

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,  
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



# **Pevnost brněnského téglu v kritickém stavu**

## **Critical state strength of Brno Clay**

Diplomová práce

**Michal Fencí**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha 2012

## **PROHLÁŠENÍ**

Diplomovou práci jsem vypracoval na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky pod vedením Ing. Jana Boháče, CSc. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval zcela samostatně, použil pouze své vlastní laboratorní zkoušky a všechny použité informační zdroje řádně citoval a uvedl v seznamu literatury. Souhlasím s jejím zapůjčením ke studijním účelům.

V Praze, srpen 2012

Michal Fencl

## **PODĚKOVÁNÍ**

Své poděkování bych rád věnoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Boháčovi, CSc. za odborné vedení, poskytnutí informačních zdrojů, cenné rady při konzultacích, za trpělivost a za pomoc v laboratořích mechaniky zemin při provádění experimentů. Dále bych chtěl poděkovat za ochotu všem spolužákům a zaměstnancům Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky. Práce byla připravena za podpory grantu GAČR P105/11/1884.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá stanovením pevnosti v kritickém stavu brněnských jíílů. Pevnost v kritickém stavu je důležitým vstupním parametrem při řadě geotechnických analýz. V této práci jsou stručně popsány pevnostní charakteristiky zemin, přičemž je kladen důraz na pevnost kritickou. Dále je v rešeršní části popsán součinitel zemního tlaku v klidu  $K_0$ , v jehož empirickém stanovení se kritická pevnost vyskytuje. Práce se věnuje podrobně laboratornímu stanovení pevnosti v kritickém stavu s pomocí několika odlišných metod a snaží se vyzdvihnout použití kluzných destiček pro práci v triaxiálních přístrojích na jemnozrnných zeminách. Získané výsledky jsou diskutovány a porovnány s daty z předchozích prací.

## **ABSTRACT**

The Thesis deals with the critical state strength of Brno Clay. The critical state strength is an important input parameter in many geotechnical analyses. Further it is used in determining the at-rest coefficient  $K_0$  of normally consolidated clays using the Jáky formula. The Thesis first briefly describes the concept of strength for soils and the  $K_0$ . The critical state strength of the particular soil is then determined by using triaxial conventional and frictionless specimens, and two types laboratory direct shear measurements, namely in the translational and ring shear boxes. The obtained results are discussed and compared with previous published data.

## Obsah

1 ÚVOD .....	1
2 KRITICKÁ PEVNOST .....	2
2.1 Pevnost zeminy.....	2
2.2 Druhy pevnosti zemin .....	3
2.2.1 Vrcholová pevnost.....	3
2.2.2 Kritická pevnost .....	4
2.2.3 Reziduální pevnost .....	4
2.3 Kritický stav .....	5
2.3.2 CSL pro triaxiální zkoušky.....	6
3 SOUČINITEL ZEMNÍHO TLAKU V KLIDU, $K_0$ .....	8
3.1 $K_0$ normálně konsolidovaných zemin.....	8
3.1.1 $K_0$ z hlediska mobilizovaného úhlu vnitřního tření .....	10
4 GEOLOGIE OBLASTI ZÁJMU.....	12
4.1 Geologický vývoj území.....	12
4.2 Brněnský masiv .....	13
4.3 Západní Karpaty .....	14
4.4 Neogén .....	15
4.5 Inženýrsko geologické podmínky.....	16
4.5.1 Brněnské jíly.....	16
4.5.2 Geotechnické vlastnosti brněnských jílu .....	17
4.5.3 Indexové zkoušky .....	18
4.6 Hydrogeologické podmínky .....	18
5 DATA Z PŘEDCHOZÍCH PRACÍ.....	19
5.1 Srovnání předchozích dat .....	19
5.1.1 Zkoušky provedené Boháčem .....	20
5.1.2 Zkoušky provedené Svobodou .....	21
5.2 Shrnutí výsledků dat z předchozích prací.....	23
6 LABORATORNÍ EXPERIMENTY .....	24
6.1 Příprava rekonstituovaného materiálu.....	24
6.2 Triaxiální zkoušky .....	25
6.2.1 Příprava vzorků .....	26
6.2.2 Kluzné destičky .....	27
6.2.3 Osazení vzorku .....	28
6.2.4 Sycení a konsolidace vzorku .....	30

6.2.5 Smykání vzorků.....	31
6.2.6 Přesnost měření .....	32
6.2.7 Vyhodnocení zkoušek v triaxiálních přístrojích.....	37
6.2.7.1 Standardní zkoušky .....	38
6.2.7.2 Kluzné destičky .....	42
6.3 Zkoušky v rotačním smykovém přístroji.....	45
6.3.1 Popis přístroje.....	45
6.3.2 Metodika zkoušky .....	46
6.3.3 Vyhodnocení zkoušek v rotačním smykovém přístroji .....	47
6.3.4 Problémy při laboratorních experimentech na rotačním smykovém přístroji .....	51
6.4 Zkouška v translačním smykovém přístroji .....	52
6.4.1 Popis přístroje.....	52
6.4.2 Metodika zkoušky .....	53
6.4.3 Vyhodnocení zkoušky .....	54
7 DISKUSE .....	58
7.1 Srovnání dat z triaxiálních zkoušek.....	58
7.2 Srovnání dat z krabicových přístrojů.....	59
7.3 Srovnání triaxiálních zkoušek a zkoušek ze smykových přístrojů .....	60
8 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT S DATY Z PŘEDCHOZÍCH PRACÍ.....	61
9 ZÁVĚR.....	62
10 LITERATURA.....	63

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1. Kritéria porušení (podle Atkinsona, 2007).
- Obr. 2.2. Průběh smykání kyprého a ulehlého písku (Atkinson, 2007).
- Obr. 2.3 Graf závislosti smykového napětí na přetvoření (Atkinson, 2007).
- Obr. 2.4. Kritické stavy zemin (Atkinson, 2007).
- Obr. 2.5 Čára kritických stavů triaxiálních zkoušek (Atkinson, 2007)
- Obr. 3.1. Korelace mezi naměřeným  $K_0$  (pro NC zeminy) a  $K_0$  z Jákyho zjednodušené rovnice (1948), (Federico et al., 2008).
- Obr. 3.2. Jákyho formulace závislosti  $K_0$  na OC a uhlu vnitřního tření mobilizovaném na OAC (Mesri and Hayat, 1993).
- Obr. 3.3. Mohrovy kružnice napětí pro zeminu v porušení a během podmínek jednoosého zatížení (Federico et al., 2008).
- Obr. 4.1. Geologická mapa stavby kontaktu Českého masivu a Západních Karpat (Pavlová, 2011)
- Obr. 4.2. Schematická geologická mapa brněnského masivu (Chlupáč et al., 2002)
- Obr. 4.3. Stratigrafické schéma neogénu karpatské předhlubně (podle Brzobohatého in Chlupáč, 2002)
- Obr. 4.4. Schéma vzniku překonsolidované zeminy (Skempton, 1964)
- Obr. 5.1 Zrnitostní křivka brněnského jílu pro zeminu vysušenou v peci a pro zeminu bez předchozího vysušení (Boháč et al., 1995).
- Obr. 5.2. Zrnitostní křivky brněnského jílu (Pavlík et al., 2003 in Svoboda, 2010).
- Obr. 5.3. Pevnost brněnského jílu (Boháč et al., 1995).
- Obr. 5.4 Efektivní dráhy napětí a proložená obálka pevnosti ve vrcholovém stavu neogenního jílu (Svoboda, 2010).
- Obr. 5.5. (a) Pracovní diagramy zkoušek v rotačním smykovém přístroji, (b) stanovení obálek pevnosti brněnského jílu (Svoboda, 2010).
- Obr. 6.1. Nastrouhaný brněnský jíl (velikost jednotlivých „zrn“ je cca 3-5 mm).
- Obr. 6.2 Obecné schéma triaxiální komory (Atkinson, 2007).
- Obr. 6.3. Konsolidační fáze přípravy vzorku.
- Obr. 6.4. Vytlačování vzorku.
- Obr. 6.5 Podstavy pro zkoušku s kluznými destičkami.
- Obr. 6.6. Destičky vystřižené z gumové membrány.
- Obr. 6.7. Osazený vzorek výšky 38 mm v trojosém přístroji s vyznačenými kluznými destičkami a těsnícími kroužky.
- Obr. 6.8. Osazený vzorek výšky 76 mm.
- Obr. 6.9. Graf kalibrace loadcell.
- Obr. 6.10. Graf kalibrace loadcell.
- Obr. 6.11. Graf kalibrace loadcell.
- Obr. 6.12. Graf kalibrace snímače pórových tlaků.

- Obr. 6.13. Graf kalibrace snímače pórových tlaků.
- Obr. 6.14. Graf kalibrace snímače pórových tlaků.
- Obr. 6.15. Zdroje chyb při vnějším měření osové deformace (Baldi et al., 1988).
- Obr. 6.16. Soudkovitý tvar vzorku po zkoušce (recon\_76\_200).
- Obr. 6.17. Vznikající smyková plocha (recon\_76\_200).
- Obr. 6.18. Závislost deviátorového napětí na axiálním přetvoření. Šipky vyznačují předpokládané dosažení kritického stavu.
- Obr. 6.19. Graf změny pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření. Šipky vyznačují předpokládané dosažení kritického stavu.
- Obr. 6.20. Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí, standardní zkoušky. Současně je proložena čára předpokládaného porušení.
- Obr. 6.21. Kritická obálka pevnosti stanovená triaxiálními zkouškami na standardních vzorcích.
- Obr. 6.22. Průběh změny pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření.
- Obr. 6.23. Průběh změny deviátorového napětí s narůstajícím axiálním přetvořením.
- Obr. 6.24. Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí. Současně je proložena čára předpokládaného porušení.
- Obr. 6.25. Graf závislosti čísla pórovitosti na logaritmu středního napětí při zplastizování a středního napětí při kterém byly vzorky konsolidovány s vykreslenými čarami NCL a CSL.
- Obr. 6.26. Rotační smykový přístroj typu Bromhead.
- Obr. 6.27. Spodní část smykové krabice vyplněna rekonstituovaným materiálem.
- Obr. 6.28. Smyková krabice umístěná a připevněná do plexisklové nádržky na smykovém přístroji.
- Obr. 6.29. Kalibrační křivka dynamometru 15803B (Najser, 2004).
- Obr. 6.30. Kalibrační křivka dynamometru 15803A (Najser, 2004).
- Obr. 6.31. Spodní část smykové krabice s vyplněným mezikružím, na které je patrná hladká smyková plocha.
- Obr. 6.32. Graf závislosti smykového napětí na posunutí.
- Obr. 6.33. Obálka kritické a reziduální pevnosti brněnských jílu.
- Obr. 6.34. Translační smykový přístroj.
- Obr. 6.35. Schéma uspořádání vzorku ve smykové krabici (ShearPLEX user manual, 2004)
- Obr. 6.36. Smyková krabice s prstencem během konsolidační fáze.
- Obr. 6.37. Kalibrační křivka dynamometru translačního smykového přístroje.
- Obr. 6.38. Vzniklá smyková plocha po ukončení zkoušky v translačním smykovém přístroji.
- Obr. 6.39. Graf závislosti smykového napětí na posunutí.
- Obr. 6.40. Kritická a reziduální obálka pevnosti získaná z translačního smykového přístroje.
- Obr. 7.1. Kritické obálky pevnosti získané z triaxiálních zkoušek.
- Obr. 7.2. Obálky pevnosti získané ze smykových přístrojů.
- Obr. 7.3. Porovnání kritických obálek pevnosti.

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 4.1. Indexové zkoušky (podle Svobody, 2010).

Tab. 5.1. Indexové zkoušky ( $I_p$  – index plasticity,  $w_p$  – vlhkost na mezi plasticity).

Tab. 5.2. Pevnostní charakteristiky brněnského jílu (podle Svobody, 2010).

Tab. 6.1. Hodnoty mobilizované pevnosti brněnských jílu v kritickém stavu stanovené pomocí triaxiálních zkoušek na standardních vzorcích.

Tab. 6.2. Hodnoty mobilizované pevnosti brněnských jílu stanovené pomocí triaxiálních zkoušek za použití kluzných destiček.

Tab. 6.3. Kritická a reziduální pevnost brněnských jílu stanovená pomocí rotační krabice.

Tab. 6.4. Kritická a reziduální pevnost, translační smykový přístroj.

Tab. 8.1. Srovnání kritické pevnosti brněnských jílu.

# 1 ÚVOD

Cílem předložené diplomové práce je stanovit pevnosti v kritickém stavu brněnských jíílů zvaných „tégly“ a vyřešení tak rozpor naměřených hodnot z předchozích prací. Kritická pevnost slouží jako vstupní parametr pro řadu geotechnických analýz a je důležitou součástí při výpočtu součinitele zemního tlaku v klidu  $K_0$ . Pro normálně konsolidované zeminy se součinitel zemního tlaku stanoví s pomocí Jákyho vztahu  $K_0 = 1 - \sin\varphi'$ , kde úhel vnitřního tření odpovídá právě pevnosti v kritickém stavu. Tento vztah Jáky postuloval již v roce 1948 a ani moderní mechanika zemin doposud nepředstavila vztah, který by přesněji vyjadřoval podmínky in situ v normálně konsolidovaném zemním masivu.

Kromě samotného stanovení pevnosti v kritickém stavu brněnských jíílů jsou v práci stručně popsány pevnostní charakteristiky zemin a součinitel zemního tlaku v klidu  $K_0$  a srovnána data z předchozích prací, které se zabývaly stanovením kritické pevnosti brněnských tégľů.

Pevnost v kritickém stavu se stanovuje laboratorně a existuje několik metod pro její určení. V rámci této práce byly využity laboratorní přístroje umožňující stanovení kritické pevnosti, jimiž disponují laboratoře mechaniky zemin oddělení inženýrské geologie Univerzity Karlovy v Praze. Konkrétně se jedná o triaxiální přístroje a rotační a translační smykový přístroj. Kromě standardních zkoušek na triaxiálních přístrojích budou provedeny ještě zkoušky s kluznými destičkami, jež se při práci s jemnozrnnými zeminami v praxi běžně nepoužívají.

## 2 KRITICKÁ PEVNOST

Tématem této diplomové práce je stanovení pevnosti brněnských jílu v kritickém stavu (kritická pevnost). Ta se využívá při četných geotechnických analýzách jako vstupní parametr a je důležitou součástí pro stanovení součinitele zemního tlaku  $K_0$  pro normálně konsolidované zeminy. Tato kapitola se bude věnovat popisu pevnosti zemin a detailněji se zaměří na definici pevnosti kritické.

### 2.1 Pevnost zeminy

Pevnost materiálu popisuje mezní stav napětí, který může materiál vydržet předtím, než dojde k porušení. Atkinson (2007) uvádí, že pevnost materiálu je rovna maximálnímu smykovému napětí, jež je materiál schopný vydržet. Hovoříme potom o pevnosti smykové. Ta je charakterizována jako odpor proti usmyknutí na tvořící se smykové ploše. Můžeme rozlišit dvě základní kritéria porušení. První, nazývané soudržnost, popisuje, že k porušení materiálu dojde, když Mohrova kružnice napětí dosáhne obálky dané vztahem:

$$\tau' = c'$$

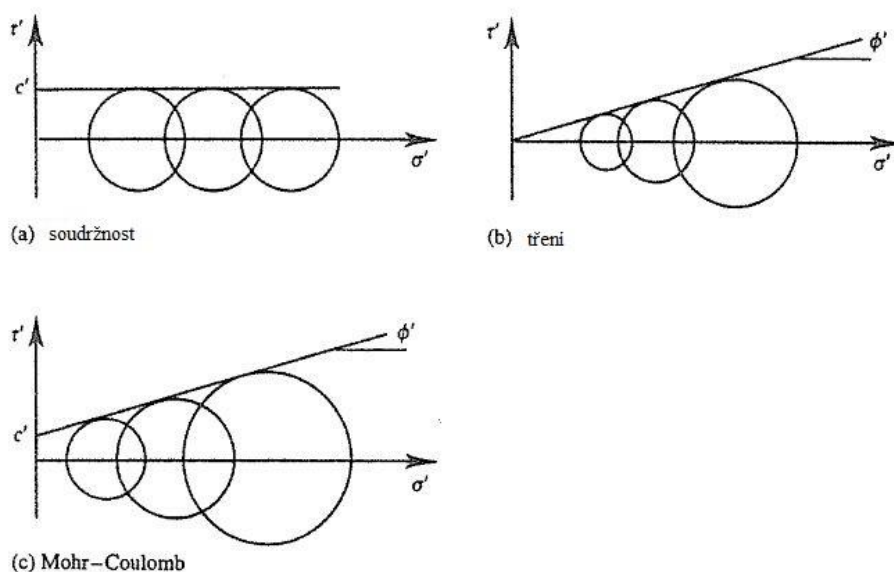
kde  $c'$  je soudržnost a  $\tau'$  smykové napětí. Druhé tření, říká, že materiál se poruší, když Mohrova kružnice dosáhne obálky popsané rovnicí:

$$\tau' = \sigma' \mu = \sigma' \tan \phi'$$

kde  $\mu$  je koeficient tření,  $\phi'$  značí úhel vnitřního tření. Nejčastěji používané kritérium porušení Mohr – Coulombovo je jednoduchým sloučením soudržnosti a tření, a je popsáno takto:

$$\tau' = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Všechna tři kritéria porušení jsou znázorněna na obr. 2.1



Obr. 2.1. Kritéria porušení (podle Atkinsona, 2007).

V případě všech tří kritérií dojde k porušení, když se Mohrova kružnice dotkne obálky pevnosti. Všechna tři kritéria porušení jsou využívána k popisu pevnosti zemin za různých podmínek odvodnění a napětí.

## 2.2 Druhy pevnosti zemin

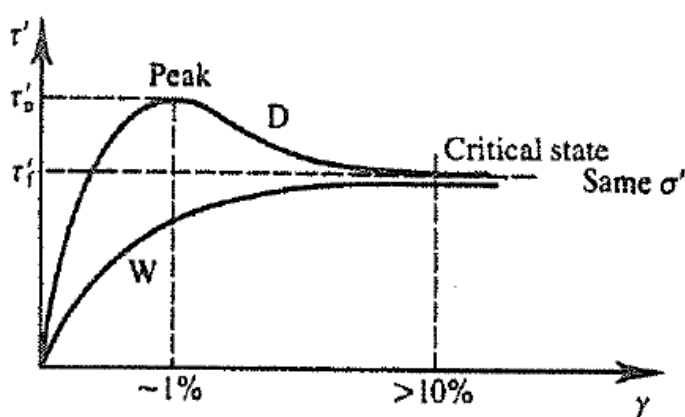
V praxi se rozlišují tři základní typy pevností zemin: vrcholová, pevnost v kritickém stavu a reziduální pevnost. Jednotlivé typy pevností budou charakterizovány v následujícím textu, přičemž bude kladen důraz na pevnost kritickou.

