	453,77	0,0005	937,66

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	4	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,300 kg
Metoda zkoušení	B		





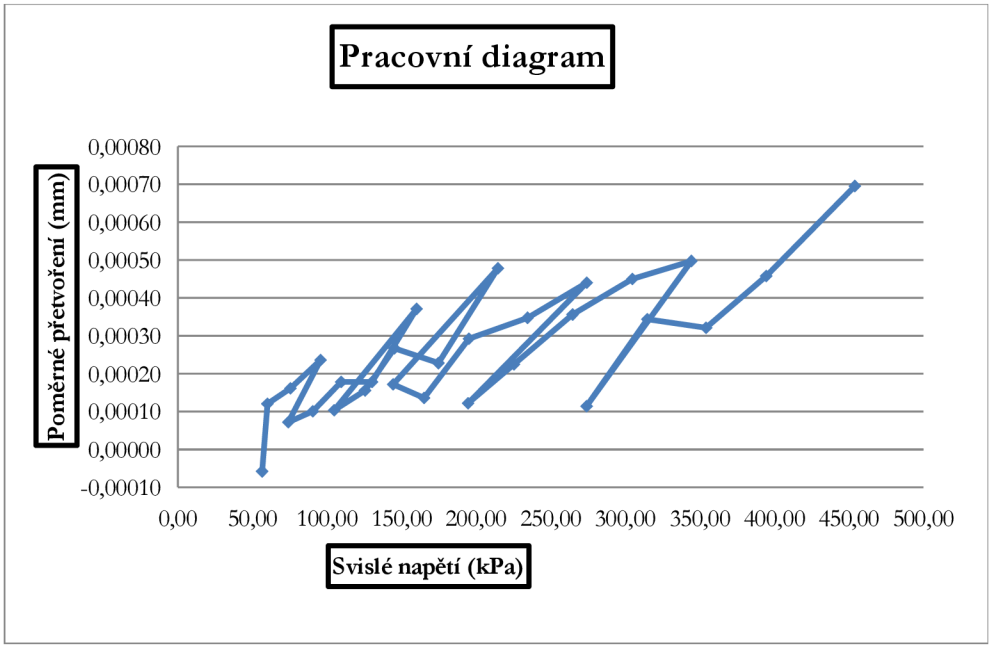
Cyklická triaxiální zkouška

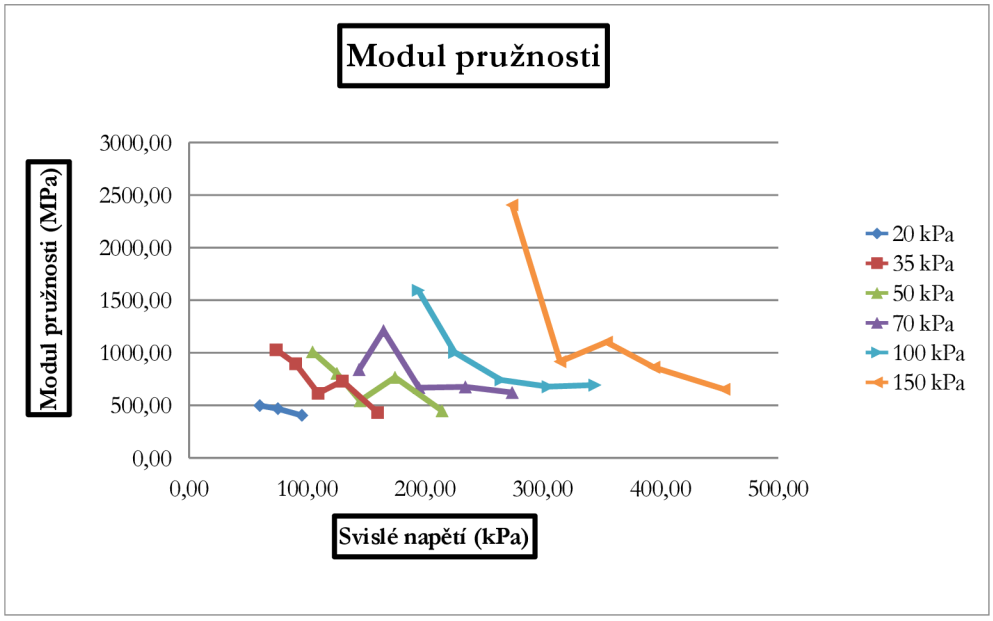
Vzorek číslo 5 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,149 kg
Metoda zkoušení B

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	36,29	20,09	56,39	-0,0001	-976,46
20,00	35,00	55,00	19,78	40,21	60,00	0,0001	497,66
20,00	50,00	70,00	19,90	55,58	75,48	0,0002	468,05
20,00	70,00	90,00	20,26	75,46	95,72	0,0002	405,47
35,00	35,00	70,00	33,93	40,05	73,98	0,0001	1028,40
35,00	50,00	85,00	35,30	55,10	90,40	0,0001	895,57
35,00	70,00	105,00	34,76	74,76	109,52	0,0002	614,16
35,00	90,00	125,00	35,05	95,05	130,09	0,0002	730,19
35,00	120,00	155,00	35,22	124,88	160,10	0,0004	431,56
50,00	50,00	100,00	49,34	55,39	104,73	0,0001	1008,25
50,00	70,00	120,00	50,07	75,40	125,47	0,0002	805,45
50,00	90,00	140,00	49,87	95,26	145,13	0,0003	542,92
50,00	120,00	170,00	50,16	124,50	174,67	0,0002	765,77
50,00	160,00	210,00	49,80	164,87	214,68	0,0005	448,52
70,00	70,00	140,00	69,52	74,79	144,31	0,0002	838,73
70,00	90,00	160,00	69,93	95,10	165,03	0,0001	1210,52
70,00	120,00	190,00	70,11	125,02	195,13	0,0003	667,57
70,00	160,00	230,00	70,10	164,30	234,41	0,0003	674,03
70,00	200,00	270,00	69,81	204,44	274,25	0,0004	622,85
100,00	90,00	190,00	99,24	95,33	194,57	0,0001	1593,00
100,00	120,00	220,00	100,07	125,29	225,36	0,0002	1001,82
100,00	160,00	260,00	99,81	164,83	264,64	0,0004	742,79
100,00	200,00	300,00	100,22	204,55	304,77	0,0005	676,92
100,00	240,00	340,00	99,83	244,51	344,35	0,0005	692,02
150,00	120,00	270,00	148,81	125,28	274,09	0,0001	2404,62
150,00	160,00	310,00	149,92	164,92	314,84	0,0003	915,36
150,00	200,00	350,00	150,02	204,23	354,25	0,0003	1101,81
150,00	240,00	390,00	150,15	244,38	394,53	0,0005	861,51
150,00	300,00	450,00	149,99	303,98	453,97	0,0007	652,70

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	5	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,149 kg
Metoda zkoušení	B		





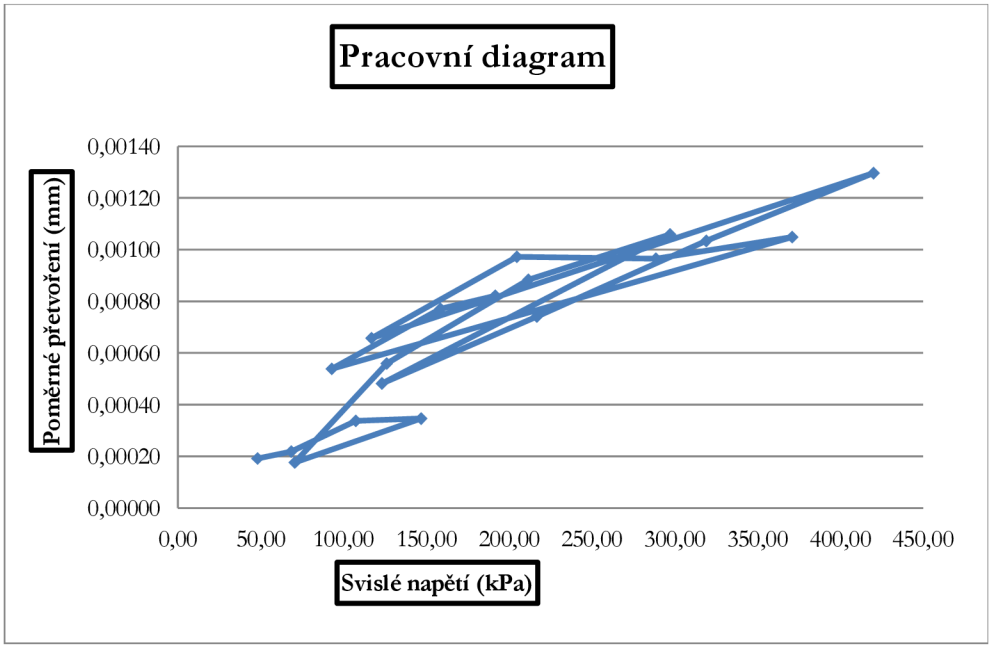
Cyklická triaxiální zkouška

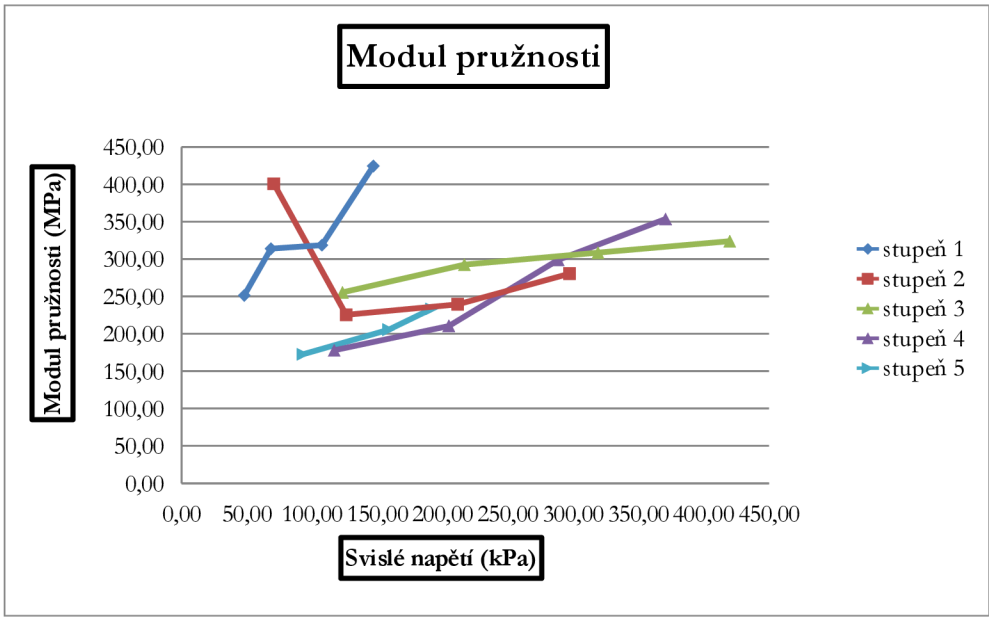
Vzorek číslo 6 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,004 kg
Metoda zkoušení A

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	43,76	4,34	48,10	0,0002	251,35
10,00	110,00	0,00	100,00	64,06	4,43	68,48	0,0002	313,81
10,00	185,00	0,00	175,00	99,69	7,77	107,46	0,0003	318,54
10,00	260,00	0,00	250,00	137,15	9,74	146,89	0,0003	424,53
10,00	60,00	30,00	80,00	38,74	31,87	70,61	0,0002	400,74
10,00	110,00	60,00	160,00	62,99	63,09	126,08	0,0006	225,52
10,00	185,00	105,00	280,00	100,23	111,35	211,58	0,0009	239,43
10,00	260,00	150,00	400,00	137,54	159,57	297,12	0,0011	280,53
10,00	60,00	75,00	125,00	43,23	79,93	123,16	0,0005	255,52
10,00	110,00	150,00	250,00	63,52	153,18	216,70	0,0007	292,57
10,00	160,00	225,00	375,00	88,02	230,99	319,01	0,0010	308,61
10,00	210,00	300,00	500,00	112,48	307,52	420,01	0,0013	324,09
10,00	35,00	75,00	100,00	37,30	79,61	116,91	0,0007	177,99
10,00	60,00	150,00	200,00	49,34	155,37	204,71	0,0010	210,58
10,00	85,00	225,00	300,00	57,44	231,13	288,58	0,0010	299,11
10,00	110,00	300,00	400,00	64,20	306,60	370,81	0,0010	353,58
10,00	20,00	60,00	70,00	29,99	62,97	92,96	0,0005	172,62
10,00	30,00	120,00	140,00	34,68	123,86	158,54	0,0008	205,58
10,00	35,00	150,00	175,00	37,15	154,43	191,58	0,0008	233,32

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	6	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,004 kg
Metoda zkoušení	A		





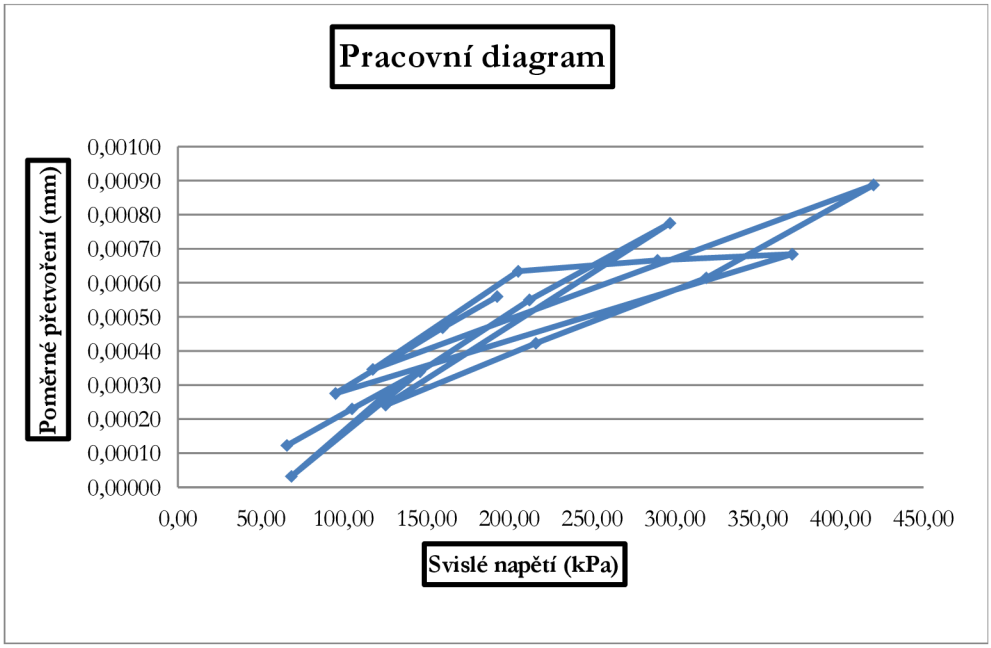
Cyklická triaxiální zkouška

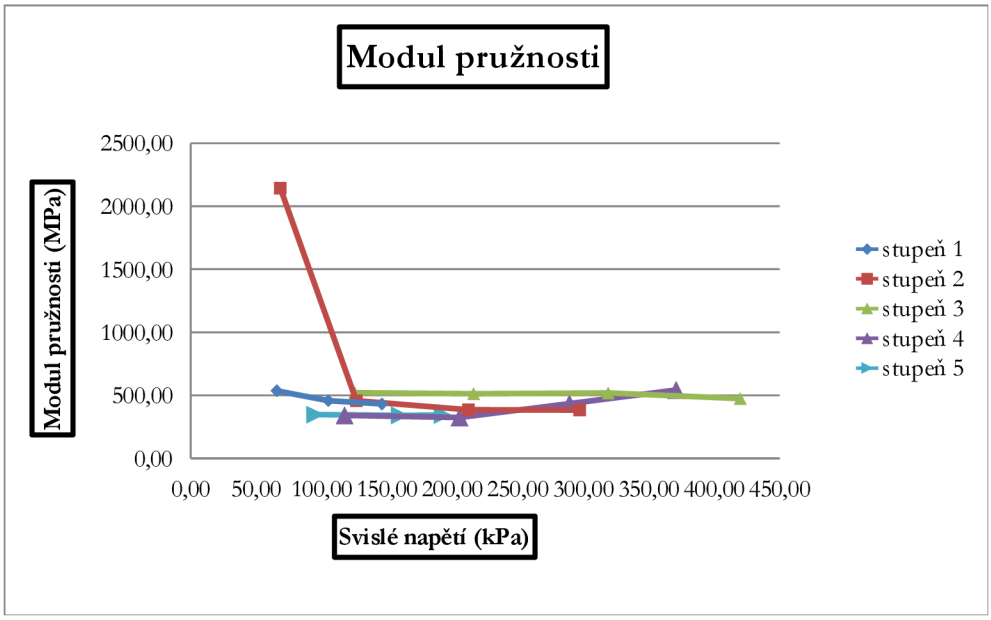
Vzorek číslo 7 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,355 kg
Metoda zkoušení A

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	37,38	2,07	39,45	-0,0001	-618,89
10,00	110,00	0,00	100,00	62,69	3,11	65,80	0,0001	536,39
10,00	185,00	0,00	175,00	99,56	5,58	105,14	0,0002	456,97
10,00	260,00	0,00	250,00	136,92	9,21	146,13	0,0003	430,66
10,00	60,00	30,00	80,00	37,62	30,86	68,48	0,0000	2143,98
10,00	110,00	60,00	160,00	62,83	63,77	126,60	0,0003	456,99
10,00	185,00	105,00	280,00	100,12	112,03	212,15	0,0005	385,87
10,00	260,00	150,00	400,00	137,35	159,76	297,10	0,0008	383,29
10,00	60,00	75,00	125,00	44,20	81,19	125,39	0,0002	520,10
10,00	110,00	150,00	250,00	63,19	152,96	216,15	0,0004	511,23
10,00	160,00	225,00	375,00	87,97	230,97	318,94	0,0006	518,90
10,00	210,00	300,00	500,00	112,35	307,62	419,97	0,0009	473,38
10,00	35,00	75,00	100,00	37,52	80,11	117,62	0,0003	339,99
10,00	60,00	150,00	200,00	49,88	155,53	205,40	0,0006	324,16
10,00	85,00	225,00	300,00	58,28	231,18	289,46	0,0007	434,47
10,00	110,00	300,00	400,00	64,52	306,39	370,91	0,0007	542,54
10,00	20,00	60,00	70,00	30,54	64,64	95,19	0,0003	345,90
10,00	30,00	120,00	140,00	34,77	125,05	159,82	0,0005	341,35
10,00	35,00	150,00	175,00	37,68	154,99	192,67	0,0006	344,15

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	7	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,355 kg
Metoda zkoušení	A		





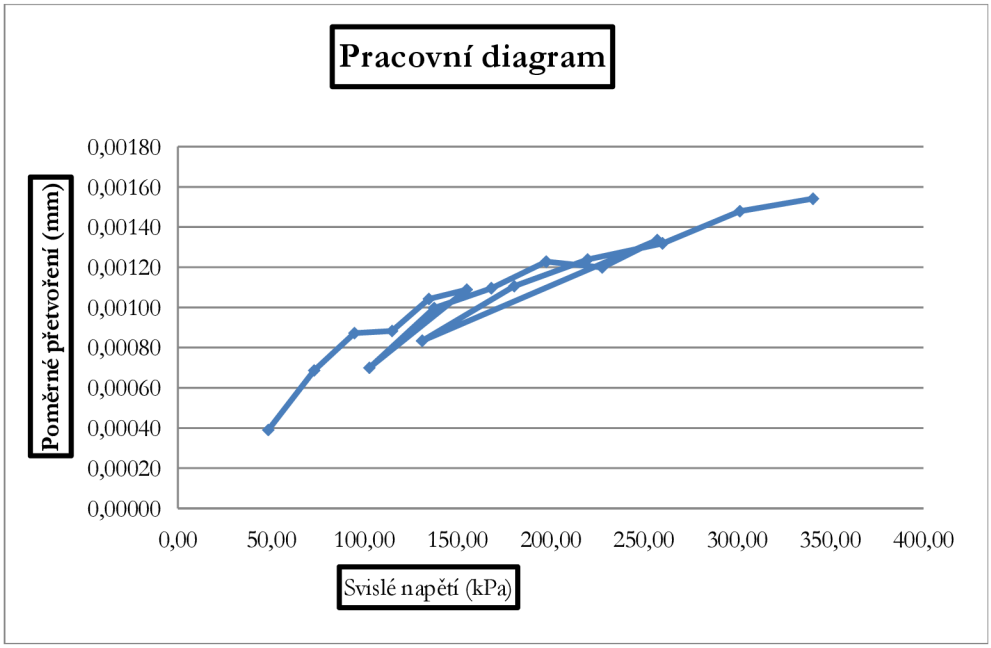
Cyklická triaxiální zkouška

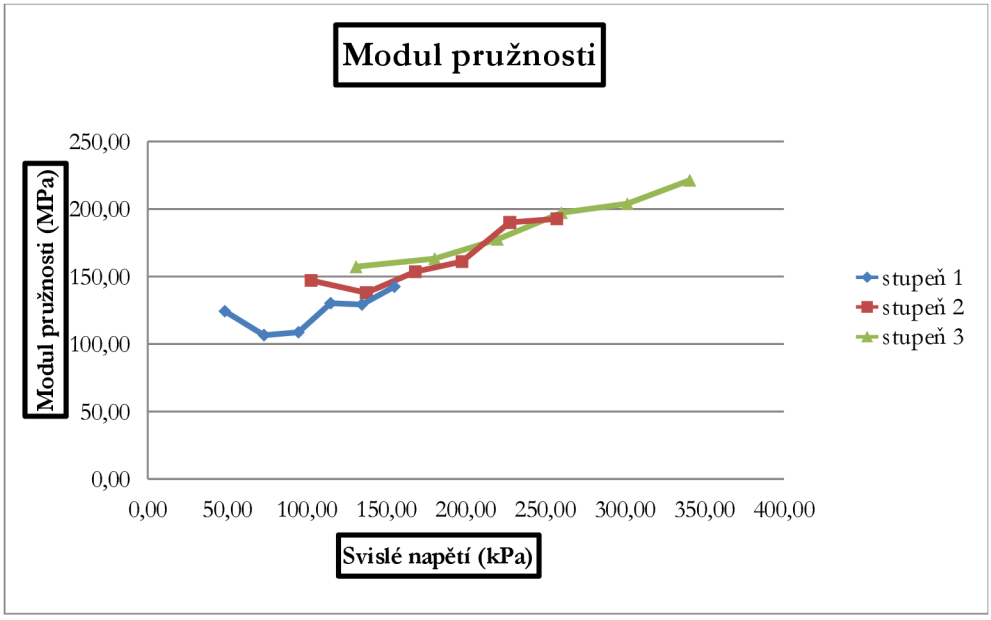
Vzorek číslo 8 **Vlhkost** 10%
Ozn. materiálu recyklát směsný 0/4 **Hmotnost vzorku** 3,080 kg
Metoda zkoušení vlastní nastavení