### 2.2.1 Vrcholová pevnost

Jedná se o maximální smykové napětí, jež je zemina schopna přenést. Vrcholová pevnost je charakterizována maximálním úhlem vnitřního tření a soudržností. Vedle struktury je závislá na charakteru materiálu, tedy jestli je zemina jemnozrnná nebo hrubozrnná. U jemnozrnných zemin je důležitým faktorem pro velikost vrcholové pevnosti stupeň překonsolidace, u hrubozrnných potom rozhoduje ulehlost zeminy.

Pro hrubozrnné zeminy, například charakteru písku, je průběh smyku znázorněn na obr. 2.2. V případě ulehlého písku již při malém posunu smykové napětí roste až ke své maximální hodnotě nazvané vrcholová pevnost. Oproti kyprému písku, kde se hodnota smykového napětí postupně zvyšuje až do své mezní hodnoty, je na křivce pro ulehlý písek patrný výrazný vrchol, jež je způsoben dilatancí materiálu. Dilatancí se rozumí energie potřebná pro zvýšení objemu pro smyk. Jednoduše řečeno v ulehlém písku jsou zrna uspořádána nejtěsnějším možným způsobem a je tedy potřeba vyvinout větší smykové napětí, aby došlo ke smykovému porušení zeminy.

Při pokračujícím smykání a překročení vrcholové pevnosti hodnota smykové pevnosti klesá až do určité limitní hodnoty nazývané kritické pevnost. U kyprého písku smykové napětí stoupá bez zjevného vrcholu až do své mezní hodnoty, jež je rovna vrcholové pevnosti. Vycházíme-li z toho, že vrcholová pevnost je rovna maximální smykové pevnosti, pak u kyprého písku je vrcholová pevnost rovna pevnosti kritické.



Obr. 2.2. Průběh smykání kyprého a ulehlého písku (Atkinson, 2007).

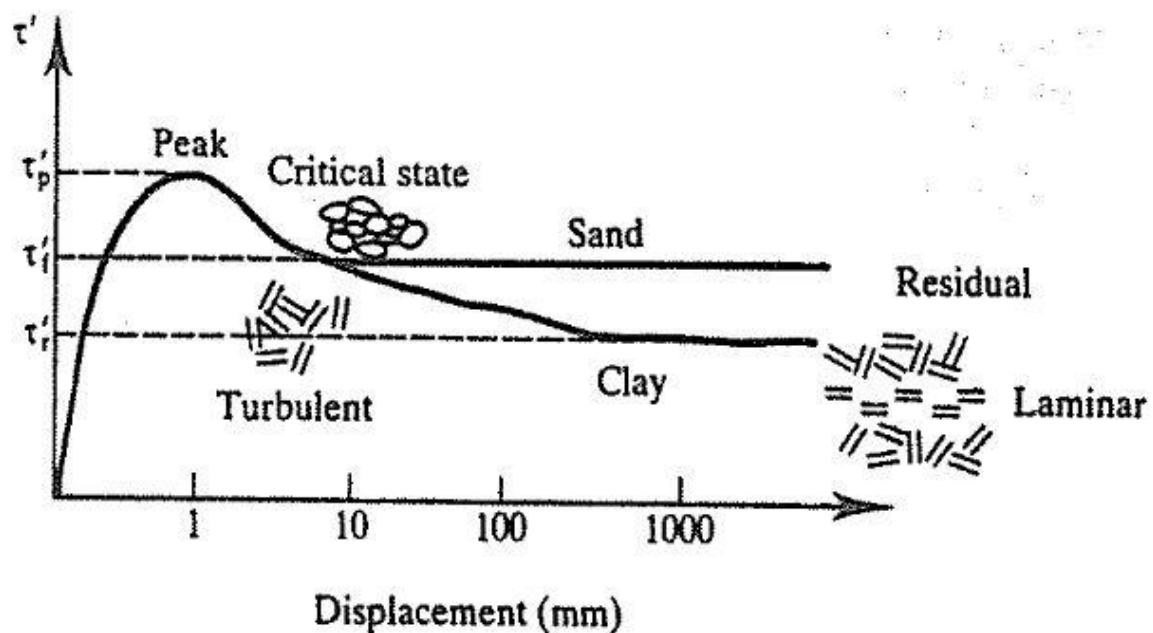
Jíly se během smykového namáhání chovají podobně jako ulehlá hrubozrnná zemina. Překonsolidované jíly mají však výrazně vyšší rozdíl mezi vrcholovou pevností a kritickou, jelikož zrna zeminy jsou do sebe více zaklíněna. Hlavním rozdílem u jílovitých zemín je, že kritická pevnost není pevností konečnou, ale při pokračujícím smyku klesá až na hodnotu reziduální (Mašín, 1999).

### 2.2.2 Kritická pevnost

Z definice vrcholové pevnosti je patrné, že závisí na počáteční struktuře zeminy. Přitom ať má zemina jakoukoli strukturu ukázalo se, že vždy dosáhne limitní hodnoty nazývané kritická pevnost. Kritická pevnost je však konečná pouze pro zeminy hrubozrnné. Během smyku, při přetvoření alespoň 10%, se dostane zemina do stavu turbulentního tečení, kdy se částice po sobě stochasticky pohybují. S tímto procesem souvisí také pórovitost. Ta se v případě ulehlé respektive kypré zeminy během smyku zvětší, respektive zmenší. Jestliže zemina vždy dosáhne kritického stavu při smykovém namáhání, pak na smykové ploše vždy dosáhne na pórovitost kritické hodnoty. Mluvíme potom o tzv. kritickém stavu (ideální zplastizování), kapitola 2.3.

### 2.2.3 Reziduální pevnost

Reziduální pevnost je charakteristická pro jemnozrnné jílovité zeminy. Jílovité zeminy jsou tvořeny dvourozměrnými destičkami v podobě jílových minerálů, ty se při dostatečně dlouhém smykovém přetváření laminárně uspořádají a dochází k tomu, že částice po sobě „kloužou“ za nejmenšího smykového odporu (napětí). V tomto okamžiku dosáhla zemina nejnížší možné hodnoty smykové pevnosti, reziduální pevnost.



Obr. 2.3 Graf závislosti smykového napětí na posunu (Atkinson, 2007).

Obrázek 2.3 ilustruje chování ulehlé písčité a jílovité zeminy během smykové zkoušky provedené ve smykové krabici. Pro zkoušku, znázorněnou na obrázku výše, byly počáteční podmínky nastaveny tak, aby vrcholová pevnost písku a jílu dosáhla stejné hodnoty. Zkouška byla prováděna do značně velkých smykových přetvoření, aby bylo dosaženo všech pevností popsanych v kapitolách 3.1.1, 3.1.2 a 3.1.3. Reziduální pevnost u jílu může být až 50% oproti kritické pevnosti a je důležitá pro navrhování staveb na starých sesuvných územích (Atkinson, 2007).

## 2.3 Kritický stav

Jak již bylo řečeno, zemina se při smykání dostane do jednoznačně definovaného stavu nazývaný kritický stav nebo také ideální zplastizování. Kritický stav je charakterizován pomocí čáry kritických stavů (CSL – Critical State Line),

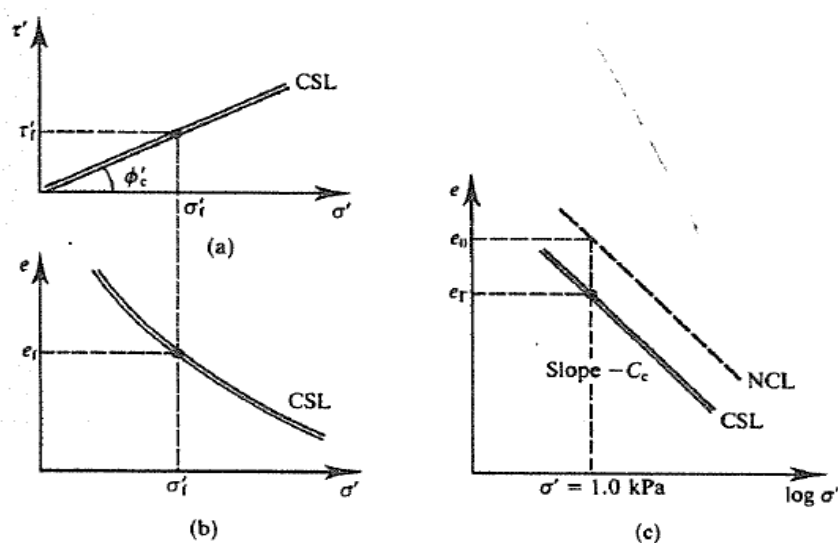
### 2.3.1 Stanovení CSL pro smykové zkoušky typu rotační smyková krabice

CSL je dána v případě ideálních smykových testů (smykové krabice) rovnicemi:

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \phi'_c$$

$$e_f = e_\Gamma - C_c \log \sigma'_f$$

kde  $\tau'_f$  a  $\sigma'_f$  je smykové, respektive normálové napětí při porušení v kritickém stavu,  $\phi'_c$  úhel vnitřního tření v kritickém stavu,  $e_f$  číslo pórovitosti při porušení v kritickém stavu,  $e_\Gamma$  číslo pórovitosti v kritickém stavu při  $\sigma' = 1,0 \text{ kPa}$  a  $C_c$  je sklon čáry normálního stlačení (NCL – Normal Compression Line). Grafické znázornění těchto rovnic neboli závislosti mezi smykovým napětím, normálovým efektivním napětím a číslem pórovitosti zeminy v kritickém stavu je znázorněno na obr. 2.4.



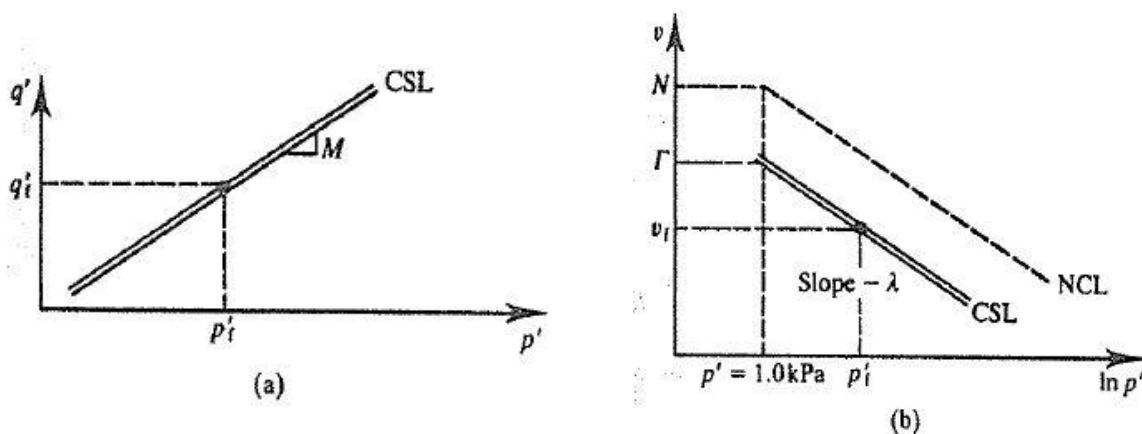
Obr. 2.4. Kritické stavy zemín (Atkinson, 2007).

Obr. 2.4 (a) a (b) vykreslují čáru kritických stavů a ukazují zvláštní vztah mezi smykovým napětím, efektivním normálovým napětím a číslem pórovitosti, (c) je potom shodné jako (b), avšak na ose x je normálové efektivní napětí v logaritmickém měřítku a je zde ještě vynesena čára normálního stlačení, jež je rovnoběžná s CSL.

### 2.3.2 CSL pro triaxiální zkoušky

Konvenční smykové přístroje, které slouží k přímému měření smykového napětí, neumožňují měření pórových tlaků, jelikož zkoušky v nich jsou drénované, tudíž vzniklé pórové tlaky ihned disipují a rovnají se nule a totální normálová a smyková napětí jsou rovna efektivním. Pro přesnější popis chování zemin je využíváno triaxiálních smykových přístrojů. Ty umožňují kontrolování axiálního a radiálního napětí, měření a vyvozování pórových tlaků a objemové změny zkoušeného válcového vzorku. V triaxiálních přístrojích je tedy možno přesně měřit a stanovit efektivní napětí a přetvoření.

Čára kritických stavů získána z triaxiálních zkoušek je ilustrována na obr. 3.5.



Obr. 2.5 Čára kritických stavů triaxiálních zkoušek (Atkinson, 2007)

CSL z předchozího obrázku se matematicky stanoví pomocí rovnic:

$$q'_f = Mp'_f$$

$$v_f = \Gamma - \lambda \ln p'_f$$

$q'_f$  je deviátorové (rozdíl axiálního a radiálního efektivního napětí) napětí při porušení,  $M$  směrnice CSL v zobrazení  $q':p'$ ,  $p'_f$  střední hlavní napětí při porušení, přičemž  $p' = \frac{1}{3}(\sigma'_a + 2\sigma'_r)$ ,  $v_f$  specifický objem při porušení,  $\Gamma$  specifický objem zeminy v kritickém stavu při  $p' = 1,0 \text{ kPa}$ .  $\lambda$  určuje gradient CSL a izotropní NCL, tyto dvě čáry jsou zároveň rovnoběžné. Parametry  $M$ ,  $\Gamma$  a  $\lambda$  popisují kritické stavy a jsou ekvivalentem pro  $\phi'_c$ ,  $e_\Gamma$  a  $C_c$  z předchozí kapitoly.

Když zemina dosáhne kritického stavu, tak její přetváření probíhá bez dalších změn smykového, normálového napětí a čísla pórovitosti a přetvoření je spojeno s turbulentním tečením. Znovu je třeba zdůraznit hlavní rysy kritických stavů a to, že je dosáhnou během smykání všechny zeminy nezávisle na počátečních podmínkách. Atkinson (2007) uvádí, že existence specifických kritických stavů zemin je na první pohled překvapující, avšak logická. Nejprve během smykového namáhání každá zemina musí dosáhnout jedinečného konstantního stavu, protože pokud by jej nedosáhla, docházelo by k pokračujícímu stlačování a zpevňování zeminy nebo naopak by zemina dilatovala a ztrácela pevnost, což je samozřejmě nemožné. Během smykání při počátečních podmínkách až do stavu kritického dojde k relativně velkým přetvořením a zemina je smykovým namáháním rekonstituována, tudíž „zapomene“ počáteční podmínky a dosáhne specifického stavu, který je nezávislý na podmínkách počátečních. Z předchozího tedy vyplývá, že parametry  $M$ ,  $\Gamma$  a  $\lambda$  a  $\phi'_c$ ,  $e_\Gamma$  a  $C_c$  závisí pouze na vlastnostech zrn zeminy a jedná se o materiálové parametry.

### 3 SOUČINITEL ZEMNÍHO TLAKU V KLIDU, $K_0$

Při řadě geotechnických analýz je třeba znát poměry napětí, tj. v jakém vzájemném poměru jsou horizontální a vertikální napětí. Naneštěstí v geotechnickém prostředí není hodnota tohoto poměru většinou k dispozici, jelikož neznáme historii změn napětí (zatížení, odlehčení, tektonika, jiné vlivy). Problémem není stanovení napětí svislého. U jakékoliv zeminy lze vertikální efektivní napětí jednoduše určit z objemové tíhy, mocnosti a gravitačního zrychlení. V případě zemin je nutno zahrnout Terzaghiho teorii efektivních napětí. Horizontální napětí se zpravidla dopočítá pomocí vzorce pro stanovení součinitele zemního tlaku v klidu  $K_0$  podle rovnice:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

kde  $\sigma'_h$  je horizontální efektivní napětí a  $\sigma'_v$  efektivní vertikální napětí.

Součinitel zemního tlaku v klidu  $K_0$  prezentoval poprvé v roce 1891 Donath (Mesri and Hayat, 1993) jako poměr horizontálního a vertikálního tlaku vyvozeného v zemině vertikálním zatížením za podmínek nulového bočního přetvoření.

Zemní tlaky vystupují jako vstupní parametr pro různé analýzy počínaje výpočtem plášťového tření na piloty, tlak na opěrné zdi, či v neposlední řadě jako počáteční podmínka v numerickém modelování. Podle normy ČSN 73 0037 - Zemní tlak na stavební konstrukce (1990), působí na konstrukci horizontální tlak v klidu  $\sigma_0$ , jestliže nedojde k vzájemnému posuvu konstrukce a zeminy. Dále norma předepisuje, že aktivní zemní tlak  $\sigma_a$  nastane, jestliže přemístění a přetvoření konstrukce směrem od zeminy je tak veliké, že dosáhne plné mobilizace smykové pevnosti na smykové ploše v zemině. Pokud se plné mobilizace smykové pevnosti dosáhne při přemístění a přetvoření směrem do zeminy, jedná se o pasivní zemní tlak  $\sigma_p$ . Příkladem může být vyklonění opěrné zdi od respektive do svahu. Pro výpočty zemních tlaků se využívá a vychází z teorie mezních stavů. Norma 73 0037 za tímto účelem zavádí součinitel spolehlivosti zeminy a součinitel spolehlivosti zatížení.

#### 3.1 $K_0$ normálně konsolidovaných zemin

Normálně konsolidovanou zeminou se rozumí zemina v přirozeném stavu uložení, která během sedimentace a po ní nepodléhala denudaci, tedy erozi terénu a změnám v poměru horizontálního napětí k vertikálnímu. Grafické znázornění normálně konsolidované zeminy je na obr. 4.4 v kapitole 4.5.2 Geotechnické vlastnosti brněnských jíílů.

Jednou z hlavních veličin, určujících hodnotu  $K_0$  je úhel vnitřního tření vycházející z třecí síly působící mezi zrny, z mezizrnných vazeb a z jejich geometrického uspořádání, tedy jak do sebe zrna zeminy zapadají.