vlastní nastavení				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	20,00	20,00	30,00	24,10	24,38	48,48	0,0004	124,31
10,00	20,00	40,00	50,00	28,81	44,30	73,11	0,0007	106,58
10,00	20,00	60,00	70,00	30,20	64,55	94,75	0,0009	108,69
10,00	20,00	80,00	90,00	30,06	84,88	114,94	0,0009	130,18
10,00	20,00	100,00	110,00	29,77	104,90	134,67	0,0010	129,27
10,00	20,00	120,00	130,00	29,80	125,24	155,04	0,0011	142,44
10,00	45,00	60,00	95,00	37,69	65,03	102,73	0,0007	146,97
10,00	45,00	90,00	125,00	42,42	95,05	137,47	0,0010	137,95
10,00	45,00	120,00	155,00	42,45	125,69	168,14	0,0011	153,49
10,00	45,00	150,00	185,00	42,38	155,21	197,59	0,0012	161,02
10,00	45,00	180,00	215,00	42,32	185,34	227,66	0,0012	190,01
10,00	45,00	210,00	245,00	42,12	215,12	257,24	0,0013	192,74
10,00	70,00	80,00	140,00	46,41	84,63	131,04	0,0008	157,17
10,00	70,00	120,00	180,00	53,91	126,58	180,49	0,0011	163,24
10,00	70,00	160,00	220,00	53,52	166,32	219,85	0,0012	177,51
10,00	70,00	200,00	260,00	54,58	205,49	260,07	0,0013	197,28
10,00	70,00	240,00	300,00	54,91	246,58	301,49	0,0015	203,90
10,00	70,00	280,00	230,00	54,77	286,04	340,81	0,0015	221,25

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	8	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný 0/4	**Hmotnost vzorku**	3,080 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





Cyklická triaxiální zkouška

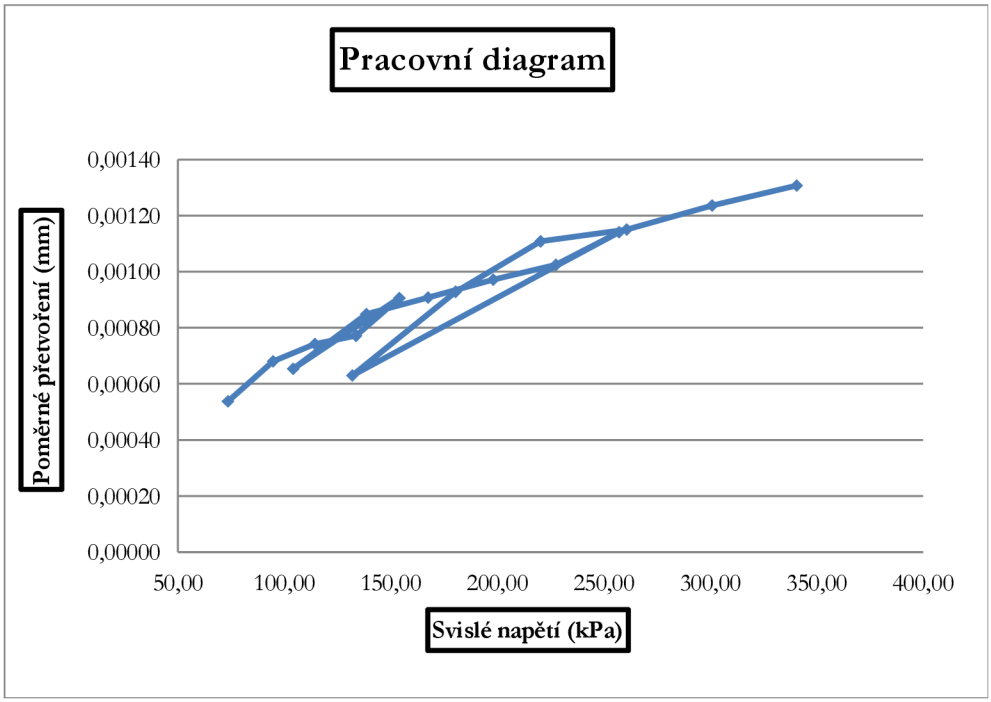
Vzorek číslo 9
Ozn. materiálu recyklát směsný 0/4
Metoda zkoušení vlastní nastavení

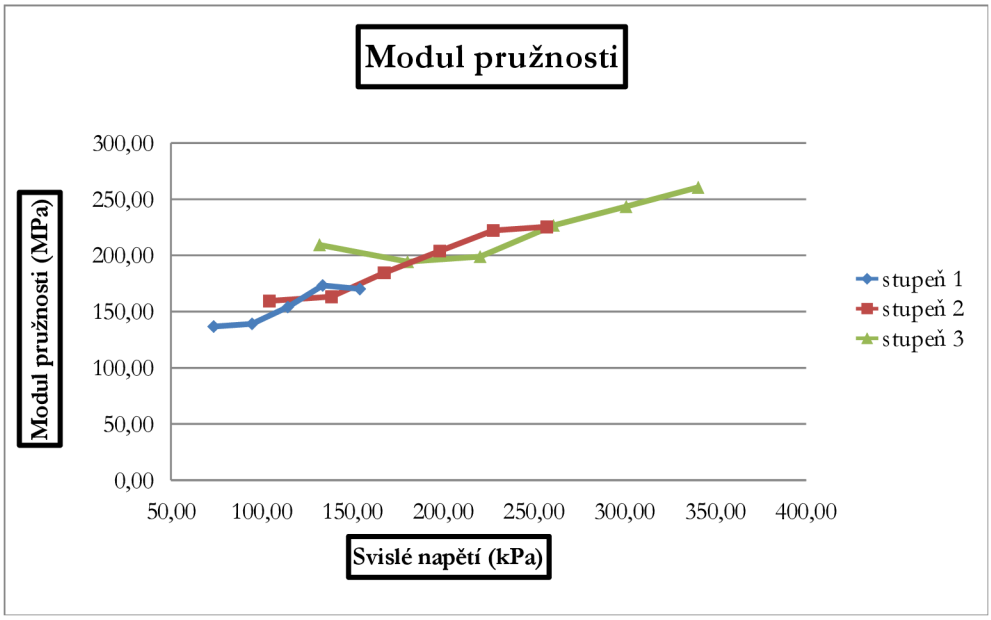
Vlhkost 10%
Hmotnost vzorku 3,144 kg

vlastní nastavení				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	20,00	20,00	30,00	24,46	23,30	47,76	0,0001	410,21
10,00	20,00	40,00	50,00	29,13	44,39	73,52	0,0005	136,66
10,00	20,00	60,00	70,00	30,07	64,63	94,70	0,0007	139,13
10,00	20,00	80,00	90,00	30,02	84,32	114,34	0,0007	154,09
10,00	20,00	100,00	110,00	29,64	104,02	133,66	0,0008	173,27
10,00	20,00	120,00	130,00	29,72	124,33	154,05	0,0009	170,07
10,00	45,00	60,00	95,00	38,42	65,75	104,17	0,0007	159,41
10,00	45,00	90,00	125,00	42,44	96,08	138,52	0,0008	163,17
10,00	45,00	120,00	155,00	42,16	125,34	167,50	0,0009	184,52
10,00	45,00	150,00	185,00	42,44	155,69	198,13	0,0010	203,87
10,00	45,00	180,00	215,00	42,32	185,25	227,57	0,0010	222,16
10,00	45,00	210,00	245,00	42,10	215,06	257,16	0,0011	225,39
10,00	70,00	80,00	140,00	46,83	85,07	131,90	0,0006	209,42
10,00	70,00	120,00	180,00	54,39	126,01	180,40	0,0009	194,40
10,00	70,00	160,00	220,00	54,34	166,00	220,34	0,0011	198,82
10,00	70,00	200,00	260,00	54,76	206,00	260,76	0,0012	226,63
10,00	70,00	240,00	300,00	54,58	246,28	300,87	0,0012	243,41
10,00	70,00	280,00	230,00	54,55	286,02	340,58	0,0013	260,50

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	9	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný 0/4	**Hmotnost vzorku**	3,144 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





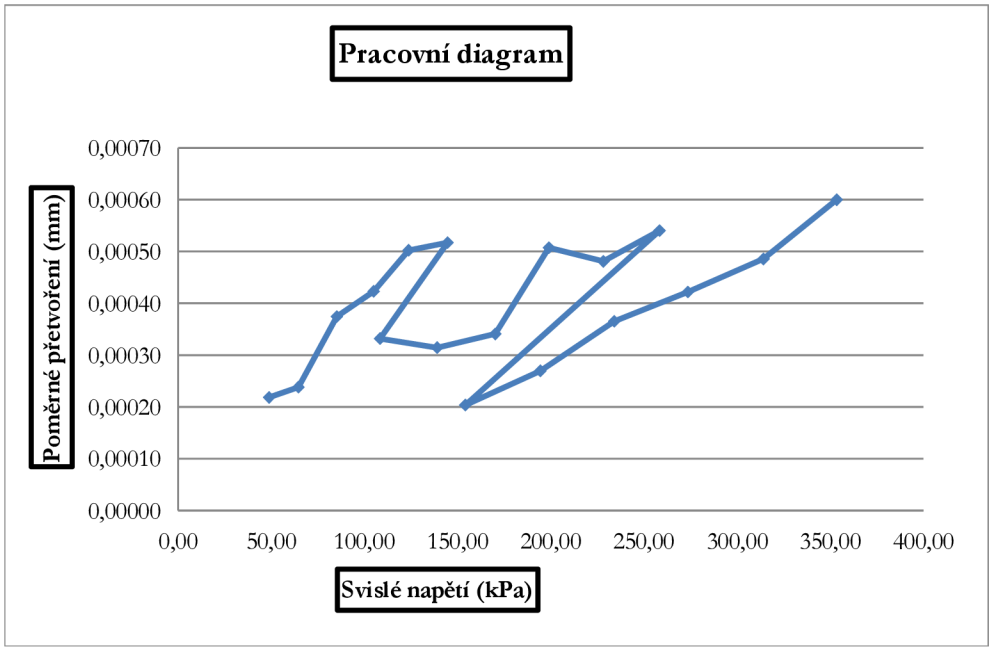
Cyklická triaxiální zkouška

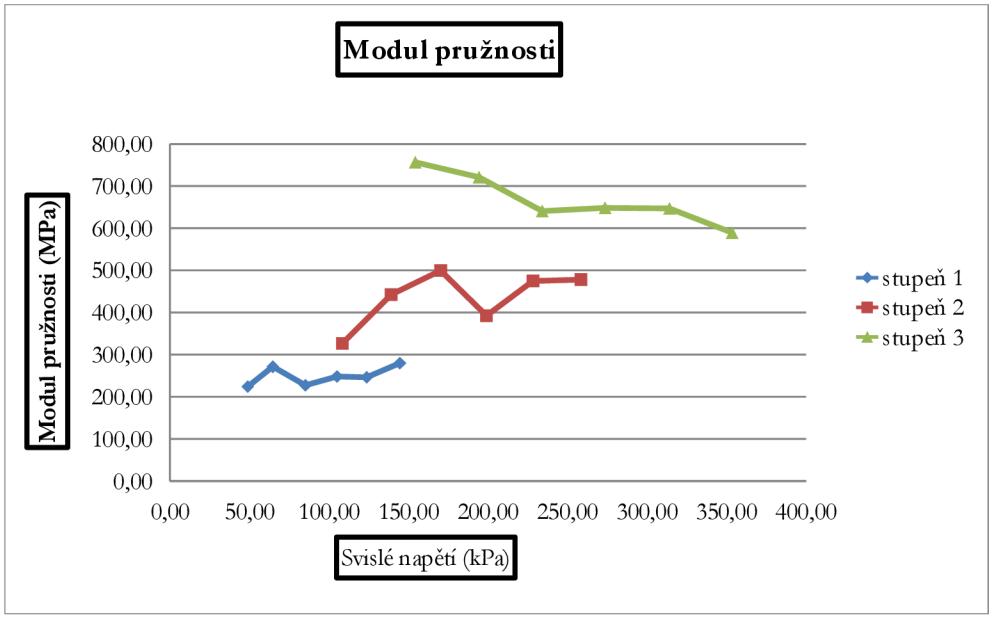
Vzorek číslo 10 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,252 kg
Metoda zkoušení vlastní nastavení

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	24,31	24,63	48,94	0,0002	224,15
20,00	40,00	60,00	19,94	44,68	64,62	0,0002	271,28
20,00	60,00	80,00	20,14	65,07	85,21	0,0004	227,57
20,00	80,00	100,00	20,19	84,83	105,02	0,0004	248,26
20,00	100,00	120,00	19,87	103,90	123,77	0,0005	246,36
20,00	120,00	140,00	20,20	124,40	144,60	0,0005	279,66
45,00	60,00	105,00	44,40	64,06	108,47	0,0003	326,82
45,00	90,00	135,00	45,14	93,97	139,11	0,0003	442,39
45,00	120,00	165,00	44,93	125,32	170,25	0,0003	499,53
45,00	150,00	195,00	45,20	153,89	199,08	0,0005	392,35
45,00	180,00	225,00	45,06	183,23	228,29	0,0005	474,75
45,00	210,00	255,00	44,88	213,51	258,39	0,0005	478,19
70,00	80,00	150,00	69,67	84,51	154,18	0,0002	756,62
70,00	120,00	190,00	70,21	124,18	194,39	0,0003	721,14
70,00	160,00	230,00	70,05	164,06	234,11	0,0004	640,83
70,00	200,00	270,00	70,08	203,53	273,60	0,0004	648,42
70,00	240,00	310,00	70,13	244,01	314,14	0,0005	646,96
70,00	280,00	350,00	70,17	283,28	353,44	0,0006	589,23

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	10	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,252 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





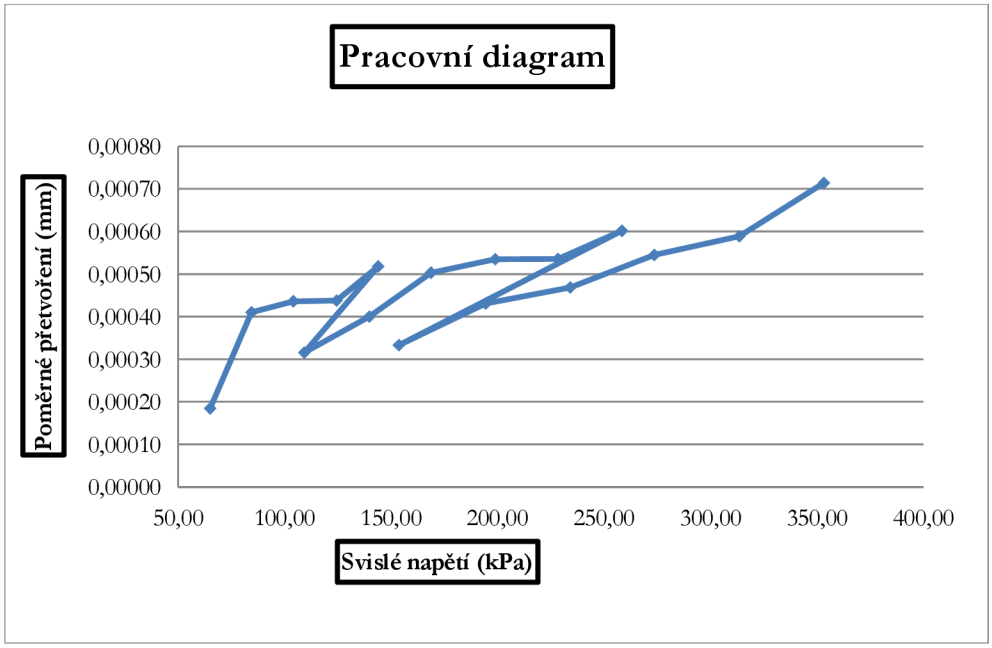
Cyklická triaxiální zkouška

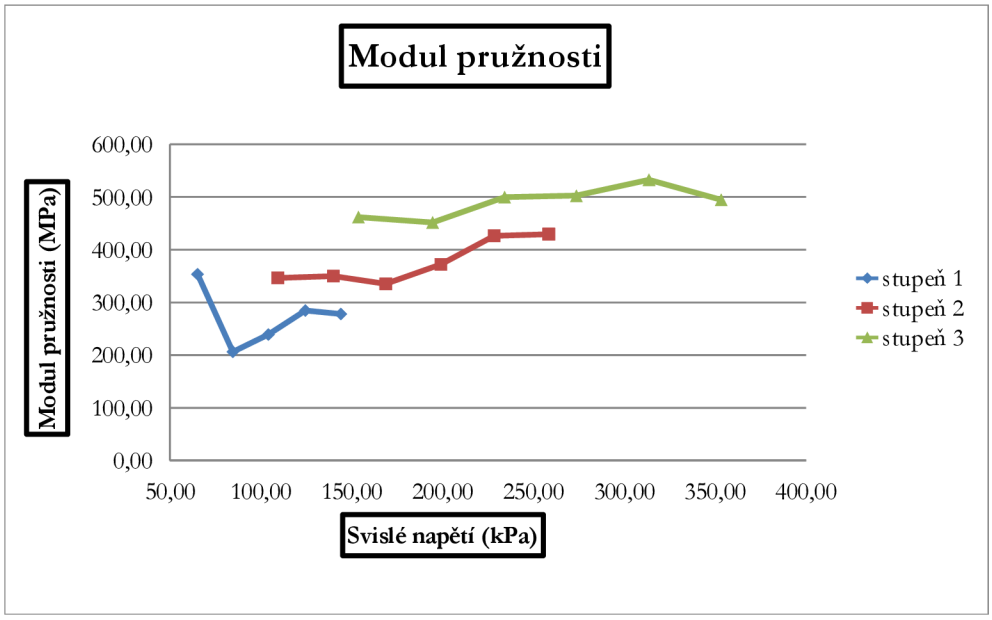
Vzorek číslo 11 **Vlhkost** 15%
Ozn. materiálu jemnozrnná zemina F6CI **Hmotnost vzorku** 3,199 kg
Metoda zkoušení vlastní nastavení

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	24,02	21,69	45,71	0,0000	1736,85
20,00	40,00	60,00	19,99	45,14	65,12	0,0002	353,43
20,00	60,00	80,00	20,20	64,37	84,57	0,0004	206,29
20,00	80,00	100,00	20,06	84,12	104,18	0,0004	238,96
20,00	100,00	120,00	19,95	104,56	124,51	0,0004	284,56
20,00	120,00	140,00	20,09	123,94	144,03	0,0005	278,12
45,00	60,00	105,00	44,47	64,83	109,29	0,0003	346,63
45,00	90,00	135,00	45,07	94,85	139,92	0,0004	349,93
45,00	120,00	165,00	44,92	123,81	168,74	0,0005	335,38
45,00	150,00	195,00	45,09	153,93	199,03	0,0005	372,21
45,00	180,00	225,00	45,03	183,41	228,44	0,0005	426,63
45,00	210,00	255,00	44,93	213,55	258,48	0,0006	429,67
70,00	80,00	150,00	69,60	84,13	153,72	0,0003	461,70
70,00	120,00	190,00	70,13	124,39	194,52	0,0004	451,73
70,00	160,00	230,00	69,91	164,28	234,19	0,0005	499,83
70,00	200,00	270,00	70,07	203,61	273,68	0,0005	502,54
70,00	240,00	310,00	70,04	243,59	313,63	0,0006	532,61
70,00	280,00	350,00	70,06	283,23	353,30	0,0007	494,82

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	11	**Vlhkost**	15%
Ozn. materiálu	jemnozrnná zemina F6CI	**Hmotnost vzorku**	3,199 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