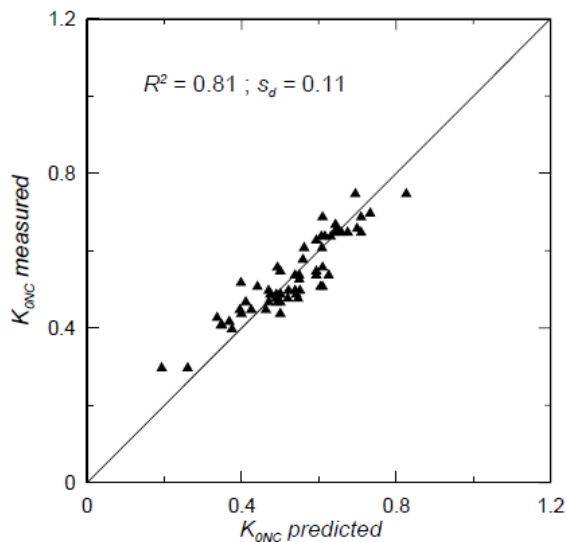
V roce 1944 Jáky postuloval vztah pro výpočet zemního tlaku v klidu (dále pouze  $K_0$ ):

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') \frac{1 + \frac{2}{3} \sin\varphi'}{1 + \sin\varphi'}$$

Tuto rovnici Jáky 1948 zjednodušil na tvar:

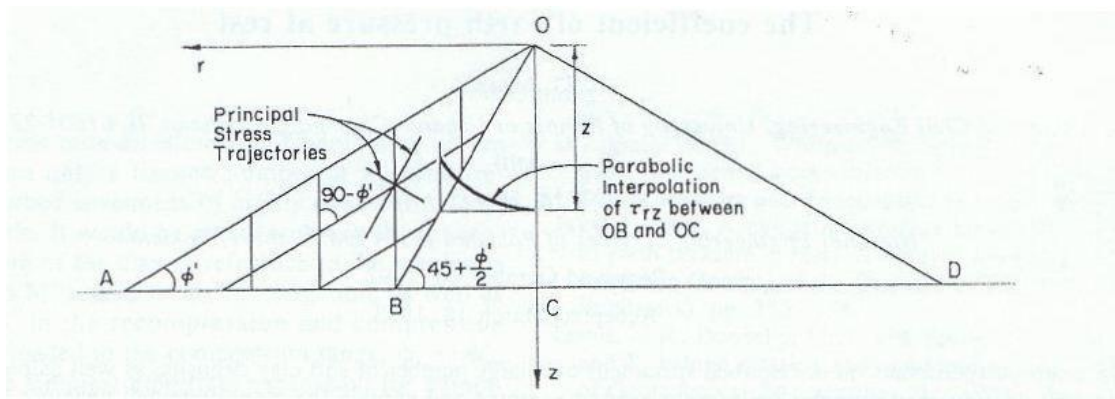
$$K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

V literatuře diskutující Jákyho rovnici, se často neuvádí pro jaký úhel vnitřního tření se má hodnota  $K_0$  počítat. Mesri a Hayat (1993) uvádějí, že je potřeba pracovat s efektivním úhlem vnitřního tření v kritickém stavu. Tato rovnice je tedy použitelná pouze pro normálně konsolidované jíly a zrnité materiály, které nebyly zhutněny například vibracemi. Ačkoliv byla navržena řada rovnic, žádná se tolik nepřiblížila svými výsledky experimentálním datům z laboratoří (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Korelace mezi naměřeným  $K_0$  (pro NC zeminy) a  $K_0$  z Jákyho zjednodušené rovnice (1948), (Federico et al., 2008).

Na obr. 3.2 je Jákyho zobrazení nasypaného kuželu písku, který je ve stavu rovnováhy a jeho vnitřní body a povrch kuželu jsou bez jakéhokoli pohybu. Horizontální tlak, působící na čáru OC, je zemní tlak v klidu.



Obr. 3.2. Jákyho formulace závislosti  $K_0$  na  $OC$  a úhlu vnitřního tření mobilizovaném na  $OAC$  (Mesri and Hayat, 1993).

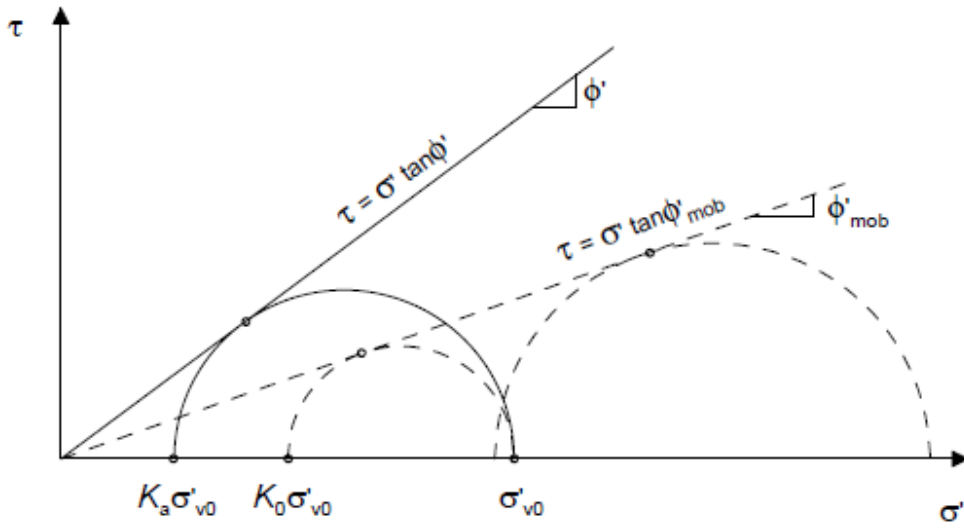
### 3.1.1 $K_0$ z hlediska mobilizovaného úhlu vnitřního tření

Během jednoosého stlačení sedimentované normálně konsolidované jemnozrnné i hrubozrnné zeminy zůstává mobilizovaný úhel vnitřního tření prakticky konstantní, protože měření ukazují konec primárního koeficientu zemního tlaku v klidu, jež je prakticky nezávislý na vertikálním efektivním napětí. Protože pohyb částic během jednoosého stlačení je podobný pohybu částic během aktivního smyku, kde je umožněna boční deformace,  $K_0$  může být definováno jako mobilizovaný úhel vnitřního tření (Mesri and Hayat, 1993):

$$K_0 = \frac{1 - \sin\phi'_{mob}}{1 + \sin\phi'_{mob}}$$

kde  $\phi'_{mob}$  je mobilizovaný úhel vnitřního tření.

Tento vztah byl navržen Terzaghim (1923) (Mesri and Hayat, 1993). Ačkoliv mobilizovaný úhel vnitřního tření nemůže být během jednoosého stlačení přesně měřen, může být korelován s vrcholovým efektivním úhlem vnitřního tření (Federico et al., 2008). Posledně citovaní autoři ve svém článku uvádějí, že  $K_0$  pro normálně konsolidované zeminy může být vypočítáno pomocí mobilizovaného úhlu vnitřního tření, získaného z jednoosého stlačení přímo z geometrie Mohrových kružnic napětí (obr. 3.3). Přesto však doporučují použití Jákyho vztahu.



Obr. 3.3. Mohrovy kružnice napětí pro zeminu v porušení a během podmínek jednoosého zatížení (Federico et al., 2008).

## 4 GEOLOGIE OBLASTI ZÁJMU

Vzorky použité na laboratorní zkoušky byly odebrány v Brně v rámci průzkumu pro Velký městský okruh (VMO). Z geologického hlediska se Brno nachází na styku dvou regionálně geologicky významných celků – Český masiv a Západní Karpaty, jak je znázorněno na obr. 4.1.



Obr. 4.1. Geologická mapa stavby kontaktu Českého masivu a Západních Karpat (Pavlová, 2011)

### 4.1 Geologický vývoj území

Z hlediska stratigrafie jsou nejstaršími celky oblasti brunovistulikum a moravikum, jež zaznamenaly největší proměny během svrchního proterozoika až svrchního paleozoika. Moravikum je tvořeno vulkanosedimentárním komplexem hornin proterozoického stáří, který prošel metamorfózou během kadomské orogeneze, kdy do okolního horninového prostředí pronikalo granitové magma. Výslednou horninou jsou dnes známé tzv. bítešské ortoruly.

Brunovistulikum je výrazně překryto mladšími geologickými jednotkami a na povrch vystupuje pouze v podobě Brněnského masivu, viz kapitola 4.2.

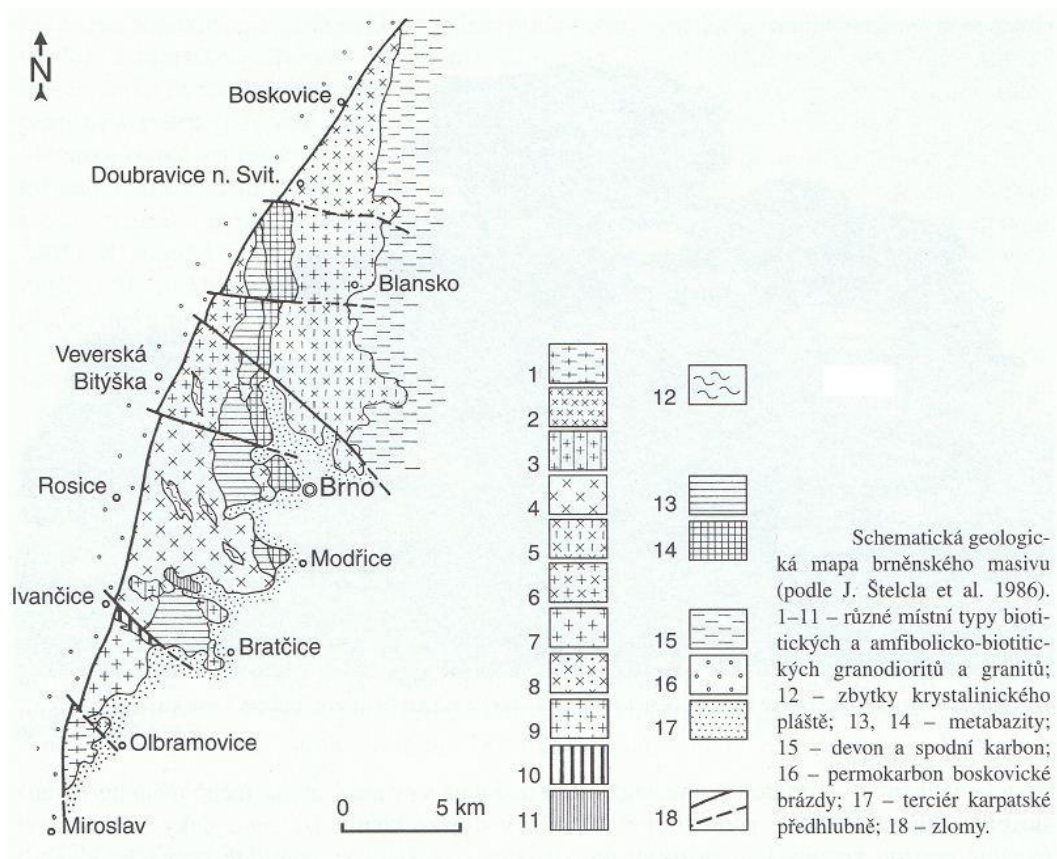
V období devonu zde došlo k vytvoření hluboké deprese podél tektonických linií, jež probíhala severojižním směrem a k následné sedimentaci karbonátových sedimentů, které daly později za vznik Moravskému krasu.

V období spodního karbonu došlo ke kolizi moldanubika a brunovistulika, následkem čehož se vytvořilo orogenní pásmo, v jehož předpolí se vytvořila moravskoslezská kulmská pánev (Müller, Novák, et al. 2000). Následkem rozpadu variského orogenu byla celá oblast výrazně postižena stříhovými pohyby, což vedlo ke vzniku depresí, z nichž nejvýznamnější je tzv. Boskovická brázda. Během sp. karbonu až svrchního permu zde probíhala limnická a fluviální sedimentace zejména pískovců a prachovců, místy s vložkami slepenců. Etapa po konci variské orogeneze sestávala z exogenních pochodů, které postupně peneplenizovaly reliéf. Další fáze sedimentace se zde objevila až s nástupem jury. Kdy docházelo k sedimentaci fluviálního a mělkého marinního materiálu. Mořská transgrese zaplavila koncem střední jury nejen brunovistulikem, ale i Český masiv a došlo k další sedimentaci vápenců.

Spodní křída přinesla ústup mořské hladiny a její opětovné zvýšení cenomanu. Dalším významným geologickým obdobím byl terciární neogén, který je podrobněji popsán v kapitole 4.4.

#### **4.2 Brněnský masiv**

Označení brněnský masiv se používá pro východní část Českého masivu, zhruba severozápadně od Brna. Vystupuje mezi obcemi Miroslav, Šebetov a Brnem. Jedná se o těleso tvořené krystalickými horninami kadomského stáří spadající pod geologickou jednotku brunovistulika. Tato jednotka se rozkládá přibližně od Krakova na sever až po Dunaj na jih. Na východ pokračuje podle geofyzikálních údajů pod příkrovy Západních Karpat až k preapeninskému lineamentu. Brněnský masiv (obr. 4.2), je omezen ze západu tektonickým porušením v podobě Boskovické brázdy a ze směru jihovýchodního na něj transgresně nasedají sedimenty karpatské předhlubně neogenního charakteru (Müller, Novák, et al. 2000). Během variské orogeneze (cca 400-330 mil. let), kdy došlo ke kolizi bloků dnešního moldanubika a brunovistulika, se dostal brněnský masiv do současné polohy, tedy do pozice ve východní části Českého masivu. Masiv je rozdělen centrálním bazickým pásmem na granodiority východní a západní oblasti, s výrazným zastoupením hornin metamorfního pláště. Východní granodioritová oblast je tvořena biotitickými a amfibolitickými granodiority a tonality. Tyto horniny jsou prostoupeny četnými intruzemi granitů, aplitů a pegmatitů. Západní granodioritová oblast je velmi pestrá zóna magmatických hornin ne příliš různých od hornin v části východní (Müller, Novák, et al. 2000).



Obr. 4.2. Schematická geologická mapa brněnského masivu (Chlupáč et al., 2002)

### 4.3 Západní Karpaty

Soustava západních Karpat byla formována během alpinské orogeneze, přičemž nejvýraznější přetváření probíhalo od svrchní křídy do terciéru, a je tedy značně mladší než Český Masiv. Hlavním faktorem zde byla kolize jižnější africké litosférické desky s deskou Evropy, jež byla konsolidována během variské orogeneze. Západní Karpaty jsou součástí horského pásma, které je možno sledovat od Pyrenejí, přes Alpy a Karpaty až do Himalájí (Chlupáč et al., 2002). Západní Karpaty na území České republiky zasahují jen malou vnější částí v podobě flyše tvořeného druhohorními a třetihorními horninami. Do této části zahrnujeme i tzv. karpatskou předhlubeň tvořenou mořskými a sladkovodními sedimenty. Sedimentační záznam karpatské předhlubně začal v pozdním egeru/eggenburgu (20 mil. let) a ukončen byl až na počátku badenu (15,97 mil. let), (Gradstein et al., 2004 in Nehyba et al., 2008). Jedná se o depresi v předpolí karpatského horstva diskordantně uloženou na Českém masivu a nořící se na východ pod flyšové pásmo Západních Karpat. Na našem území se předhlubeň rozprostírá od oblasti Mikulova přes Přerov až na Ostravsko, tedy hlavní směr protažení je SV-JZ a SZ-JV zasahuje svými výběžky k České Třebové a Opavě. Dále pokračuje na jihu do Rakouska a na severu do Polska.

#### 4.4 Neogén

Miocénní sedimenty, konkrétně sedimenty neogenního stáří, jsou v Brně a jeho okolí velmi rozšířenou jednotkou. V této kapitole se zaměřím na popis období, kdy se ukládaly nevrstevnaté vápnité jíly tzv. „tégly“.

Sedimenty na Brněnsku jsou tvořeny komplexy mořských sedimentů eggenburgu, sladkovodních až mírně brakických uloženin ottnangu, mořských sedimentů karpátu a spodního bádenu (morav) a říčních uloženin, řazených stratigraficky do středního až svrchního miocénu a pliocénu (Müller, Novák, et al., 2000). Z těchto sedimentů jsou plošně nejvíce rozšířené výše zmiňované tégly, jež se ukládaly v období spodního bádenu (morav).

Chlupáč et al. (2002) uvádí, že nástup spodnobádenské sedimentace nebyl synchronní. Dále píše, že v hlubokých depresích předbádenského povrchu začíná sled sutěmi a brekciemi povětšinou kontinentálního původu, výše převládají klastické sedimenty mořského původu, jako jsou písky a štěrky. Až v hlubších částech pánve se ukládaly vápnité nevrstevnaté jíly – tégly. Dle Müllera, Nováka et al. (2000), docházelo ještě k sedimentaci řasových a písčitých vápenců. Spodnobádenskou transgresi lze rozdělit na dvě fáze přerušené krátkou regresí. První, jež byla situována tzv. ústřední spodnobádenskou depresi a druhá, během které sedimentovaly šedozelelé a hnědozelelé nevrstevnaté vápnité jíly – tégly, které většinou ostře nasedají na své podloží (Chlupáč et al., 2002). Tyto sedimenty jsou bohaté na mikrofaunu.



nevrstevnatých vápnných jílech, obsahujících různý podíl prachové a písčité příměsi. Písčítá příměs je zde zastoupena polohami málo mocnými, či výskyty v podobě čoček. Ve vyšších polohách, respektive malých hloubkách, nacházíme uloženiny charakteru šterkopísků.

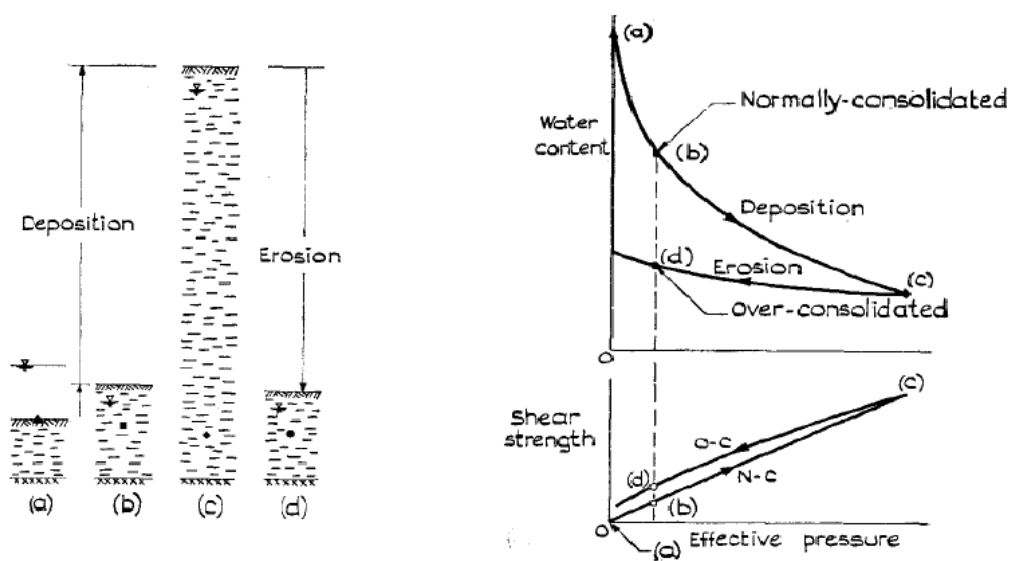
Geotechnické podmínky těchto jílu jsou z hlediska zakládání staveb nepříznivé a vyžadují speciální způsoby zakládání. Mají soudržný charakter a jsou náchylné k objemové nestálosti, lze tedy u nich předpokládat procesy smrštění a zpětného bobtnání, dále se vyznačují malou pevností a vysokou stlačitelností. Tyto negativní vlivy je nutno dopředu zjišťovat pečlivým inženýrsko-geologickým průzkumem a laboratorními experimenty.

#### 4.5.2 Geotechnické vlastnosti brněnských jílu

Neporušené vzorky jílu byly odebrány z hloubky 15 – 19 metrů v rámci geotechnického průzkumu pro VMO Dobrovského v Brně. Jednalo se o monitorovací vrty EXTII/6 a INK 17 provedené v roce 2007.

Brněnské jíly jsou ve zdravém stavu barvy zelenošedé, v přípovrchové zóně je barva ovlivněna pronikáním limonitických roztoků z vyšších poloh (šterkopísky, písky). Na odebraných neporušených vzorcích je patrná jejich značná tektonická porušenost. Jíly jsou blokovitě až úlomkovitě rozpadavé, ve větších hloubkách se objevují až několik centimetrů velké krystaly sádrovce. Neogenní jíly jsou tuhé až pevné konzistence s vysokou plasticitou.

Důležitou faktorem je značná překonsolidace brněnských jílu. Překonsolidace je termín označující zeminu, která po své sedimentaci či během ní, prodělala napjatostní změny. Hovoříme-li o překonsolidaci je důležité rozlišovat překonsolidaci zdánlivou, jež je způsobena fenoménem známým jako creep (deformace při konstantním efektivním napětí), pak hovoříme o tzv. pseudopřekonsolidaci, a překonsolidaci způsobenou změnou napjatostních podmínek v zemině. Druhý případ lze jednoduše popsat pomocí obrázku Obr. 4.4.



Obr. 4.4. Schéma vzniku překonsolidované zeminy (Skempton, 1964 in Boháč, 2009)

Levá část obr. 4.4 ukazuje procesy sedimentace, jež jsou interpretovány v pravé části pomocí grafů závislosti (shora) obsahu vody (čísla pórovitosti) na efektivním napětí a smykové pevnosti na efektivním napětí.

#### 4.5.3 Indexové zkoušky

Tabulka 4.1 znázorňuje indexové zkoušky převzaté z práce Svobody (2010), který prováděl laboratorní měření na stejných vzorcích odebraných z vrtů EXTII/6 a INK 17. Tabulka také obsahuje Zatřídění podle již zrušené normy ČSN 73 1001.

<i>Zkušební vzorky: neogenní jíly z úrovně 15,2 a 19,5 m</i>	
Přirozená vlhkost $w$	29,9 – 31,6 %
Vlhkost na mezi plasticity $w_p$	33,7 – 34,6 %
Vlhkost na mezi tekutosti $w_l$	74,3 – 76,7 %
Index plasticity $I_p$	39,7 – 42,1 %
Index konzistence $I_c$	0,96 – 1,08
Zatřídění dle ČSN 73 1001, ČSN EN ISO 14688 - 2	F8 CV, cISi

Tab. 4.1. Indexové zkoušky (podle Svobody, 2010).

#### 4.6 Hydrogeologické podmínky

Co se týče hydrogeologických podmínek vztažených na neogenní jíly, tak oběh podzemní vody v těchto vrstvách prakticky neexistuje. Vzhledem k nadložním kvartérním sedimentům se chová jílový masiv jako hydrogeologický izolátor.

## 5 DATA Z PŘEDCHOZÍCH PRACÍ

Jedním z impulzů pro tuto diplomovou práci byl rozpor v naměřených datech z předchozích prací Boháče (1999) a Svobody (2010). Oba autoři prováděli laboratorní zkoušky za účelem získání pevnostních charakteristik na neporušených i rekonstituovaných vzorcích brněnských neogenních jílu. Avšak jejich výsledky kritické pevnosti se do značné míry lišily.

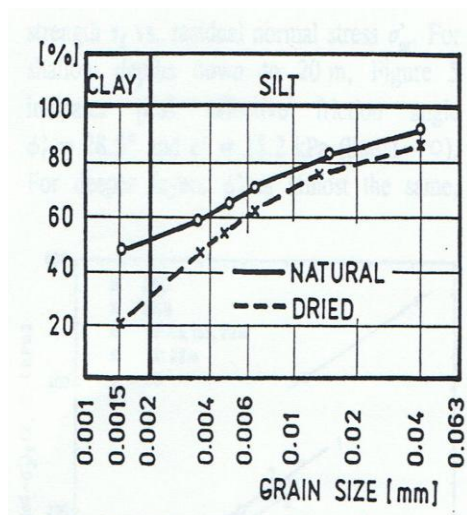
### 5.1 Srovnání předchozích dat

Jak již bylo řečeno, oba autoři pracovali s brněnskými jíly. Odebrané vzorky sice nebyly ze stejné lokality, avšak provedené indexové zkoušky potvrzují, že se jednalo velmi podobný geologický materiál, viz tab. 5.1.

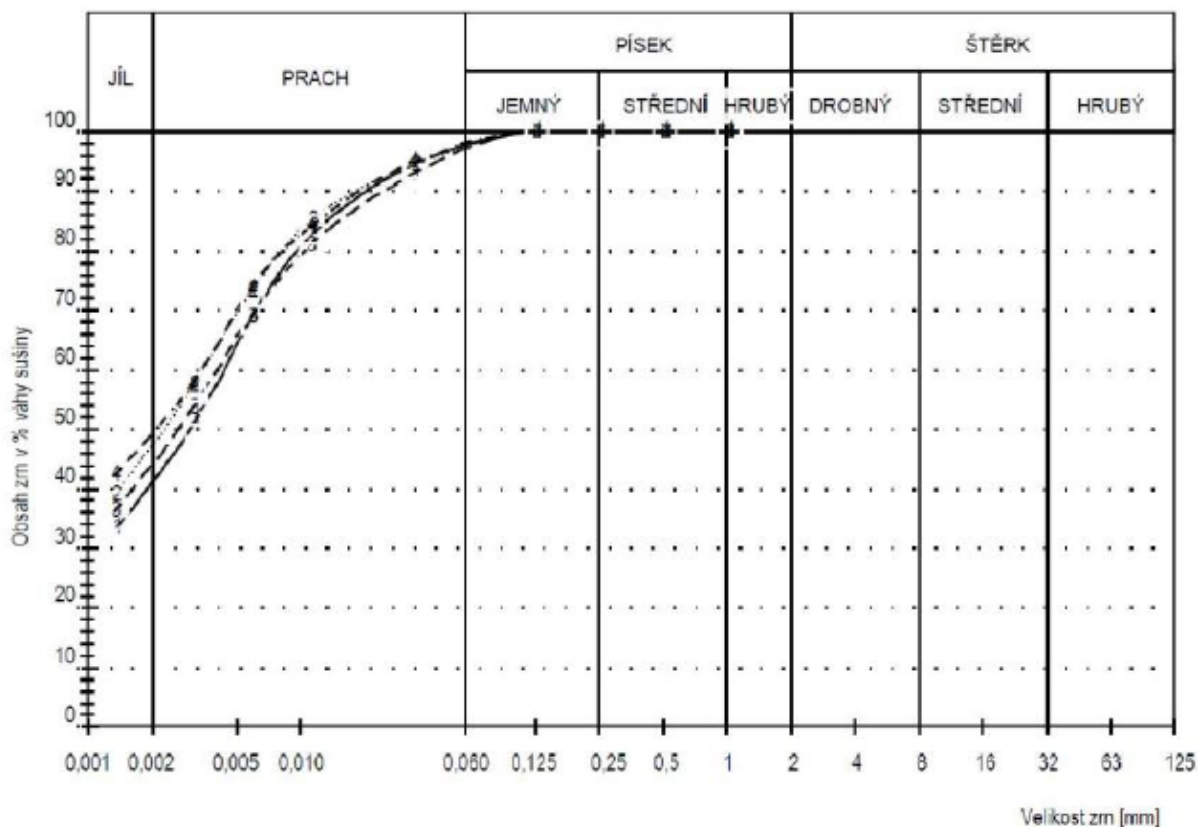
Indexové zkoušky	Svoboda	Boháč
$I_p$	39,7 - 42,1 %	43-60%
$w_p$	33,7 - 34,6 %	27-38%

Tab. 5.1. Indexové zkoušky ( $I_p$  – index plasticity,  $w_p$  – vlhkost na mezi plasticity).

Přesnější srovnání charakteru zeminy vyplývá ze zrnitostních křivek vykreslených na obrázcích 5.1 a 5.2 pod textem.



Obr. 5.1 Zrnitostní křivka brněnského jílu pro zeminu vysušenou v peci a pro zeminu bez předchozího vysušení (Boháč et al., 1995).



Obr. 5.2. Zrnitostní křivky brněnského jílu (Pavlík et al., 2003 in Svoboda, 2010).

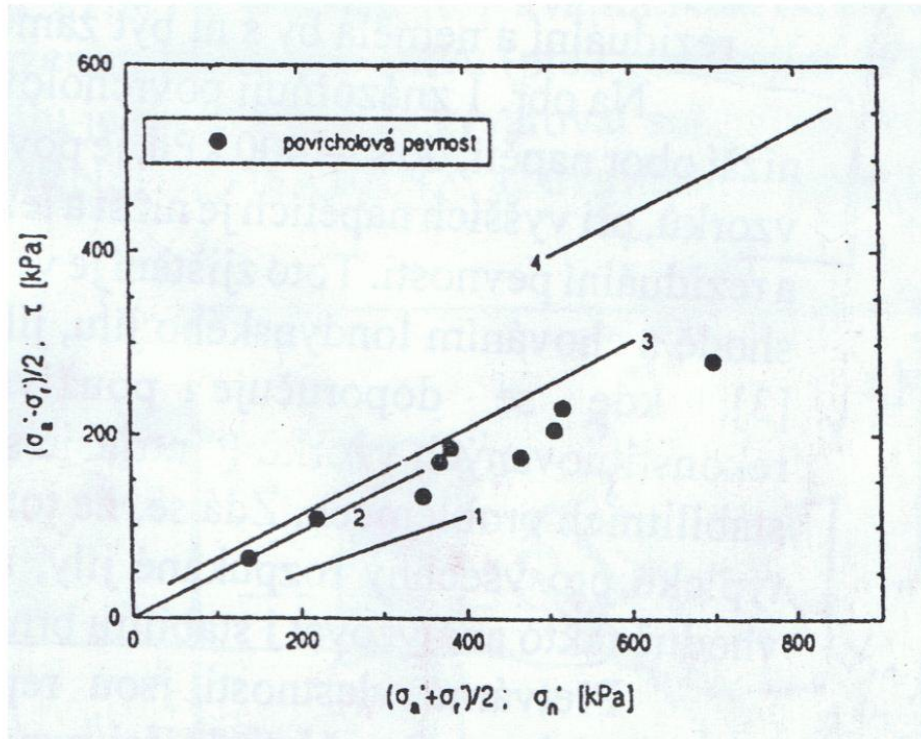
Ze zrnitostní křivky na obr. 5.2 je patrný určitý rozptyl hodnot v propadu jemnější frakce prachovité složky. Přesto ze srovnání obou zrnitostních zkoušek je patrné, že se jedná zhruba o stejnou jílovitou zeminu.

Co se týče mineralogie, tak provedené rentgenové difrakce ukazují opět zhruba stejně mineralogické složení. Rozdíly jsou pouze v minerálech jílových, kdy například materiál použitý Svobodou (2010) obsahuje zhruba 5% kaolinitu, kdežto jíl zpracovaný Boháčem (1999) obsahuje tohoto minerálu cca 23%.

### 5.1.1 Zkoušky provedené Boháčem

Boháč (1999) při svých zkouškách na rekonstituovaných vzorcích, v rámci průzkumu pro Boby centrum Brno, v triaxiálním přístroji postupoval standardním způsobem. Pasta byla připravena rozmícháním při vlhkosti nad mezí tekutosti, následně byly umístěny do válců o průměru 38 mm a konsolidovány při napětí 50 kPa. Po skončení jednoosé konsolidační fáze byly vzorky podrobeny triaxiální smykové zkoušce CIUP. Výsledky zkoušek byly zpracovány do grafů znázorněných na obr. 5.1. Zkoušky provedené Boháčem také poukazují na fakt, že je nutné dbát na to, aby rekonstituované vzorky nebyly během přípravy nikterak vysušovány. Boháč et al. (1995) uvádí, že proces vysušení v peci (teplota cca 105°) zapříčiní vznik vazeb a z nich plynoucí vyšší pevnost, tuhost a odlišný

způsob mechanického chování rekonstituovaných vzorků. Vznik vazeb se projeví při zkoušce dilatanci před dosažením kritického stavu.



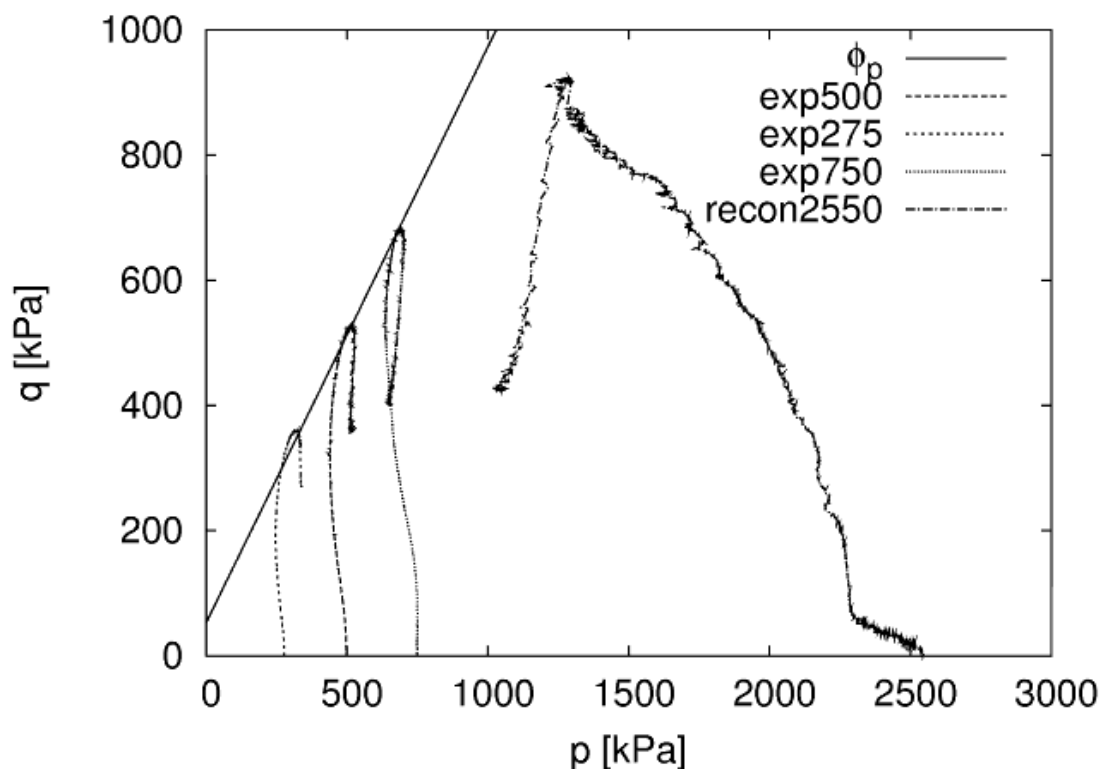
Obr. 5.3. Pevnost brněnského jílu (Boháč et al., 1995).

Na obr. 5.3 je důležitá přímka číslo 2, jež udává čáru kritického stavu rekonstituovaných vzorků (CSL Critical State Line).

Další fází zkoušek na rekonstituovaném materiálu byly zkoušky v translační smykové krabici. Ty byly však prováděny v rámci zjištění reziduální pevnosti brněnských jílu.

### 5.1.2 Zkoušky provedené Svobodou

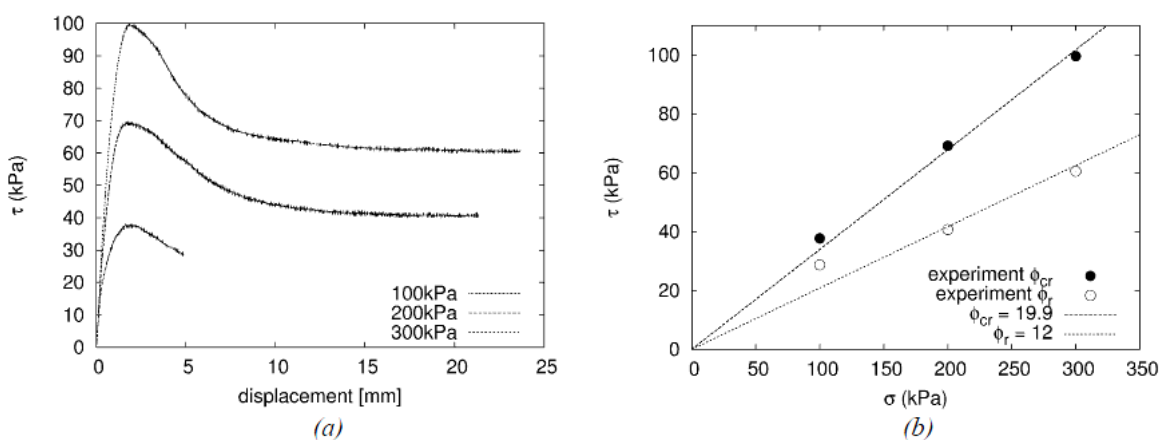
Svoboda (2010) postupoval při svých zkouškách obdobně jako Boháč, tedy rekonstituovaný vzorek připravil ze zeminy, odebrané v rámci průzkumu pro VMO Dobrovského. Izotropní konsolidaci rekonstituovaného vzorku provedl Svoboda v režimu přírůstků radiálního napětí do vysoké hodnoty 2550 kPa, aby ověřil sklon čáry normálního stlačení NCL (Normal Compression Line), jež mu vyšla z dalších zkoušek. Výsledek zkoušky na rekonstituovaném vzorku je společně s výsledky ze zkoušek na vzorcích neporušených uveden na obr. 5.4, kde křivka „recon2550“ vykresluje průběh triaxiální zkoušky na rekonstituovaném vzorku a „exp275, 500 a 750“ jsou zkoušky na vzorcích neporušených.