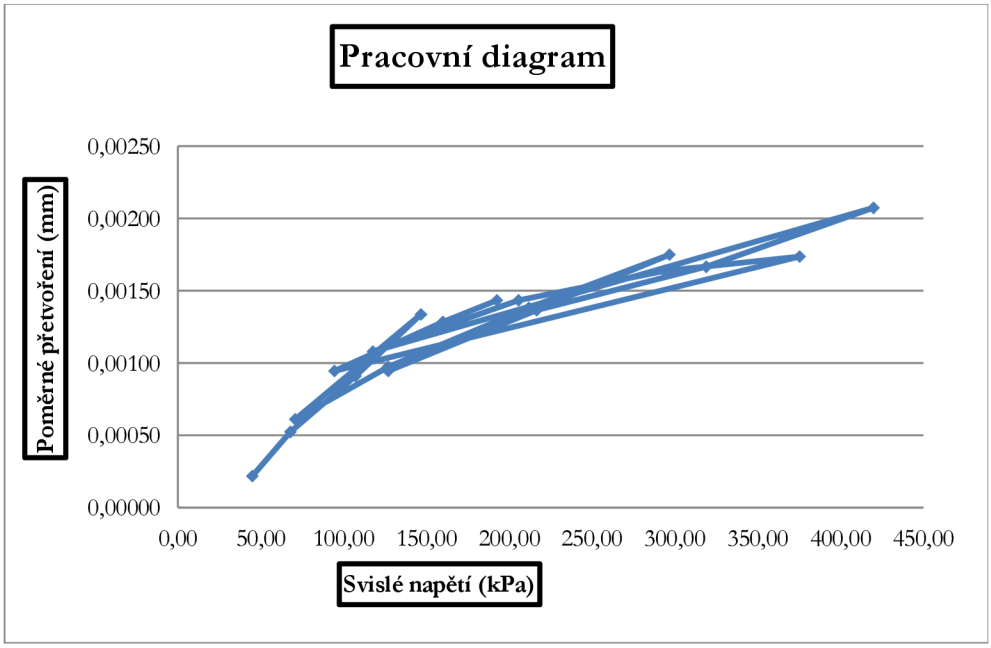
Cyklická triaxiální zkouška

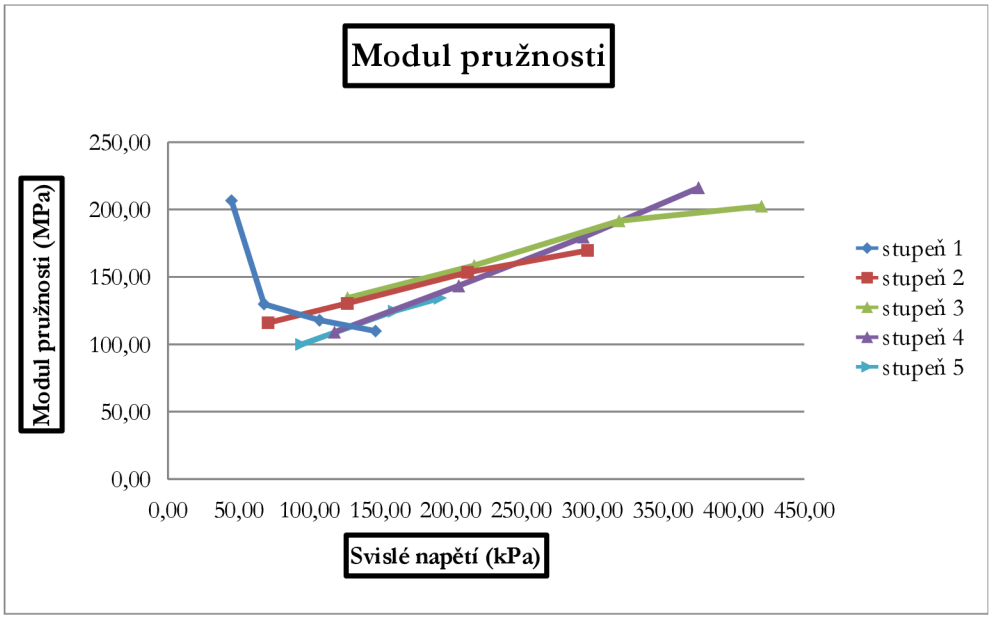
Vzorek číslo 12 **Vlhkost** 10%
Ozn. materiálu recyklát směsný 0/4 **Hmotnost vzorku** 3,197 kg
Metoda zkoušení A

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	40,83	4,11	44,94	0,0002	206,62
10,00	110,00	0,00	100,00	64,02	3,92	67,94	0,0005	129,91
10,00	185,00	0,00	175,00	100,40	6,74	107,14	0,0009	117,87
10,00	260,00	0,00	250,00	137,15	9,58	146,73	0,0013	109,80
10,00	60,00	30,00	80,00	38,70	32,09	70,80	0,0006	115,98
10,00	110,00	60,00	160,00	63,59	63,20	126,79	0,0010	130,32
10,00	185,00	105,00	280,00	99,97	111,88	211,85	0,0014	153,37
10,00	260,00	150,00	400,00	137,32	159,42	296,75	0,0017	169,61
10,00	60,00	75,00	125,00	45,65	81,31	126,96	0,0009	134,46
10,00	110,00	150,00	250,00	63,34	153,24	216,58	0,0014	158,54
10,00	160,00	225,00	375,00	87,67	231,29	318,96	0,0017	191,51
10,00	210,00	300,00	500,00	112,30	307,54	419,84	0,0021	202,52
10,00	35,00	75,00	100,00	37,44	80,21	117,65	0,0011	109,03
10,00	60,00	150,00	200,00	49,82	155,81	205,63	0,0014	143,39
10,00	85,00	225,00	300,00	61,31	232,40	293,71	0,0016	179,46
10,00	110,00	300,00	400,00	68,38	306,84	375,23	0,0017	216,19
10,00	20,00	60,00	70,00	30,16	64,29	94,45	0,0009	99,96
10,00	30,00	120,00	140,00	34,46	125,50	159,96	0,0013	124,61
10,00	35,00	150,00	175,00	37,21	155,33	192,54	0,0014	134,28

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	12	**Vlhkost**	10%
Ozn. materiálu	recyklát směsný 0/4	**Hmotnost vzorku**	3,197 kg
Metoda zkoušení	A		





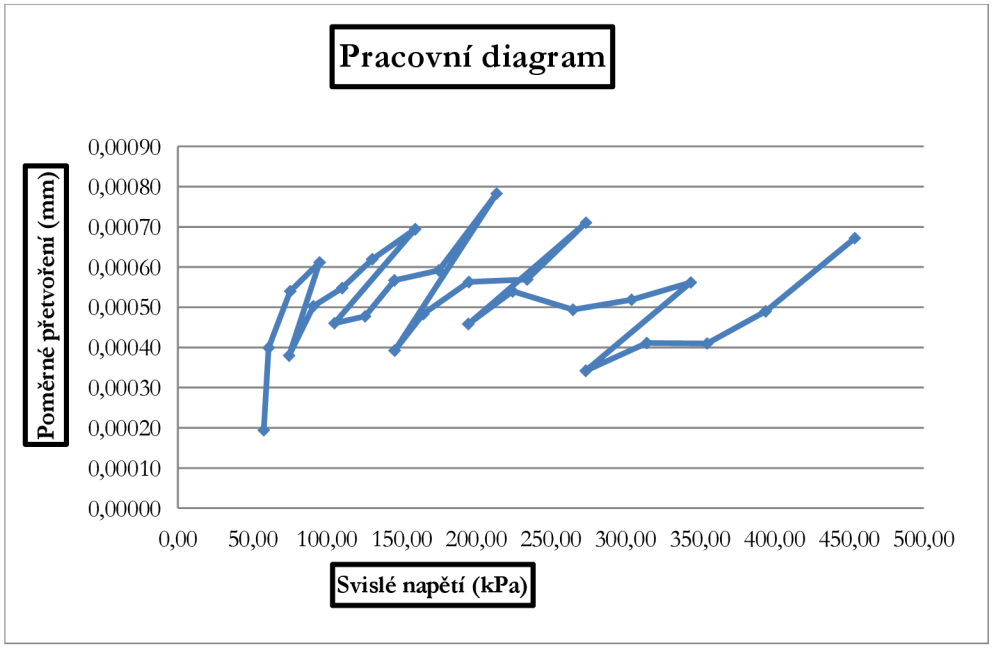
Cyklická triaxiální zkouška

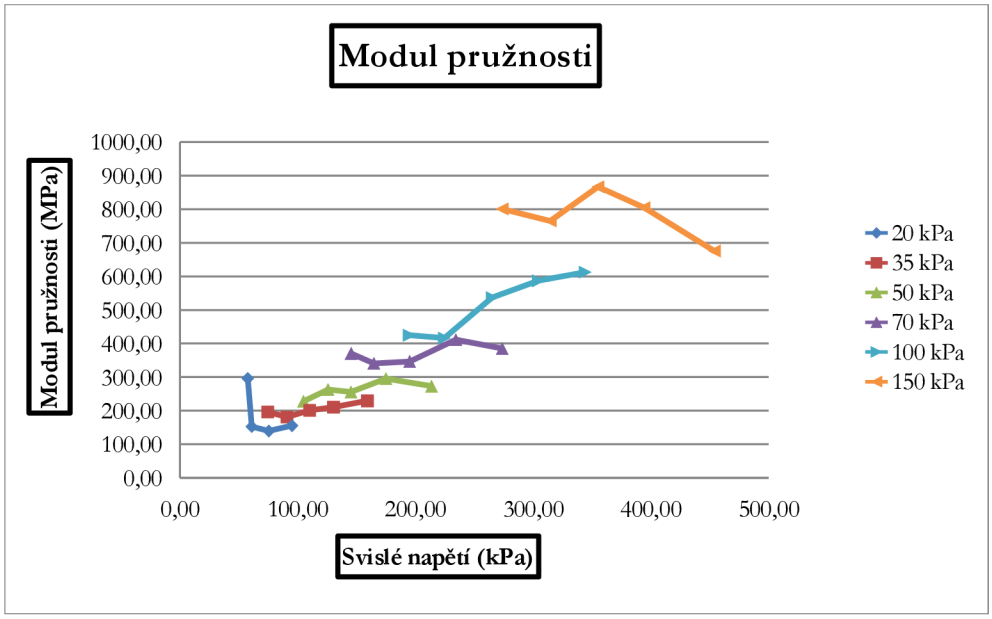
Vzorek číslo 13 **Vlhkost** 32,5%
Ozn. materiálu elektrárenský popílek **Hmotnost vzorku** 2,170 kg
Metoda zkoušení B

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	31,95	25,56	57,51	0,0002	296,06
20,00	35,00	55,00	20,23	40,64	60,87	0,0004	152,66
20,00	50,00	70,00	20,14	55,21	75,35	0,0005	139,56
20,00	70,00	90,00	20,01	75,02	95,03	0,0006	155,47
35,00	35,00	70,00	34,31	40,25	74,57	0,0004	196,41
35,00	50,00	85,00	35,44	55,42	90,87	0,0005	180,88
35,00	70,00	105,00	34,95	75,17	110,12	0,0005	201,11
35,00	90,00	125,00	35,24	95,07	130,31	0,0006	210,40
35,00	120,00	155,00	34,85	124,23	159,08	0,0007	229,21
50,00	50,00	100,00	49,85	55,11	104,96	0,0005	228,23
50,00	70,00	120,00	50,04	75,55	125,59	0,0005	263,04
50,00	90,00	140,00	50,37	94,77	145,14	0,0006	256,13
50,00	120,00	170,00	50,11	124,84	174,95	0,0006	295,75
50,00	160,00	210,00	49,96	163,69	213,65	0,0008	273,00
70,00	70,00	140,00	69,80	75,53	145,33	0,0004	370,66
70,00	90,00	160,00	70,07	94,52	164,59	0,0005	340,69
70,00	120,00	190,00	70,20	124,91	195,12	0,0006	346,73
70,00	160,00	230,00	70,08	164,09	234,17	0,0006	411,48
70,00	200,00	270,00	70,05	203,61	273,66	0,0007	385,25
100,00	90,00	190,00	99,61	95,05	194,66	0,0005	424,70
100,00	120,00	220,00	99,93	124,56	224,49	0,0005	416,08
100,00	160,00	260,00	100,28	164,67	264,96	0,0005	536,64
100,00	200,00	300,00	100,14	204,07	304,21	0,0005	586,84
100,00	240,00	340,00	100,04	243,95	343,99	0,0006	612,48
150,00	120,00	270,00	149,09	124,44	273,53	0,0003	800,61
150,00	160,00	310,00	150,11	164,37	314,49	0,0004	764,82
150,00	200,00	350,00	150,16	204,74	354,90	0,0004	866,80
150,00	240,00	390,00	150,27	243,86	394,13	0,0005	804,80
150,00	300,00	450,00	150,12	303,80	453,92	0,0007	675,70