Obr. 5.4 Efektivní dráhy napětí a proložená obálka pevnosti ve vrcholovém stavu neogenního jílu (Svoboda, 2010).

Dále provedl Svoboda zkoušky na rekonstituovaném materiálu v rotační smykové krabici. Použitá rotační smyková krabice byla totožná i v případě mnou provedených zkoušek (typ Bromhead). Svoboda se při realizace zkoušek řídil tvrzením, že vrcholová pevnost rekonstituovaného vzorku naměřená rotačním smykovým přístrojem odpovídá kritické pevnosti zeminy (Najser and Boháč 2005). Touto představou jsem se řídil i já při provádění laboratorních experimentů.

Zkoušky byly provedeny při normálových napětí 100, 200 a 300 kPa. Naměřená data jsou na obr. 5.5.



Obr. 5.5. (a) Pracovní diagramy zkoušek v rotačním smykovém přístroji, (b) stanovení obálek pevnosti brněnského jílu (Svoboda, 2010).

## 5.2 Shrnutí výsledků dat z předchozích prací

Výsledky naměřené Boháčem a Svobodou jsou shrnuty v tabulce 5.2. Tabulka ukazuje pevnostní charakteristiky brněnského jílu z lokalit VMO Dobrovského a Boby centrum Brno. Z této tabulky je patrný značný rozdíl v naměřené kritické pevnosti.

Další diskuse nad těmito výsledky proběhne v konečném shrnutí diplomové práce, společně se mnou naměřenými výsledky.

Konstrukce (lokalita)	VMO Dobrovského		Boby centrum Brno	
Pevnost brněnského jílu	$c'$ (kPa)	$\varphi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\varphi'$ (°)
<i>Vrcholová pevnost <math>\varphi_p</math></i>	28	23,7	18	28
<i>Kritická pevnost <math>\varphi_{cr}</math></i>	0	19,9	0	27,7
<i>Reziduální pevnost <math>\varphi_{res}</math></i>	0	12	0	14,5

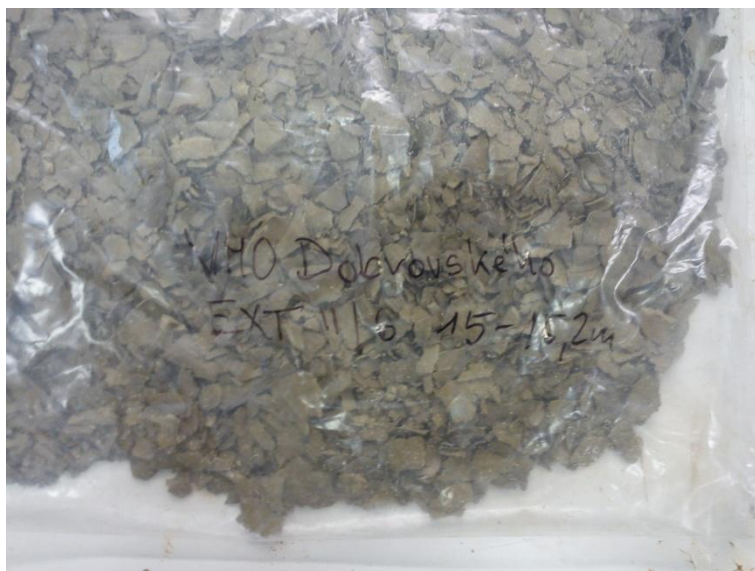
Tab. 5.2. Pevnostní charakteristiky brněnského jílu (podle Svobody, 2010).

## 6 LABORATORNÍ EXPERIMENTY

Kritická pevnost brněnských jílu byla stanovována laboratorně za pomoci triaxiálních přístrojů a rotačního a translačního smykového přístroje. Konkrétně bylo uskutečněno sedm zkoušek trojosých, čtyři v rotační smykové krabici a jedna zkouška ve smykovém přístroji translačním. Všechny laboratorní zkoušky byly prováděny na rekonstituovaném materiálu z brněnských téglů.

### 6.1 Příprava rekonstituovaného materiálu

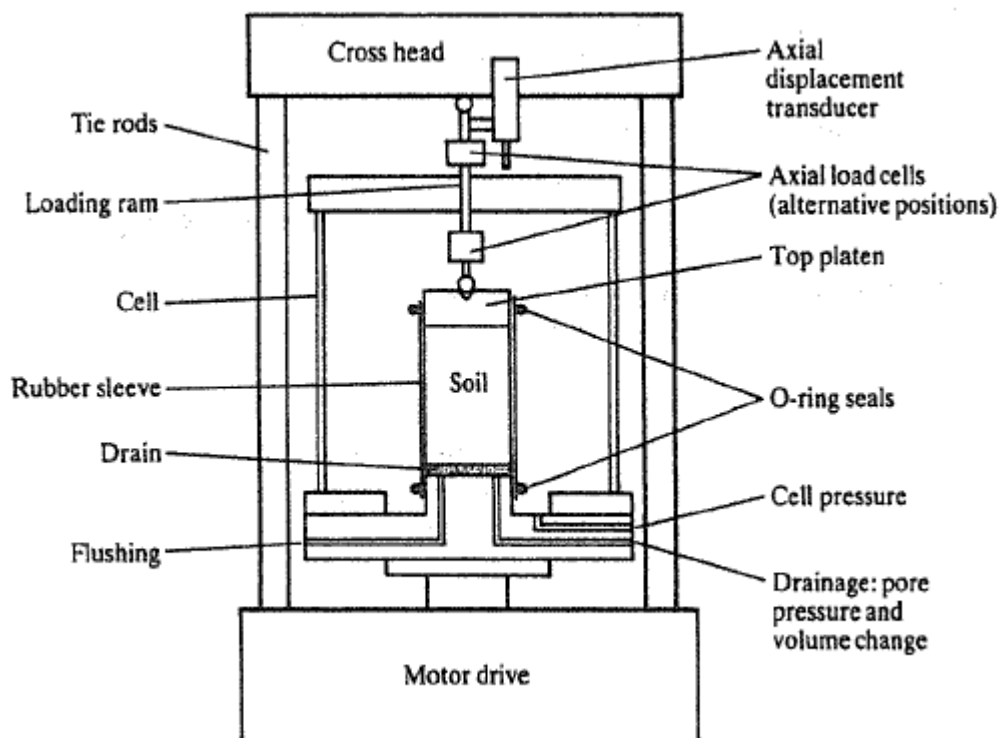
Pro experimenty byla použita rekonstituovaná pasta připravená z neporušených vzorků brněnských jílu. Neporušené vzorky byly odebrány z hloubky 15 – 19 m v rámci geotechnického průzkumu pro VMO Dobrovského v Brně. Jednalo se o monitorovací vrty EXTIII/6 a INK 17 provedené v roce 2007. Samotná příprava rekonstituovaného materiálu sestává ze smíchání nastrouhaného jílu (obr. 6.1) s pitnou vodou. Smíchání jílu s vodou bylo realizováno v hnětacím přístroji a doba míchání se pohybovala kolem tří až pěti dní. Je důležité, aby vzniklá hmota byla promíchávána do vzniku homogenní pasty. Množství vody v pastě by se mělo rovnat zhruba 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti, což v tomto případě bylo zhruba 110%. Tato vlhkost by měla zajistit, že při práci s rekonstituovaným materiálem by nemělo docházet ke vzniku nevyplněných „bublinek“, například při vyplňování konsolidačního válce v rámci přípravy vzorku pro triaxiální zkoušku.



Obr. 6.1. Nastrouhaný brněnský jíl (velikost jednotlivých „zrn“ je cca 3-5 mm).

## 6.2 Triaxiální zkoušky

První ze série laboratorních zkoušek, prováděných na brněnských neogenních jílech, byly realizovány v triaxiálních přístrojích. Jednalo se o standardní triaxiální komoru a o hydraulickou „Bishopovu“ triaxiální komoru (Bishop a Wesley, 1975). Obě komory jsou součástí vybavení laboratoří mechaniky zemin oddělení Inženýrské geologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Rozdílem u obou komor je jakým způsobem vyvozují vertikální napětí (zatížení) na osazený vzorek. V případě Bishopovy komory, je axiální napětí vyvozováno prostřednictvím hydraulické komory, jež je umístěna v dolní části přístroje a je v přímém kontaktu s komorou triaxiální. Vertikální posun hydraulické komory je zajištěn externím zařízením pro vyvozování tlaku, v tomto konkrétním případě byl použit digitální kontroler GDS. Rychlost smyku se volí pomocí přírůstku objemu za určitou dobu. Standardní triaxiální komora, je osazena do mechanického lisu, který vyvozuje vertikální napětí přímo na trojosou komoru. Mechanický lis je vybaven analogovým ukazatelem rychlosti, který pracuje v jednotkách mm/min. Podstavy obou trojosých komor jsou vybaveny vstupy, respektive výstupy pro horní a dolní drenáž vzorku, komorový tlak a další přídatná zařízení. Obecné schéma triaxiální komory je znázorněno na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Obecné schéma triaxiální komory (Atkinson, 2007).

Izotropní napětí je vyvozováno v komoře pomocí hydraulických kontrolerů GDS. Ty umožňují nastavení a sledování izotropního napětí a objemových změn v komoře. Kontrolery GDS dále slouží pro vytvoření pórových tlaků ve vzorku, sledování objemových změn ve vzorku při sycení vzorku,

fázi konsolidace nebo v průběhu drénovaných zkoušek. Vzniklé pórové tlaky jsou měřeny pomocí snímačů pórových tlaků. Deviátorové napětí (rozdíl axiálního a radiálního napětí) je v obou triaxiálních přístrojích měřeno pomocí vertikálních snímačů napětí „loadcell“. Loadcell je umístěna uvnitř trojosé komory a je tak zajištěno přímé měření napětí na plochu vzorku. Snímač je napuštěný olejem, který přenáší prostřednictvím membrány komorový tlak a měření síly jím tudíž není ovlivněno. Nemusí se tedy provádět korekce na jeho změnu. Axiální přetvoření při samotné zkoušce je měřeno dvěma způsoby, interně a externě. Interní měření, tedy měření uvnitř trojosé komory, je zajištěno pomocí ponorných LVDT snímačů deformace, které se instalují přímo na zkoušený vzorek. Naopak měření externí je odečítáno na digitálních úchytkoměrech, jež jsou pevně uchyceny na konstrukci mechanického lisu a měří tedy posun celé komory vůči lisu. Všechna zařízení popsána výše jsou před každou zkouškou kalibrována a připojena k osobnímu počítači, který prostřednictvím speciálního softwaru zapisuje digitální data na pevný disk v určitých intervalech.

#### 6.2.1 Příprava vzorků

Pro potřebu triaxiálních zkoušek byly vytvořeny vzorky z rekonstituovaného materiálu (kapitola 2.1). Pasta o vlhkosti zhruba 110% byla postupně nanášena do dutého válce průměru 38 mm. Válec (konsolidometr), osazen drenáží na obou podstavách, sloužil k jednoosé konsolidaci materiálu (obr. 6.3). Přitěžování bylo aplikováno krokově až do napětí 70 kPa. V průběhu konsolidační fáze je třeba dávat pozor, aby chystaný vzorek nijak nevyschl. Po konsolidační fázi, za kterou bylo považováno relativní ustálení deformací, byl vzorek opatrně z válce vytlačen (obr. 6.4) a upraven na potřebnou výšku. V rámci triaxiálních přístrojů byly prováděny zkoušky na dvou typech vzorků, standardních 76 mm vysokých a na vzorcích výšky 38 mm opatřených kluznými destičkami (6.2.2), průměr obou typů vzorků nepřesahuje 38 mm.



Obr. 6.3. Konsolidační fáze přípravy vzorku.



Obr. 6.4. Vytlačování vzorku.

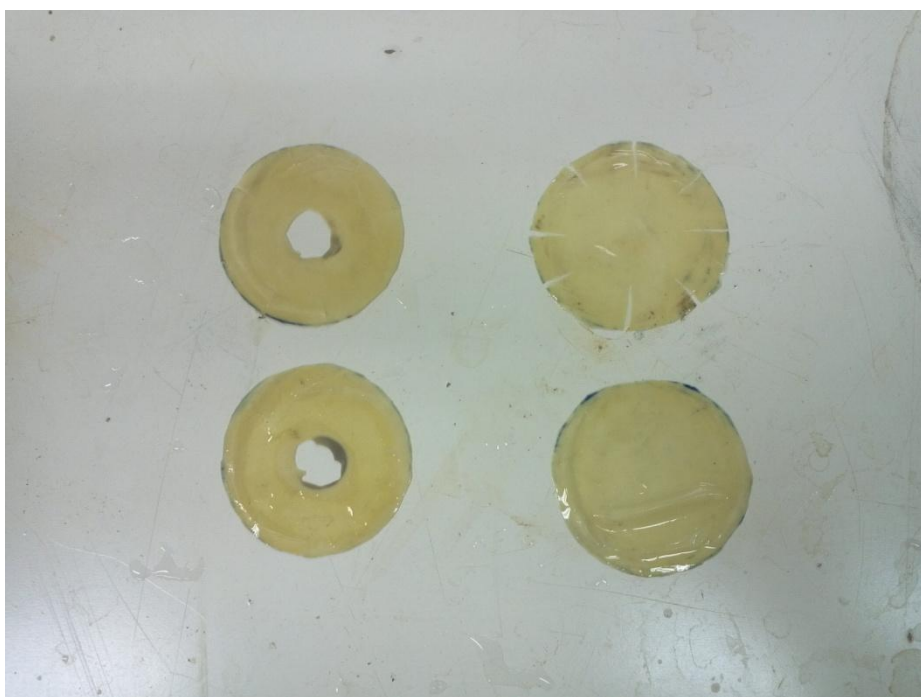
### 6.2.2 Kluzné destičky

Při standardním uspořádání trojosé zkoušky, kdy jsou podstavy vzorku výšky 76 mm a průměru 38 mm opatřeny porézními destičkami pro drenáž vzorku, dochází na kontaktu zeminy a drenážních destiček ke vzniku tření, které způsobuje snížení radiální deformace a nehomogenitu pole napětí. To způsobuje, že vzorek při smykovém namáhání získává tvar soudku. Ke snížení tohoto jevu lze použít metody kluzných destiček. V případě laboratorního stanovení kritické pevnosti brněnských jíílů jsem použil speciálních podstav (obr. 6.5), na které byly nanесeny vrstvy silikonové vazelíny a destiček vystřižených z gumové membrány (obr. 6.6) podle Boháče (1991) takto:

- dolní podstava – na dolní hliníkovou podstavu s drenážní destičkou uprostřed, byla nanесena tenká vrstva silikonové vazelíny, na níž se posadí dva kruhové plátky vystřižené z membrány tloušťky cca 0,3 mm, mezi nimiž je také vrstva silikonové vazelíny. Oba plátky z membrány mají uprostřed díru o průměru porézní destičky dolní podstavy, aby byla umožněna drenáž vzorku.
- horní podstava – horní hliníková podstava nemá, na rozdíl od spodní, porézní destičku. Počet a pořadí vrstev gumové membrány a silikonové vazelíny je stejný jako u podstavy dolní.



Obr. 6.5 Podstavy pro zkoušku s kluznými destičkami.

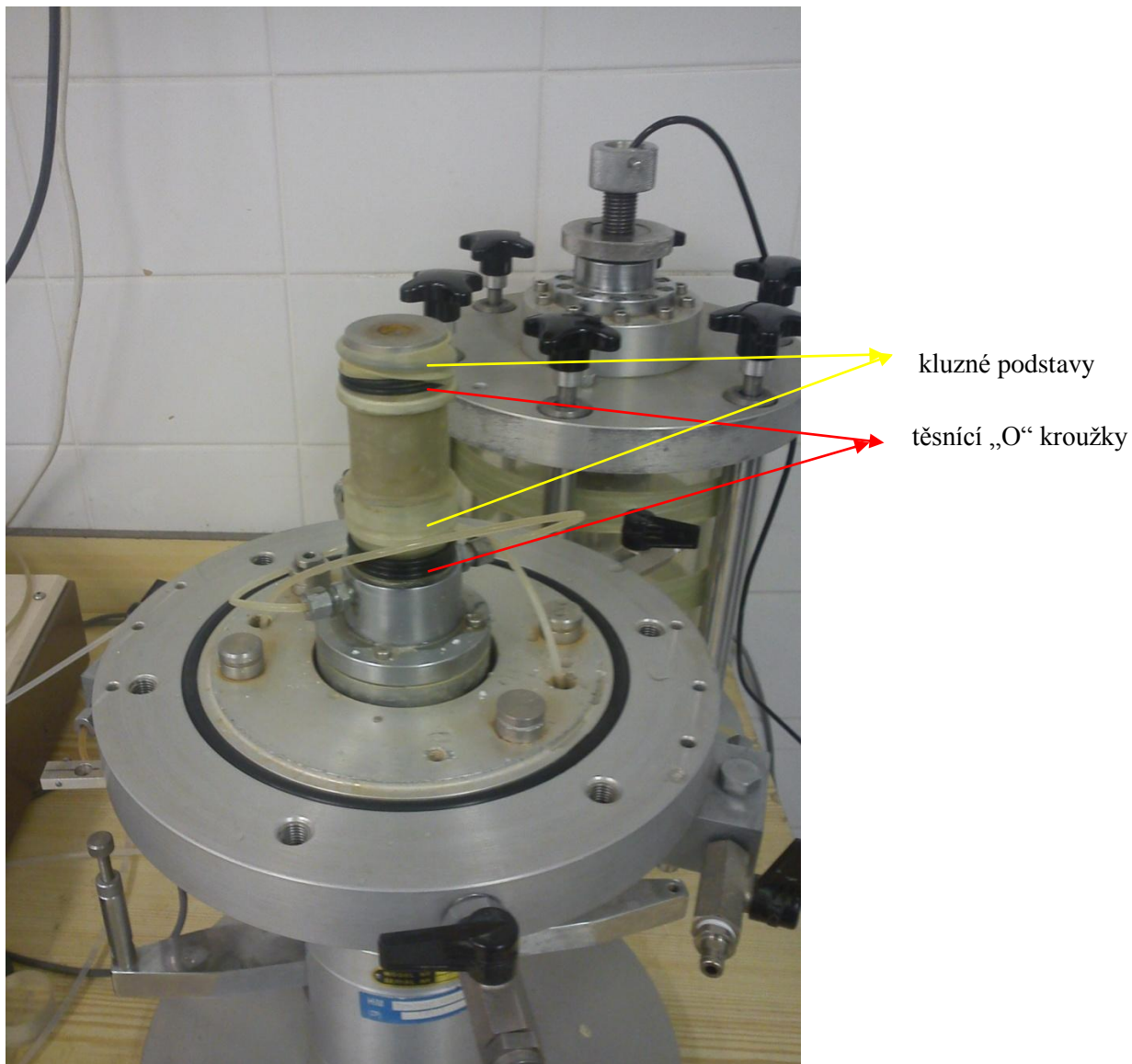


Obr. 6.6. Destičky vystřižené z gumové membrány.