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	13	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,170 kg
Metoda zkoušení	B		





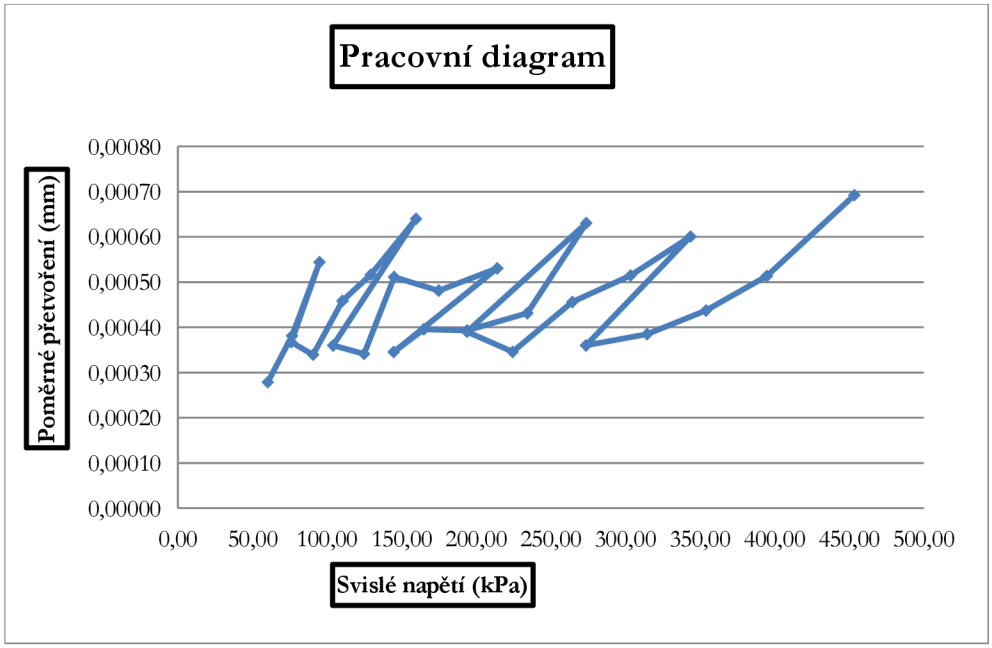
Cyklická triaxiální zkouška

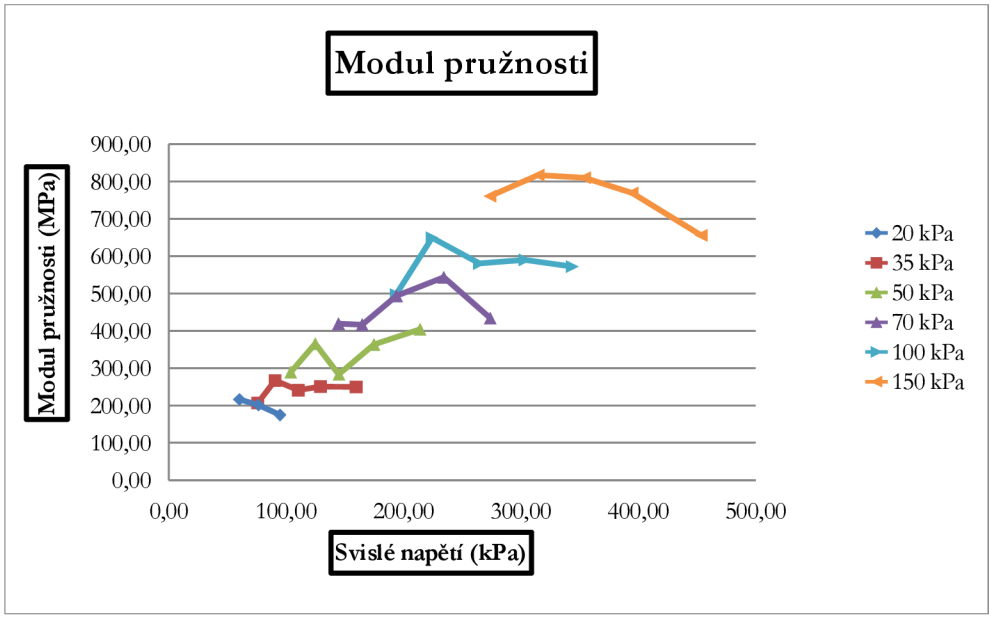
Vzorek číslo 14
Ozn. materiálu elektrárenský popílek
Metoda zkoušení B
Vlhkost 32,5%
Hmotnost vzorku 2,320 kg

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**komorový tlak [kPa]**	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**poměrné přetvoření [-]**	**modul pružnosti [MPa]**
20,00	20,00	40,00	34,72	23,82	58,54	0,0001	705,67
20,00	35,00	55,00	19,52	40,74	60,26	0,0003	216,26
20,00	50,00	70,00	20,05	56,48	76,53	0,0004	200,86
20,00	70,00	90,00	19,59	75,29	94,87	0,0005	174,49
35,00	35,00	70,00	35,04	40,91	75,95	0,0004	206,83
35,00	50,00	85,00	35,11	55,49	90,59	0,0003	266,98
35,00	70,00	105,00	35,04	75,37	110,41	0,0005	240,88
35,00	90,00	125,00	34,79	94,55	129,33	0,0005	250,51
35,00	120,00	155,00	35,30	124,45	159,75	0,0006	249,65
50,00	50,00	100,00	49,60	54,42	104,02	0,0004	289,16
50,00	70,00	120,00	49,87	74,92	124,79	0,0003	365,71
50,00	90,00	140,00	50,13	94,83	144,96	0,0005	283,48
50,00	120,00	170,00	50,09	124,72	174,81	0,0005	363,20
50,00	160,00	210,00	50,10	164,03	214,13	0,0005	403,84
70,00	70,00	140,00	69,51	75,18	144,70	0,0003	418,74
70,00	90,00	160,00	70,22	94,62	164,83	0,0004	416,57
70,00	120,00	190,00	70,12	123,89	194,01	0,0004	493,70
70,00	160,00	230,00	69,89	164,36	234,25	0,0004	543,23
70,00	200,00	270,00	70,17	203,66	273,83	0,0006	434,28
100,00	90,00	190,00	99,25	94,56	193,81	0,0004	496,92
100,00	120,00	220,00	100,31	124,08	224,39	0,0003	649,26
100,00	160,00	260,00	100,08	164,47	264,55	0,0005	580,19
100,00	200,00	300,00	100,09	203,40	303,49	0,0005	590,01
100,00	240,00	340,00	100,08	243,67	343,75	0,0006	572,21
150,00	120,00	270,00	148,93	124,73	273,65	0,0004	760,52
150,00	160,00	310,00	150,03	164,60	314,63	0,0004	817,13
150,00	200,00	350,00	150,14	204,00	354,13	0,0004	810,02
150,00	240,00	390,00	150,12	244,69	394,81	0,0005	769,11
150,00	300,00	450,00	150,19	303,43	453,62	0,00	655,47

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	14	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,320 kg
Metoda zkoušení	B		





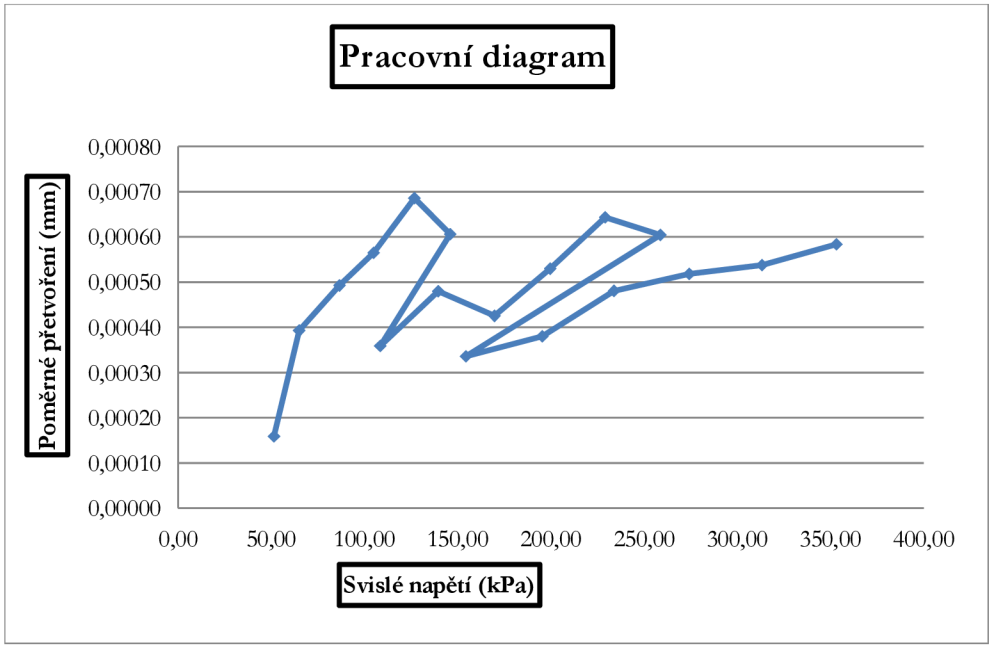
Cyklická triaxiální zkouška

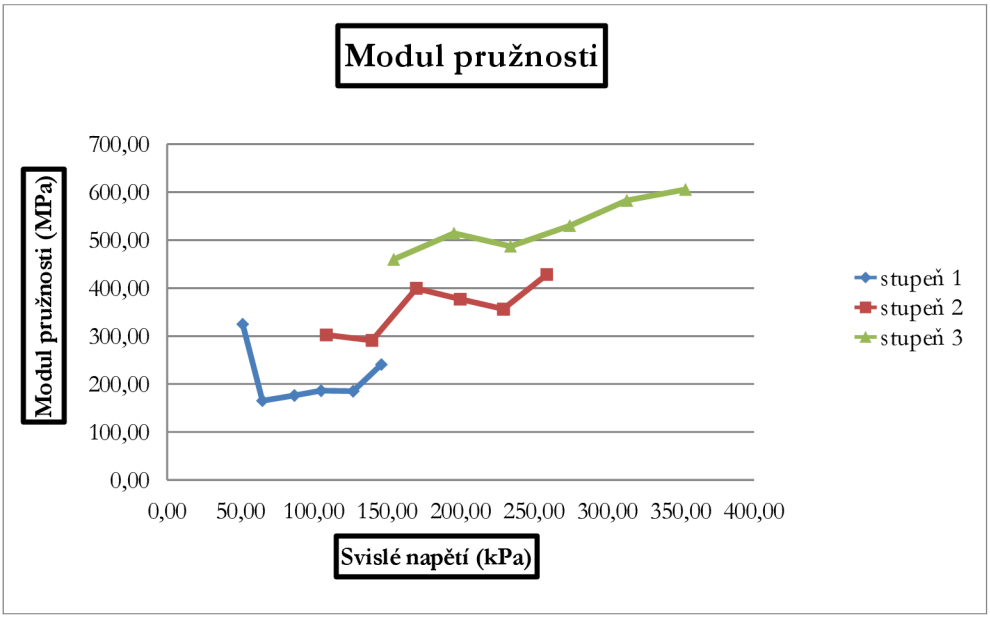
Vzorek číslo 15 **Vlhkost** 32,5%
Ozn. materiálu elektrárenský popílek **Hmotnost vzorku** 2,318 kg
Metoda zkoušení vlastní nastavení