### 6.2.3 Osazení vzorku

Po vytlačení z konsolidačního válce, je vzorek ořezán na rozměry zvolené podle typu zkoušky. Následně dojde k přetažení vzorku elastickou membránou a osazení porézními destičkami, které prošly procesem odvzdušnění a nasycení v ultrazvukové lázni, či případně destičkami kluznými. Při standardních zkouškách na vzorcích 76/38 mm (výška, průměr) je možné vložit mezi porézní destičku a vzorek filtrační papír, který zamezí zanesení drenáže jemnou frakcí zeminy. Takto připravený

vzorek je vsazen do trojosého přístroje (obr. 6.7 a 6.8). K zajištění těsnosti vůči komorové vodě je vzorek na podstavách opatřen „O“ kroužky. Po osazení vzorku do triaxiálního přístroje nasadíme komoru a připevníme pomocí šroubů. Do těsně uzavřené a připravené komory je napumpována pitná voda.



Obr. 6.7. Osazený vzorek výšky 38 mm v trojosém přístroji s vyznačenými kluznými destičkami a těsnícími kroužky.



Obr. 6.8. Osazený vzorek výšky 76 mm.

#### 6.2.4 Sycení a konsolidace vzorku

Po osazení vzorku do triaxiálního přístroje nasadíme komoru a připevníme pomocí šroubů. Do těsně uzavřené a připravené komory je napumpována pitná voda. Sycení vzorku je kontrolováno a prováděno pomocí digitálních GDS kontrolerů. V první fázi se na kontroleru, který zajišťuje komorový tlak, nastaví počáteční hodnota tlaku 10 kPa. Tento tlak nám zajistí, že nedojde k případnému nafouknutí membrány, jež obklopuje vzorek. Následně, při standardních zkouškách na vzorcích 76/38 mm, dojde k pozvolnému sycení vzorků zvyšováním sytícího a komorového tlaku na hodnoty 300 kPa, respektive 310 kPa. V případě kluzných destiček, kde spodní podstava obsahuje porézní destičku menší, bylo zapotřebí vyšších hodnot tlaku 500 kPa respektive 510 kPa. Efektivní napětí tedy v obou případech dosahovalo hodnoty 10 kPa. Pro ověření stupně nasycení byl použit Skemptonův parametr „B“. Postup byl takový, že dojde k uzavření dolní drenáže a zvýšení

komorového tlaku, v tomto případě o 100 kPa. Po chvíli došlo k ustálení tlaků a z poměru pórového tlaku, který byl sledován pomocí snímače pórových tlaků, a tlaku komorového jednoduchým výpočtem dostaneme hledanou hodnotu Skemptonova parametru „B“. Za ideálních podmínek by se parametr B rovnal jedné. U všech zkoušených vzorků, nezávisle na rozměrech, bylo dosaženo  $B=0,95-0,97$ . Tato hodnota byla dostačující pro započítání fáze konsolidace. Proces izotropní konsolidace rekonstituovaných vzorků proběhl jednorázovým přírůstkem radiálního napětí, tedy zvyšováním efektivního napětí, za neměnného sytícího tlaku. Hodnoty radiálního napětí byly u každé zkoušky různé, od 50 kPa do 300 kPa. Průběh konsolidace byl průběžně sledován a data byla vyhodnocována v tabulkovém procesoru. Fáze konsolidace byla ukončena při ustálení objemového přetvoření vzorku. Časový úsek, který je potřebný pro ukončení konsolidace byl u každého vzorku jiný, v závislosti na konzistenci materiálu. Zpravidla však tato etapa trvala v rozsahu 5-10 dnů.

#### 6.2.5 Smykání vzorků

Rychlost smykání vycházející z času potřebného k proběhnutí 50% primární konsolidace, způsobu drenáže vzorku a změny výšky vzorku při konsolidaci se pohybovala v rozmezí od 0,001 mm/min do 0,0025 mm/min a byla vypočítána pro každý vzorek zvláště podle vzorce (ČSN CEN ISO/TS 17892-9, 2005):

$$v_{max} = \frac{(H_i - \Delta H_c) \times 0,15}{2,1 \times t^{50}}$$

kde  $v_{max}$  je maximální rychlost smyku,  $H_i$  počáteční výška vzorku,  $\Delta H_c$  výška vzorku po konsolidaci, 0,15 předpokládané axiální přetvoření vzorku při porušení, 2,1 konstanta vycházející z počtu drenáží vzorku a  $t^{50}$  je čas 50% fáze primární konsolidace. Výška vzorku po konsolidaci byla vypočítána:

$$\Delta H_c = \frac{1}{3} \times \frac{\Delta V_c}{V_i} \times H_i$$

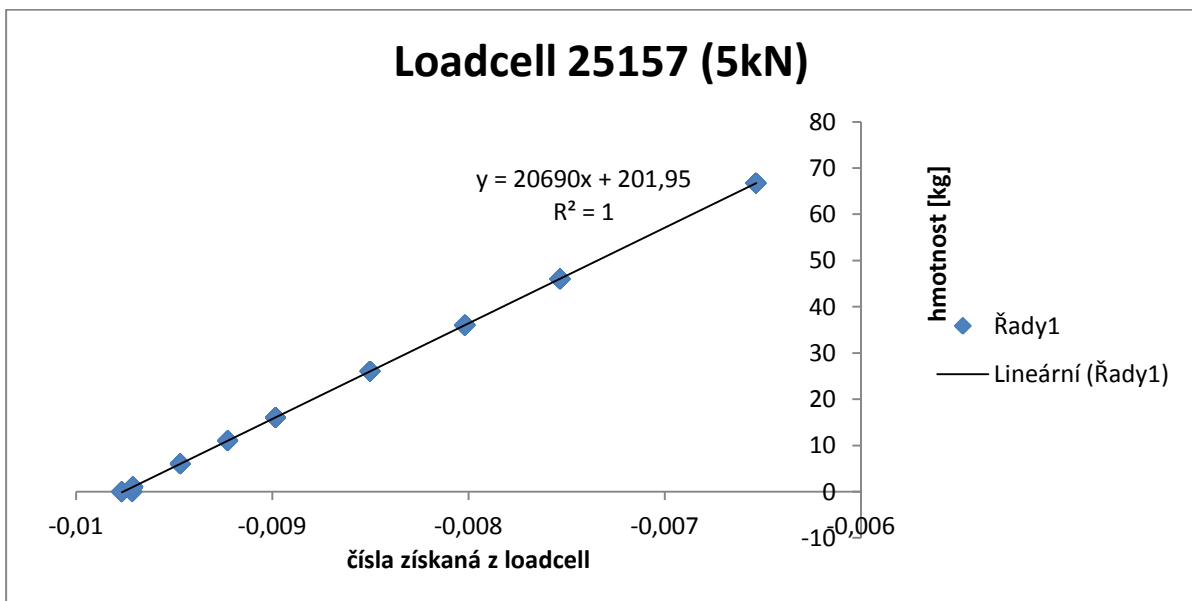
$V_i$  je objem vzorku před konsolidací,  $\Delta V_c$  změna objemu vzorku po konsolidační fázi.

Veškeré triaxiální zkoušky provedené v rámci stanovení kritické pevnosti brněnských jílu byly typu CIUP, tzn. izotropně konsolidované, nedrénované s měřením pórového tlaku.

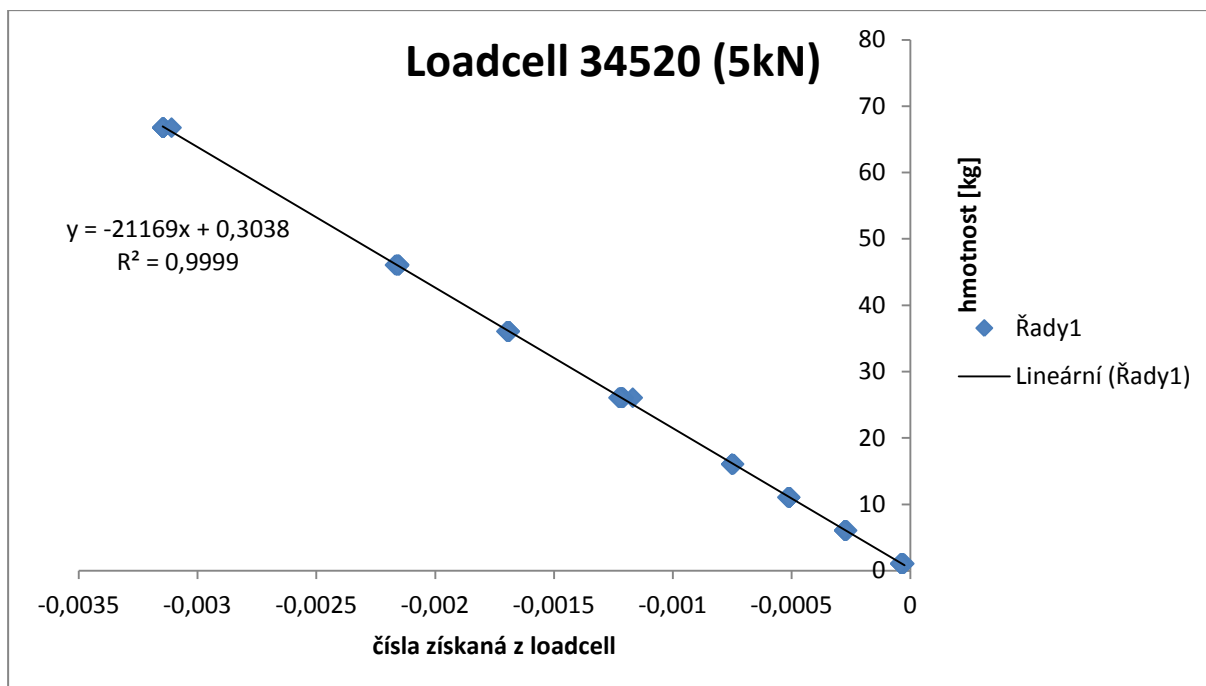
### 6.2.6 Přesnost měření

V této části bude podrobněji rozebrána přesnost měření jednotlivých přístrojů, použitých během triaxiálních smykových zkoušek. O přesnosti měření přístrojů rozhoduje primárně jejich rozlišitelnost a správné provedení kalibrace zařízení. V případě trojosých zkoušek bylo nutno provést kalibrace pro snímače vertikálního osového napětí a pro snímače pórových tlaků.

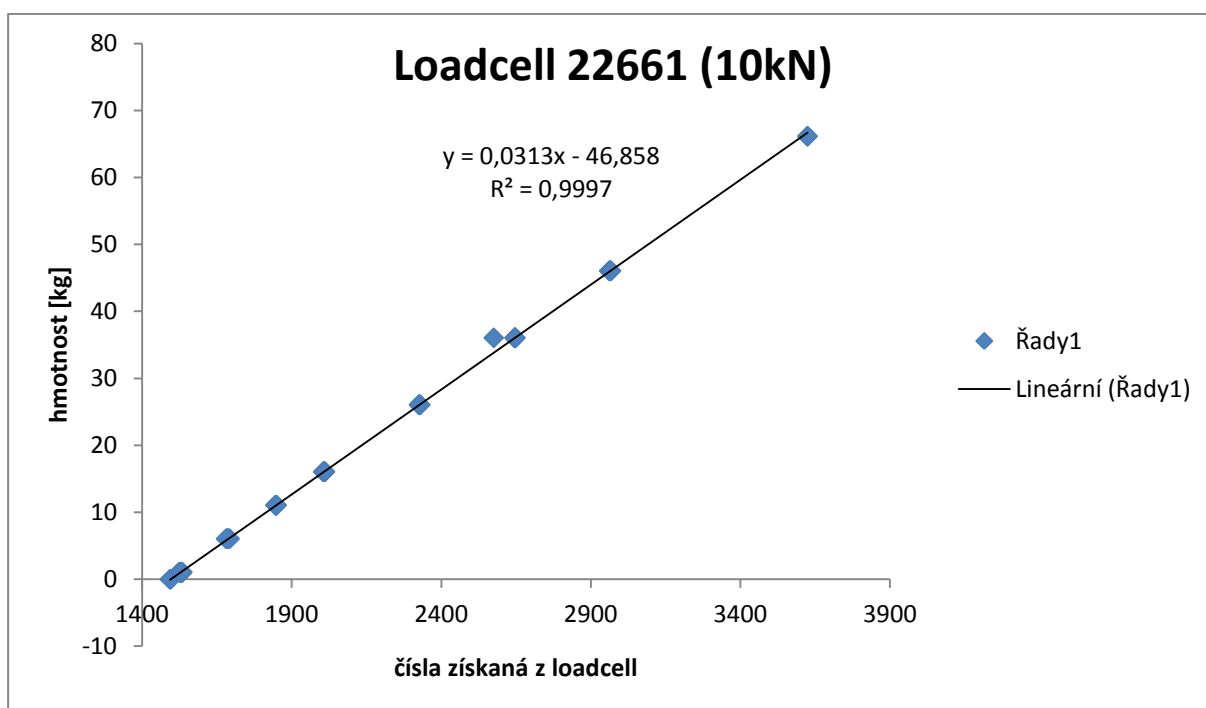
Vertikální snímače deviátorového napětí „loadcell“ je interní snímač s rozlišovací schopností do cca 90 gramů (podle výrobce), což odpovídá zhruba 0,8 kPa vzhledem k ploše vzorku. Loadcell je elektronický snímač, jehož nepřesnost vychází z oscilace hodnot během převodu elektrického signálu. Tyto nepřesnosti nejsou ale při správně provedené kalibraci natolik velké, jako v případě použití externích dynamometrů. Hodnoty naměřené vnějšími dynamometry jsou ovlivněné třením pístu, který přenáší napětí ze vzorku na dynamometr. V případě zařízení loadcell je to přímo v kontaktu se vzorkem a díky tomu, že je snímač naplněn olejem, dochází přes membránu k přenášení komorového tlaku. Loadcell tak přímo měří deviátorové napětí (vertikální napětí mínus horizontální). Jedním z prvních kroků pro provádění a následné vyhodnocování triaxiálních zkoušek je tedy provést pokud možno přesné kalibrace snímače vertikálního osového napětí. V rámci zkoušek na triaxiálních přístrojích byly použity tři komory, z nichž každá je osazena vlastním snímačem loadcell. Snímače vertikálního napětí byly vyjmuty z triaxiální komory a instalovány (každý zvlášť) na podstavci, který sloužil jako držák pro loadcell a umožnil přikládání závaží. Vlivem zvyšujícího se závaží a tedy napětí vyvozené na loadcell, ta dávala výstup do počítače v podobě čísel, která byla zaznamenávána. Následně vynesemím grafu závislosti hmotnosti na číslech získaných z loadcell, byla získána směrnice, s jakou se čísla mění. Pro tři loadcell jsou kalibrační křivky vyneseny v grafech pod textem.



Obr. 6.9. Graf kalibrace loadcell.



Obr. 6.10. Graf kalibrace loadcell.



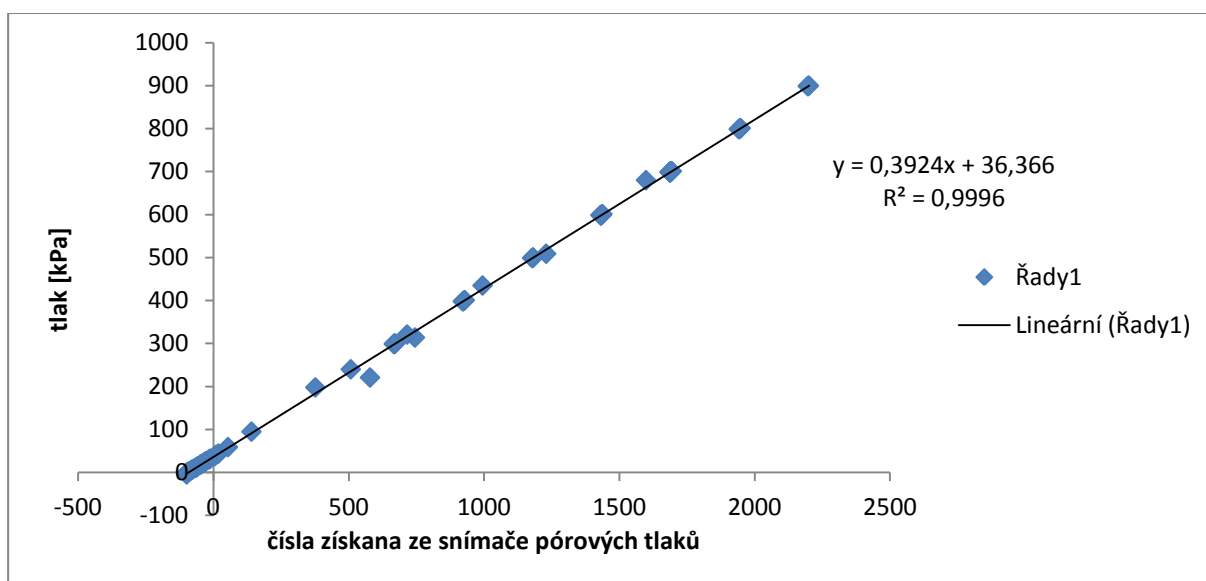
Obr. 6.11. Graf kalibrace loadcell.