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**komorový tlak [kPa]**	**deviátor napětí [kPa]**	**svislé napětí [kPa]**	**poměrné přetvoření [-]**	**modul pružnosti [MPa]**
20,00	20,00	40,00	25,15	26,39	51,54	0,0002	324,52
20,00	40,00	60,00	19,05	45,95	65,00	0,0004	165,46
20,00	60,00	80,00	21,03	65,68	86,71	0,0005	176,08
20,00	80,00	100,00	19,10	85,89	104,99	0,0006	185,99
20,00	100,00	120,00	20,50	106,34	126,84	0,0007	184,96
20,00	120,00	140,00	20,43	125,61	146,04	0,0006	241,00
45,00	60,00	105,00	43,68	64,82	108,50	0,0004	302,51
45,00	90,00	135,00	45,20	94,48	139,68	0,0005	291,13
45,00	120,00	165,00	44,62	125,24	169,86	0,0004	399,49
45,00	150,00	195,00	45,48	154,24	199,72	0,0005	377,13
45,00	180,00	225,00	45,05	184,13	229,18	0,0006	356,22
45,00	210,00	255,00	44,64	214,13	258,77	0,0006	428,17
70,00	80,00	150,00	69,67	84,79	154,46	0,0003	459,88
70,00	120,00	190,00	70,32	125,18	195,50	0,0004	514,27
70,00	160,00	230,00	70,07	163,89	233,96	0,0005	486,93
70,00	200,00	270,00	70,07	204,26	274,33	0,0005	529,66
70,00	240,00	310,00	70,00	243,31	313,31	0,0005	582,84
70,00	280,00	350,00	69,83	283,48	353,31	0,0006	605,35

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	15	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,318 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





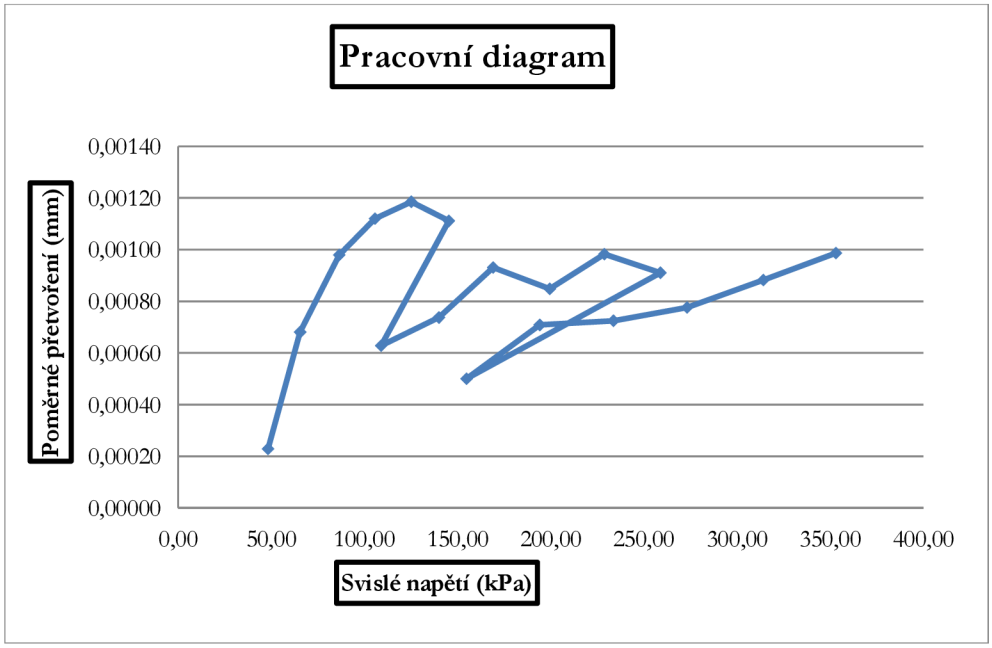
Cyklická triaxiální zkouška

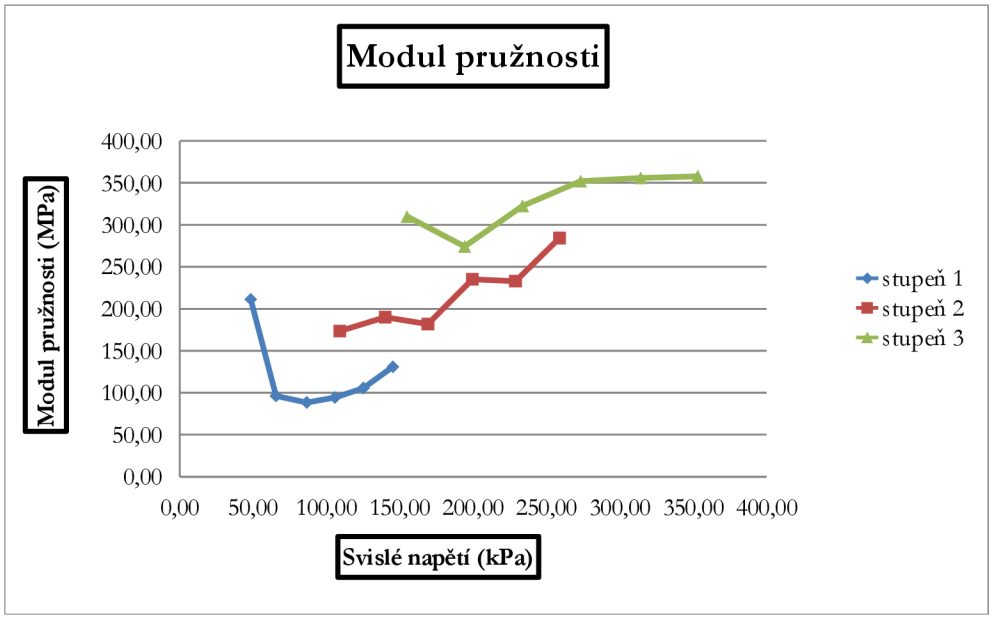
Vzorek číslo 16 **Vlhkost** 32,5%
Ozn. materiálu elektrárenský popílek **Hmotnost vzorku** 2,299 kg
Metoda zkoušení vlastní nastavení

normové hodnoty			naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
20,00	20,00	40,00	24,50	23,83	48,33	0,0002	211,20
20,00	40,00	60,00	19,80	45,75	65,55	0,0007	96,34
20,00	60,00	80,00	20,04	66,52	86,55	0,0010	88,38
20,00	80,00	100,00	20,39	85,33	105,72	0,0011	94,37
20,00	100,00	120,00	19,91	105,22	125,13	0,0012	105,56
20,00	120,00	140,00	19,88	125,42	145,30	0,0011	130,77
45,00	60,00	105,00	44,23	64,82	109,05	0,0006	173,50
45,00	90,00	135,00	45,15	94,84	139,99	0,0007	189,89
45,00	120,00	165,00	45,07	124,07	169,14	0,0009	181,74
45,00	150,00	195,00	45,05	154,44	199,49	0,0008	235,14
45,00	180,00	225,00	45,02	183,76	228,78	0,0010	232,81
45,00	210,00	255,00	45,05	213,81	258,86	0,0009	284,27
70,00	80,00	150,00	69,50	85,34	154,85	0,0005	309,91
70,00	120,00	190,00	70,16	123,94	194,10	0,0007	274,07
70,00	160,00	230,00	70,05	163,64	233,68	0,0007	322,46
70,00	200,00	270,00	69,90	203,29	273,20	0,0008	352,04
70,00	240,00	310,00	70,08	244,00	314,08	0,0009	355,93
70,00	280,00	350,00	70,11	282,94	353,04	0,0010	357,83

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	16	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,299 kg
Metoda zkoušení	vlastní nastavení		