Jednotlivé křivky v grafech nad textem jsou popsány jejich směrnici a jejich přesnost udává hodnota spolehlivosti „R“ (korelační koeficient). Hodnota spolehlivosti, jež vychází pro všechny tři kalibrace rovna jedné nebo ne málo různé od jedné, poukazuje na celkovou přesnost měření, s jakou zařízení loadcell dokáží pracovat.

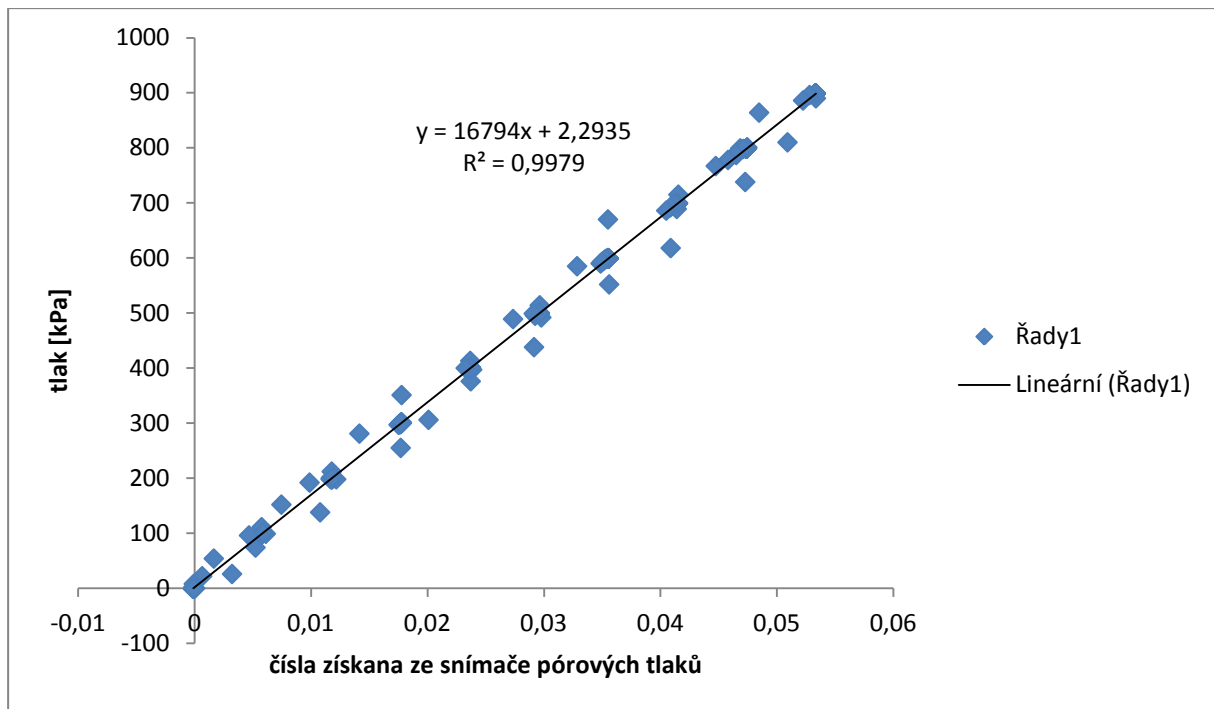
Další z přístrojů, u kterých je nutnost provést kalibraci jsou snímače pórových tlaků. Postupuje se podobně jako při kalibracích loadcell. Kalibrace snímače pórových tlaků byla provedena pomocí kontroleru GDS. Kontroler byl napojen na vstup dolní drenáže do podstavy trojosé komory. Drenážní vstup je vybaven právě zmiňovaným snímačem pórových tlaků. Dalším krokem bylo uzavření kohoutu za snímačem tak, aby voda vháněná pod určitým tlakem přes snímač neunikala. Na kontroleru se potom nastavovaly různé zvyšující se hodnoty tlaku vyvozované prostřednictvím změny vody v kontroleru. Data získaná během tohoto procesu byla zaznamenána v osobním počítači a vynesena do grafu závislosti napětí na číslech, jež byla výstupem snímače pórových tlaků. Pro tři triaxiální komory osazeny snímači pórových tlaků byly provedeny tři kalibrace, jejich křivky jsou vykresleny v následujících grafech.



Obr. 6.12. Graf kalibrace snímače pórových tlaků.



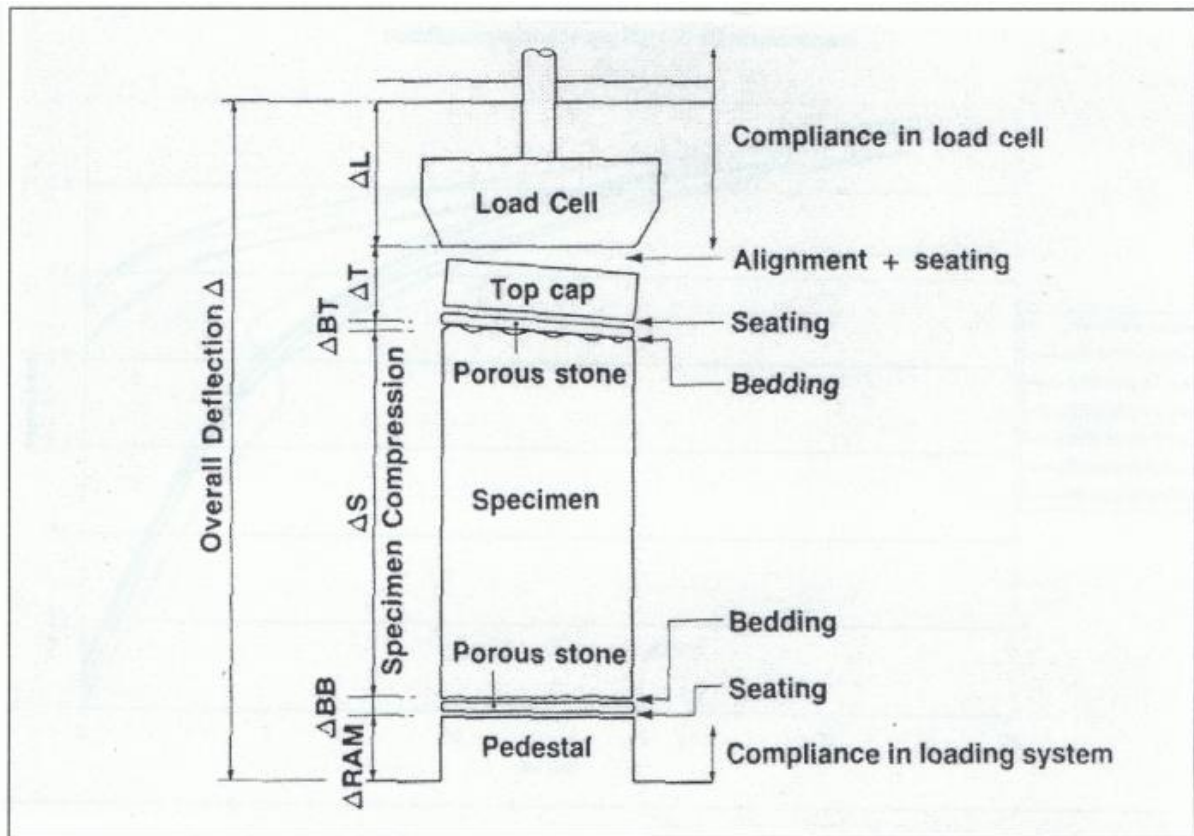
Obr. 6.13. Graf kalibrace snímače pórových tlaků



Obr. 6.14. Graf kalibrace snímače pórových tlaků.

Stejně jako v případě kalibračních křivek pro snímače vertikálního osového napětí, jsou kalibrační křivky pro snímače pórových tlaků popsány směrnicemi, sloužícími pro přepočet a hodnotou spolehlivosti R.

Největší nepřesnosti v měření jsou vztaheny k vnějšímu měření osově deformace. Digitální úchylkoměry, umístěné vně trojosé komory, nesnímají pouze deformaci vzorku. Při počátku smykové fáze během triaxiální zkoušky dochází k dosedání a uzavírání mezírek mezi vzorkem, porézními destičkami, podstavami trojosé komory a doléhání snímače vertikálního osového napětí na vzorek. Dalším problémem může být vyklonění vzorku z osy stlačení, tedy sousost. Sousost může být ovlivněna například nepřesným osazením vzorku porézními destičkami. Grafické znázornění těchto a dalších chyb je vykresleno na obr. 6.15. Důležitým krokem je tedy pečlivá příprava vzorků, zarovnání jejich podstav, nasycení porézních destiček a přesné nasazení gumové membrány.



Obr. 6.15. Zdroje chyb při vnějším měření osové deformace (Baldi et al., 1988).

Je-li cílem trojosé zkoušky získat konstituční vztah zkoumané zeminy, je třeba zajistit, aby pole napětí



a deformací vzorků bylo homogenní. Napětí a deformace jsou homogenní, neexistují-li v tělese gradienty těchto veličin (Sosna, 2003).

Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách při standardním uspořádání trojosé zkoušky, výška vzorku 76 mm, průměr 38 mm, osazení porézními destičkami na podstavách vzorku, dochází ke vzniku tření mezi podstavami vzorku a hrubými porézními destičkami a to vede k nehomogenitám v oblasti deformací a napětí. Na kontaktech se mobilizuje smykové tření a normálové napětí tedy není napětím hlavním. Během smykové fáze dochází vlivem tření na podstavách k zabraňování radiální deformace vzorku a ten nabývá tvaru soudku (obr. 6.16).

Obr. 6.16. Soudkovitý tvar vzorku po zkoušce (recon\_76\_200).

Vhodnou metodou pro zajištění relativní homogenity napětí a přetvoření je použití kluzných destiček. Kluzné destičky byly podrobně popsány v předchozích kapitolách v rámci popisu přípravy trojosých vzorků. V případě použití kluzných destiček však dochází ke vzniku dalšího „rozhraní“ navíc v osazení vzorků do trojosé komory, což má při měření osové deformace vně komory za následek další nepřesnost vlivem stlačení gumových membrán. Tato stlačení lze považovat za vratná, díky elastickému charakteru gumové membrány. Vlastní použití kluzných destiček se aplikuje především na zkoušky prováděné na hrubozrnných zeminách písčitého charakteru. Jedním z cílů této diplomové práce bylo porovnání laboratorních experimentů provedených v triaxiálním přístroji na standardních vzorcích a na vzorcích osazených kluznými destičkami a ověřit tak jejich použitelnost a účinnost v případě, že zkoumanou zeminou jsou právě jemnozrnné zeminy, jíly. Použitelnost kluzných destiček pro jemnozrnné materiály a rozdíl výsledných hodnot získaných ze zkoušek s nimi, bude probírána v závěrečné diskusi, společně s porovnáním výsledku získaných ze standardních triaxiálních zkoušek.

#### 6.2.7 Vyhodnocení zkoušek v triaxiálních přístrojích

Trojosé zkoušky byly nejnáročnější ze série uskutečněných experimentů a to nejen z hlediska technické proveditelnosti, ale i časové náročnosti. Čas potřebný k provedení jedné zkoušky se lišil typem experimentu. Zkoušky prováděné na standardních vzorcích výšky 76 mm a průměru 38 mm, byly zpravidla časově méně náročné než zkoušky prováděné s kluznými destičkami. Důvodem byl různý systém drenáže u obou typů zkoušek. Kluzné destičky jsou na rozdíl od destiček standardních osazeny zřetelně menší drenážní destičkou a je tedy logické, že drénování vzorku a tedy konsolidační fáze bude do značné míry časově delší. Konsolidační fáze při použití kluzných destiček byla v zásadě o dva až tři dny delší. Rychlost konsolidace se pak samozřejmě projeví na výpočtu rychlosti smykání, jež byla popsána v předchozích kapitolách.

Samotné vyhodnocování laboratorních zkoušek na triaxiálním přístroji probíhalo v tabulkovém procesoru MS Excel 2007. Data byla importována z textového souboru, který byl získán při zapisování dat během zkoušky do osobního počítače. Zapisovanými daty byl čas, komorový tlak [kPa], změna objemu v kontroleru pro řízení komorového tlaku [mm<sup>3</sup>], sytící tlak vyvozován v rámci dolní drenáže (pórové tlaky) [kPa], změna objemu v kontroleru pro dolní drenáž [mm<sup>3</sup>], měření snímače deviátorového napětí loadcell, snímač pórových tlaků a stlačení vzorku [mm].

Prvním krokem k vyhodnocení triaxiálních zkoušek byla kalibrace snímače deviátorového napětí loadcell a měřiče pórových tlaků. Získané směrnice křivek z kalibrací obou snímačů byly použity během vyhodnocování zkoušek na zpětný přepočet čísel na napětí. Samozřejmě pro každou loadcell a každý snímač pórových tlaků byly provedeny kalibrace zvlášť. Postupy kalibrací jsou popsány podrobně v kapitole 6.2.6 Přesnost měření.

### 6.2.7.1 Standardní zkoušky

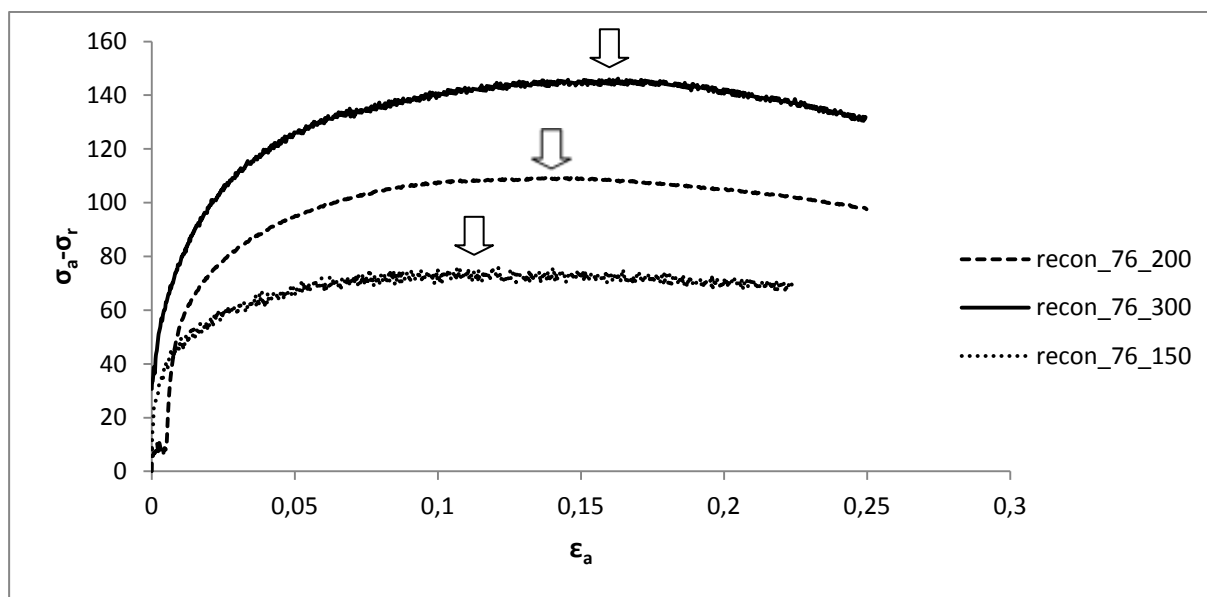
Vzorky o standardních rozměrech 76/38 mm byly izotropně konsolidovány za efektivních napětí 150, 200 a 300 kPa a následně byly vystaveny nedrénovanému smykání za konstantní rychlosti s měřením pórových tlaků. Fáze smykání byla ponechána do velkých axiálních přetvoření až do hodnoty kolem 25%. Po zkoušce byly vzorky vyjmuty z komory, zváženy a vysušeny v peci při teplotě cca 105°C, kvůli stanovení pórovitosti. Zkoušky byly vyhodnoceny a vyneseny do grafu (obr. 6.20) závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí  $t$  vs.  $s'$ . Dosažení kritického stavu, vycházející z teorie, bylo uvažováno při momentu, kdy došlo k relativnímu ustálení změn pórového tlaku a jejich průběh se při dalším axiálním přetvoření neměnil. Graf závislosti změny pórových tlaků (obr. 6.19) na axiálním přetvoření je pod textem.

Důležitým faktorem pro skutečné dosažení kritického stavu je, aby během smykové zkoušky nedošlo k vytvoření smykové plochy ještě před tím, než by průběh experimentu dosáhl samotného kritického stavu. Zkoušky byly v průběhu vyhodnocovány a byl také sledován samotný stav vzorků v trojosé komoře. Přetváření vzorků během smykové zkoušky směřovalo k tomu, že vzorek se od středu začal soudkovitě přetvářet. Po dosažení axiálního přetvoření přesahujícím zhruba 17% se na vzorcích začaly objevovat lokální smykové plochy (Obr. 6.17). Vznik smykové plochy mění výrazně rozložení a působení napětí ve vzorku. Pokud by tedy vznikla smyková plocha před dosažením kritického stavu, byly by ovlivněny celkové výsledky probíhající zkoušky a tím i hodnota kritické pevnosti zkoušené zeminy.