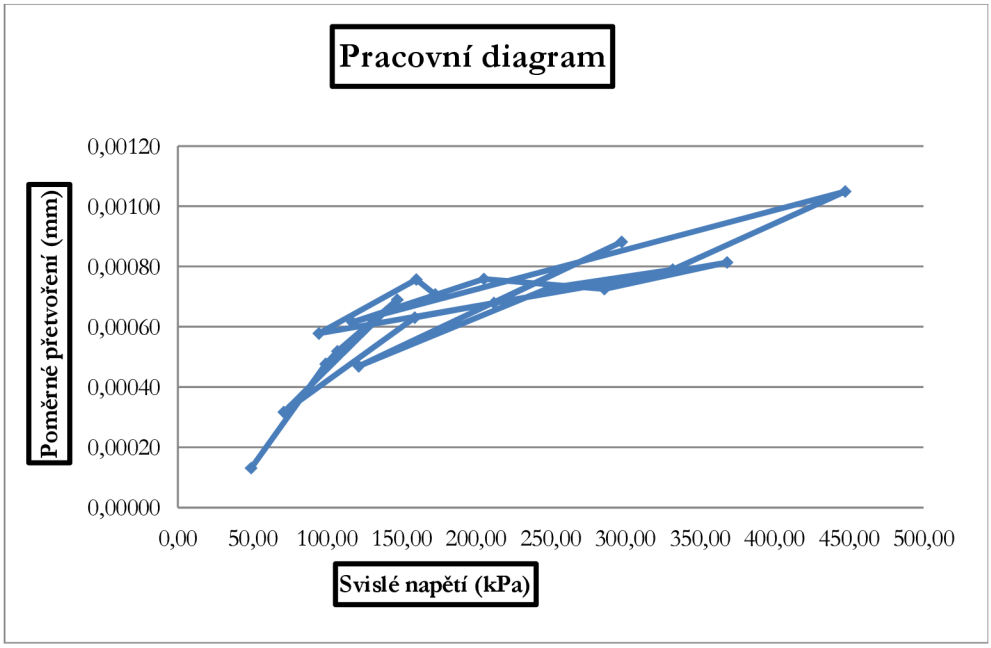
Cyklická triaxiální zkouška

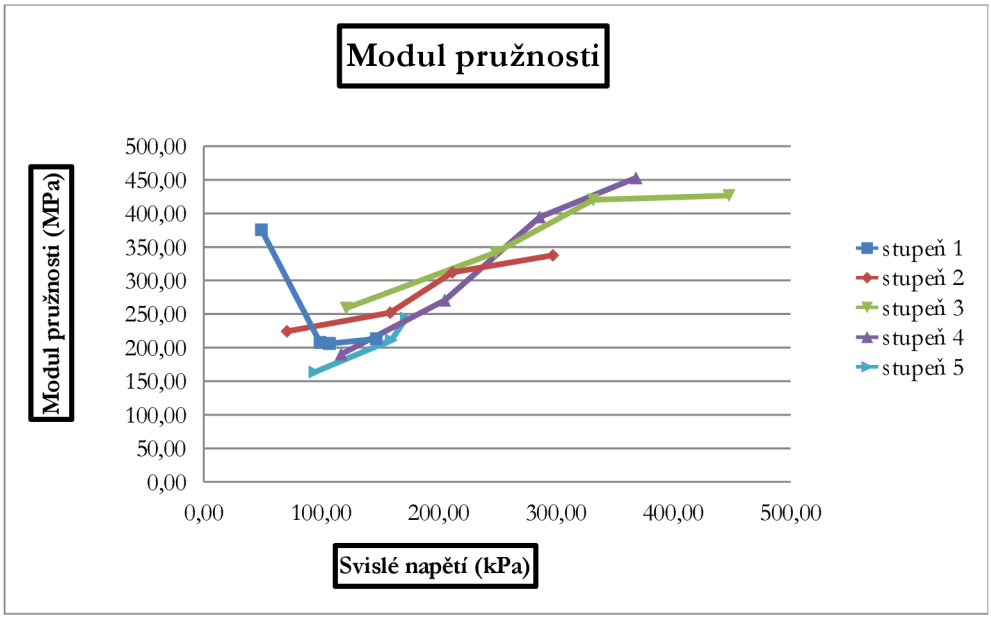
Vzorek číslo 17 **Vlhkost** 32,5%
Ozn. materiálu elektrárenský popílek **Hmotnost vzorku** 2,255 kg
Metoda zkoušení A

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	42,28	6,81	49,10	0,0001	375,65
10,00	110,00	0,00	100,00	92,79	6,25	99,04	0,0005	207,77
10,00	185,00	0,00	175,00	100,23	6,76	106,99	0,0005	206,21
10,00	260,00	0,00	250,00	137,25	9,82	147,07	0,0007	213,31
10,00	60,00	30,00	80,00	39,12	31,91	71,03	0,0003	224,31
10,00	110,00	60,00	160,00	92,47	66,38	158,85	0,0006	252,08
10,00	185,00	105,00	280,00	100,15	111,79	211,94	0,0007	312,16
10,00	260,00	150,00	400,00	137,66	159,91	297,57	0,0009	337,58
10,00	60,00	75,00	125,00	41,15	80,12	121,28	0,0005	258,74
10,00	110,00	150,00	250,00	92,52	156,24	248,76	0,0007	341,29
10,00	160,00	225,00	375,00	100,08	231,75	331,83	0,0008	420,27
10,00	210,00	300,00	500,00	137,46	310,03	447,49	0,0010	426,55
10,00	35,00	75,00	100,00	37,39	79,65	117,04	0,0006	190,21
10,00	60,00	150,00	200,00	48,98	156,27	205,25	0,0008	270,55
10,00	85,00	225,00	300,00	54,95	231,11	286,05	0,0007	394,37
10,00	110,00	300,00	400,00	63,42	304,82	368,24	0,0008	452,65
10,00	20,00	60,00	70,00	30,08	64,45	94,53	0,0006	163,60
10,00	30,00	120,00	140,00	35,00	124,89	159,89	0,0008	211,26
10,00	35,00	150,00	175,00	37,51	135,15	172,66	0,0007	244,29

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	17	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,255 kg
Metoda zkoušení	A		

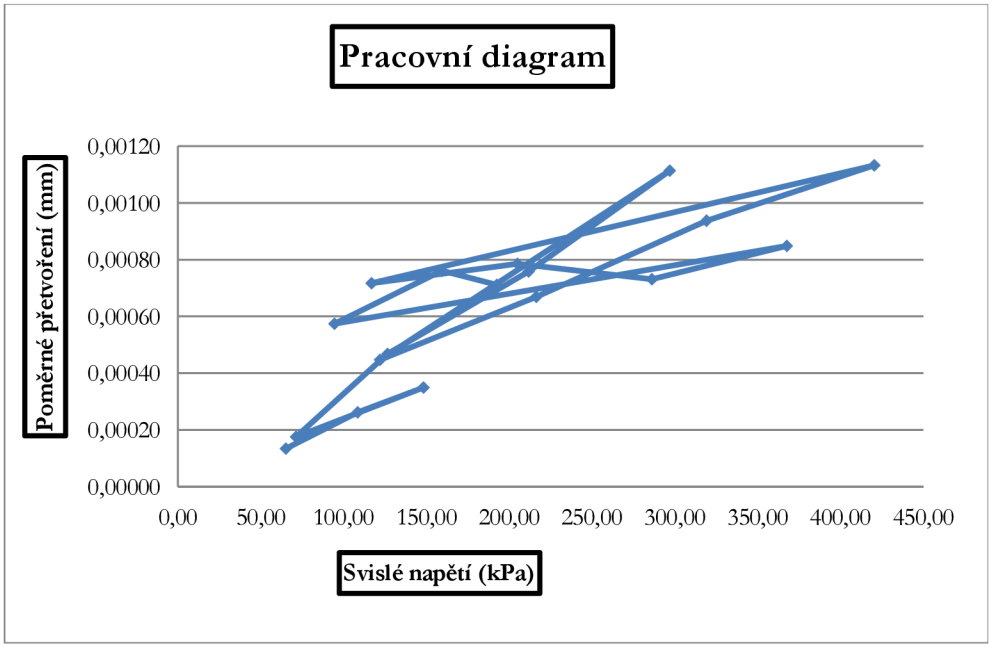
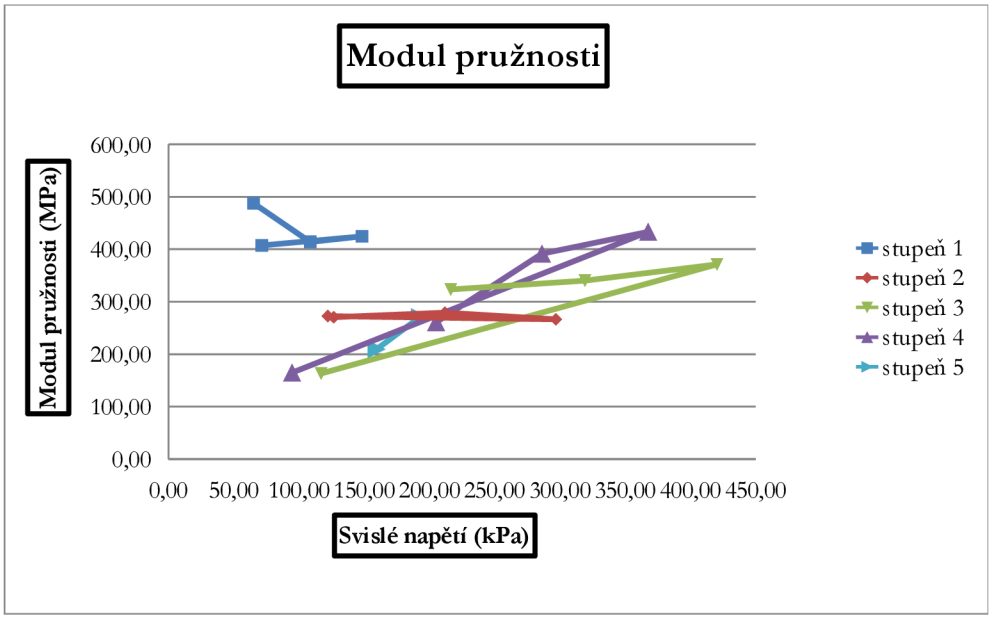




Cyklická triaxiální zkouška

Vzorek číslo 18
Ozn. materiálu elektrárenský popílek
Metoda zkoušení A
Vlhkost 32,5%
Hmotnost vzorku 2,028 kg

normové hodnoty				naměřené hodnoty				
komorový tlak [kPa]		deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	komorový tlak [kPa]	deviátor napětí [kPa]	svislé napětí [kPa]	poměrné přetvoření [-]	modul pružnosti [MPa]
min	max							
10,00	60,00	0,00	50,00	62,17	3,07	65,24	0,0001	487,60
10,00	110,00	0,00	100,00	100,04	8,44	108,48	0,0003	414,27
10,00	185,00	0,00	175,00	137,45	10,77	148,22	0,0003	424,57
10,00	260,00	0,00	250,00	39,33	32,07	71,39	0,0002	407,58
10,00	60,00	30,00	80,00	62,61	63,98	126,59	0,0005	270,50
10,00	110,00	60,00	160,00	100,19	111,56	211,74	0,0008	279,38
10,00	185,00	105,00	280,00	137,44	159,48	296,92	0,0011	266,57
10,00	260,00	150,00	400,00	41,90	80,15	122,05	0,0004	272,87
10,00	60,00	75,00	125,00	62,84	153,47	216,31	0,0007	323,31
10,00	110,00	150,00	250,00	87,96	231,17	319,13	0,0009	340,50
10,00	160,00	225,00	375,00	112,55	307,83	420,37	0,0011	371,26
10,00	210,00	300,00	500,00	37,29	79,65	116,95	0,0007	163,13
10,00	35,00	75,00	100,00	49,25	155,74	204,99	0,0008	261,05
10,00	60,00	150,00	200,00	55,47	230,73	286,20	0,0007	391,61
10,00	85,00	225,00	300,00	63,62	303,95	367,57	0,0008	433,40
10,00	110,00	300,00	400,00	30,46	64,09	94,55	0,0006	164,80
10,00	20,00	60,00	70,00	34,79	124,59	159,38	0,0008	209,54
10,00	30,00	120,00	140,00	37,62	154,95	192,57	0,0007	270,86
10,00	35,00	150,00	175,00	178,29	1,89	180,17	0,0000	-4536,58

Cyklická triaxiální zkouška - graf. vyhodnocení

Vzorek číslo	18	**Vlhkost**	32,5%
Ozn. materiálu	elektrárenský popílek	**Hmotnost vzorku**	2,028 kg
Metoda zkoušení	A