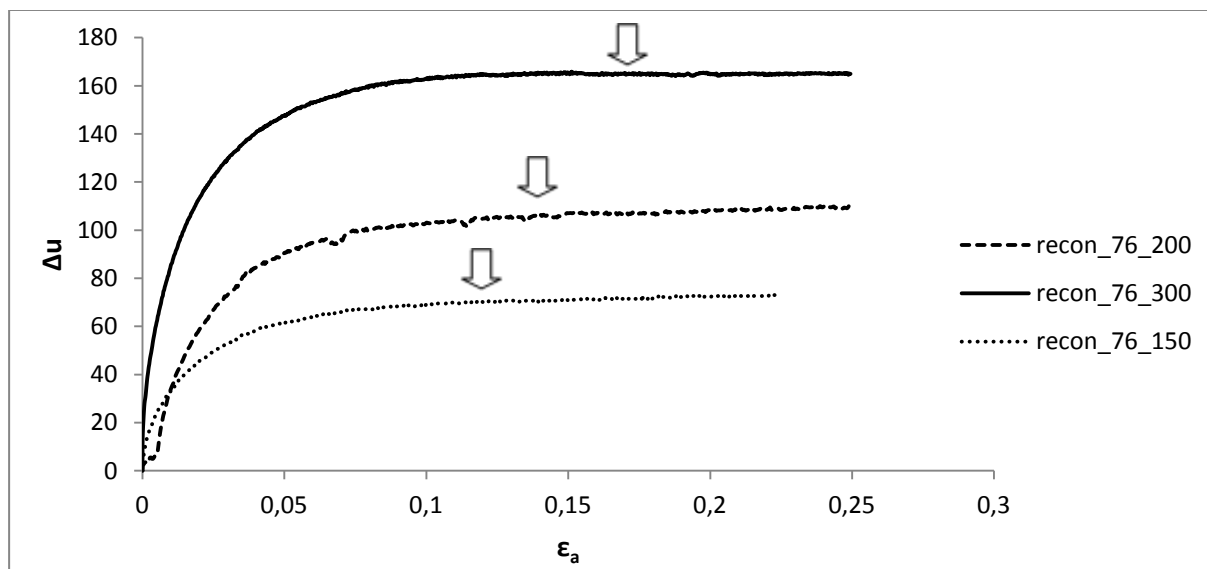
Obr. 6.17. Vznikající smyková plocha (recon\_76\_200).

O vzniku smykových ploch vypovídá i graf zobrazující závislost deviátorového napětí  $q = \sigma_a - \sigma_r$  na axiálním přetvoření  $\epsilon_a$ . Výsledná hodnota  $\varphi'_{cr}$  může být ve výsledku ovlivněna klesajícím deviátorovým napětím se zvyšujícím se axiálním přetvořením.



Obr. 6.18. Závislost deviátorového napětí na axiálním přetvoření. Šipky vyznačují předpokládané dosažení kritického stavu.

Průběh deviátorového napětí ukazuje u všech křivek napřed stoupající trend, avšak po dosažení axiálního přetvoření zhruba 15% se trend mění a napětí klesá. To lze vysvětlit právě vznikajícími smykovými plochami. Je patrné, že u zkoušek konsolidovaných za vyššího efektivního napětí je změna trendu v průběhu deviátorového napětí ztelnější, než u zkoušek konsolidovaných za nižšího efektivního napětí.

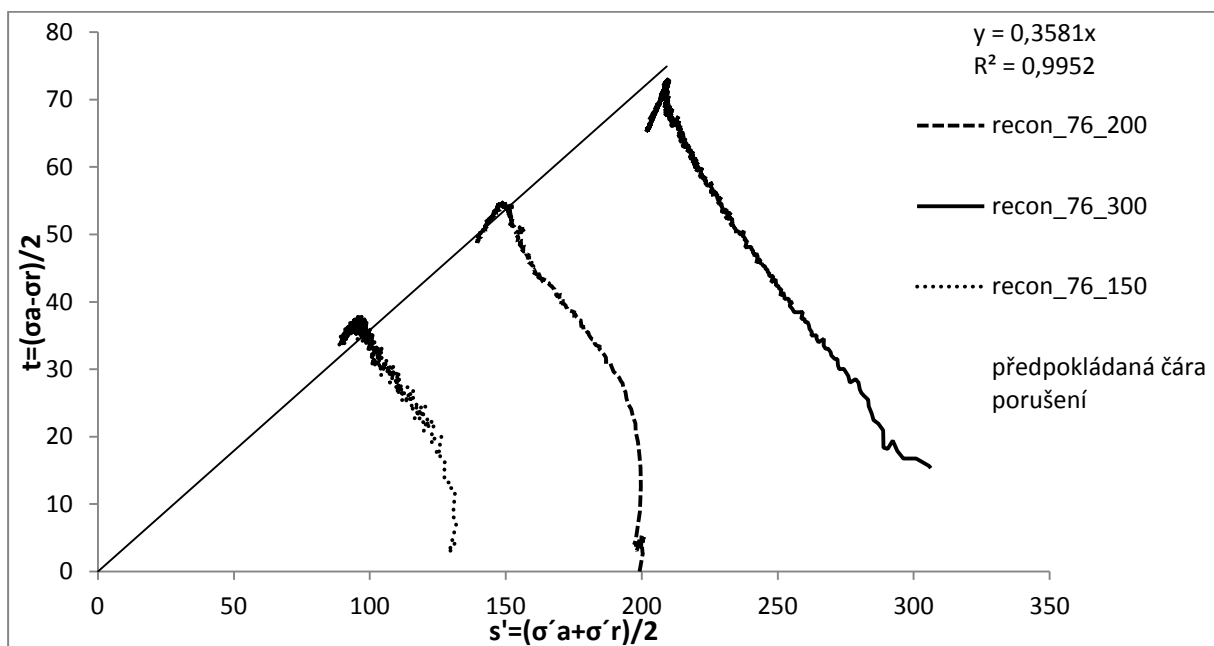


Obr. 6.19. Graf změny pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření. Šipky vyznačují předpokládané dosažení kritického stavu.

Z posledně vyobrazeného grafu je patrné, že u všech zkoušek po dosažení axiální deformace cca 10-15% nedocházelo k výrazným změnám pórového tlaku a lze tyto hodnoty považovat za ustálené. Tento stav odpovídá podmínce dosažení kritického stavu při nedrénované triaxiální zkoušce na rekonstituovaném materiálu.

Pokud bychom srovnávali graf průběhu deviátorového napětí s grafem vykreslujícím změny pórového tlaku, tak ze skutečností popsanych v předchozím textu by byl určitý rozpor u křivky recon\_76\_200, jelikož ustálení pórových tlaků a zároveň změna trendu v průběhu napětí deviátorového se pohybují přibližně okolo 15% axiálních deformací. Tento fakt napovídá, že mohlo dojít ke vzniku lokálních smykových ploch před dosažením kritického stavu, což by mělo za následek ovlivnění výsledné mobilizované pevnosti, způsobené změnou rozložení napětí ve vzorku.

Během průběhu smykových zkoušek nebyly pozorovány vznikající smykové plochy, avšak nelze vyloučit jejich vytvoření uvnitř vzorku. Za předpokladu, že by přetváření vzorků bylo během smykové zkoušky dostatečně homogenní, lze tvrdit, že u všech zkoušek bylo kritického stavu skutečně dosaženo.



Obr. 6.20. Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí, standardní zkoušky. Současně je proložena čára předpokládaného porušení.

Z grafů průběhu deviátorového napětí a pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření je tedy patrné, že u všech zkoušek bylo kritického stavu dosaženo a data získaná z těchto zkoušek lze použít pro vyhodnocení kritické pevnosti.

Zkouška při efektivním napětí 300 kPa, v grafu (obr. 6.20) znázorněno křivkou recon\_76\_300, neprochází na ose x hodnotou 300, jelikož před začátkem smykání, kdy je nutné dostat loadcell (snímač vertikálního napětí) do kontaktu se vzorkem, byla loadcell zatlačena na vzorek, přičemž bylo vyvozeno deviátorové napětí cca 20 kPa.

Výsledky zkoušek a data hodnoty kritické pevnosti byla vyhodnocena pomocí rovnice pod textem a jsou shrnuta v tabulce. 6.1:

$$\sin\phi' = \frac{\tau'}{\sigma'}$$

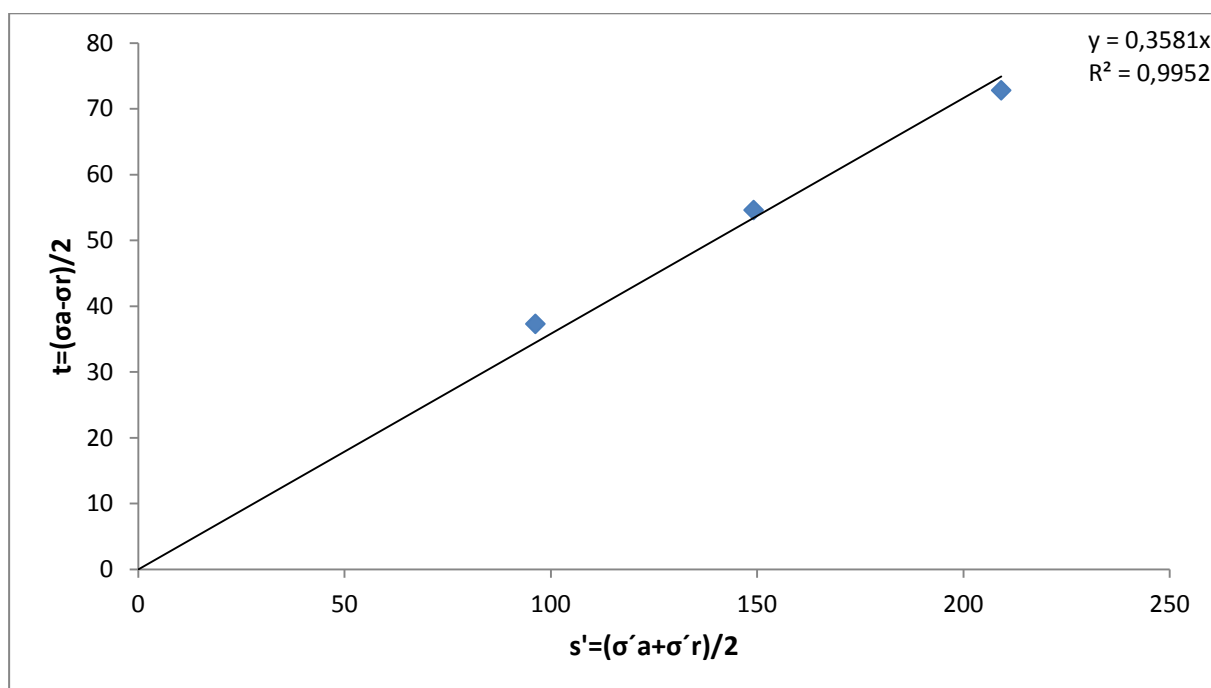
kde  $\tau'$  je efektivní smykové napětí a  $\sigma'$  je efektivní napětí normálové.

Mobilizovaný úhel vnitřního tření brněnských jíílů v kritickém stavu (76mm)			
	$t=(\sigma_a-\sigma_r)/2$ [kPa]	$s'=(\sigma'_a+\sigma'_r)/2$ [kPa]	$\phi'_{cr}$ [°]
recon_76_150	37,3	96,3	22,8
recon_76_200	54,6	149,2	21,5
recon_76_300	72,8	209,21	20,4

Tab. 6.1. Hodnoty mobilizované pevnosti brněnských jíílů v kritickém stavu stanovené pomocí triaxiálních zkoušek na standardních vzorcích.

Hodnoty v tabulce ukazují, že za podmínek nižšího efektivního napětí vycházejí vyšší hodnoty smykové pevnosti. Z toho vyplývá zakřivení obálky pevnosti při vyšších napětích, což je v rozporu s teorií.

Kritická obálka pevnosti z laboratorních experimentů provedených na vzorcích o standardních rozměrech je vykreslena na obr. 6.21. Pomocí cyklometrické funkce arcsin je dopočítán úhel sklon kritické obálky pevnosti  $\phi'_{cr} = 21^\circ$ .



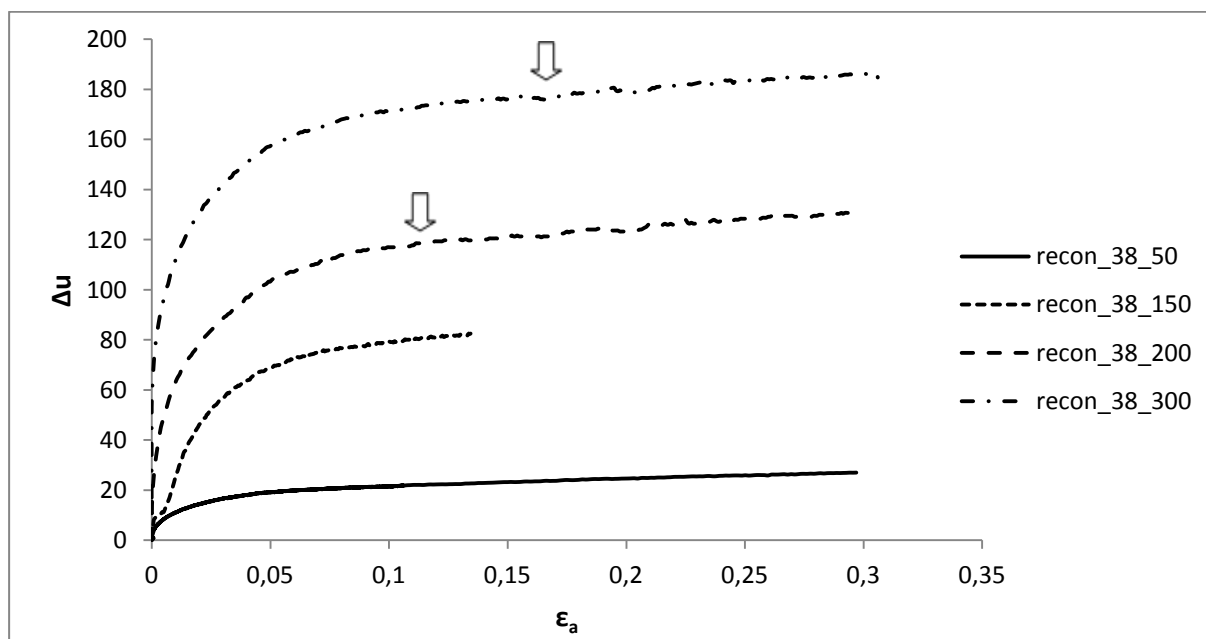
Obr. 6.21. Kritická obálka pevnosti stanovená triaxiálními zkouškami na standardních vzorcích.

### 6.2.7.2 Kluzné destičky

Rekonstituované vzorky byly v případě použití kluzných destiček izotropně konsolidovány při efektivních napětích 50, 150, 200 a 300 kPa a následně byly vystaveny smykání za konstantní rychlosti. Fáze smykání byla ponechána do velkých axiálních přetvoření až do hodnoty kolem 30%. Po zkoušce byly vzorky vyjmuty z komory, zváženy a vysušeny při teplotě cca 105°C, kvůli stanovení pórovitosti.

Použití kluzných destiček výrazně mění průběh rozložení napětí ve vzorku během smykového namáhání. To umožňuje radiální deformaci na podstavách, oproti standardnímu uspořádání zkoušky, kde tření na poréznicích destičkách způsobuje soudkovité přetváření vzorku během smykání. To, že se vzorek může radiálně deformovat na podstavách, zabraňuje vzniku smykových ploch a umožňuje celkové relativně homogenní přetváření vzorku.

Oproti standardním triaxiálním zkouškám, nedocházelo při pokusech s kluznými destičkami k ustálení pórových tlaků během smykového namáhání. Tento fakt vystihuje graf (obr. 6.22) průběhu změny pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření.

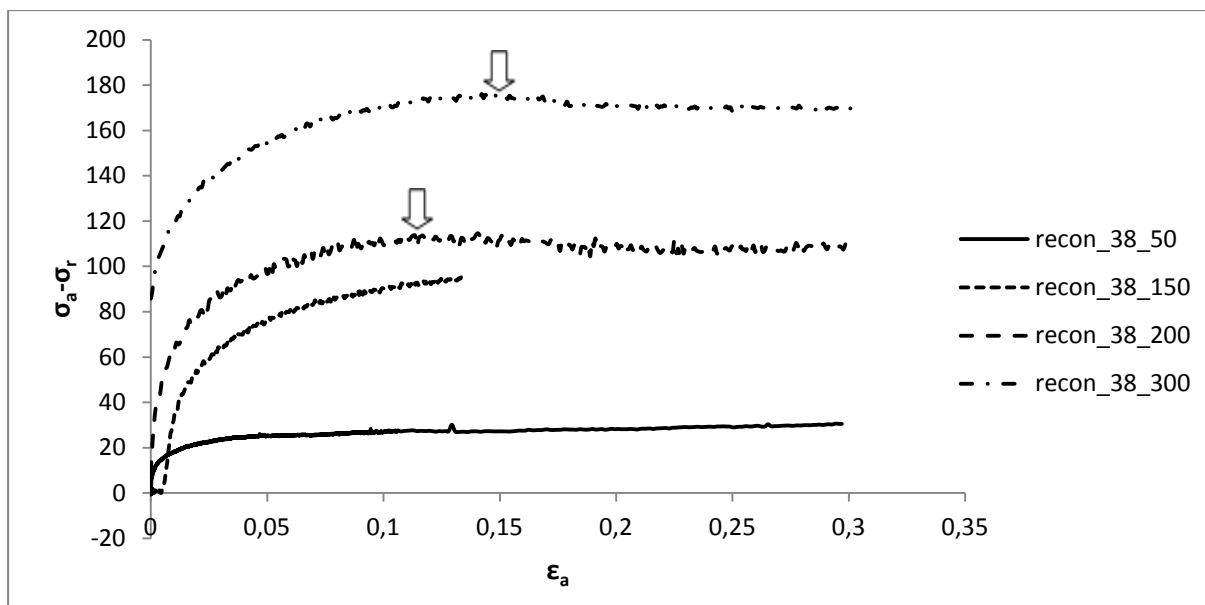


Obr. 6.22. Průběh změny pórových tlaků v závislosti na axiálním přetvoření.

Konstantní gradient nárůstu pórových tlaků po překročení osového přetvoření zhruba 10% naznačuje, že během smykových zkoušek nedocházelo ve vzorcích ke vzniku smykových ploch. Tato skutečnost je podpořena grafem závislosti změny deviátorového napětí na axiálním přetvoření (obr. 6.23).

Pokud bychom vycházeli z podmínky pro dosažení kritického stavu, při které dojde k ustálení pórových tlaků, pak by kritický stav u zkoušek na kluzných destičkách nebyl dosažen.

U zkoušky recon\_38\_50 mohou být výsledky ovlivněny drobnou překonsolidací, jež byla způsobena vyšším konsolidačním napětím při přípravě vzorku v konsolidačním válci (cca 70 kPa), než bylo napětí během zkoušky.

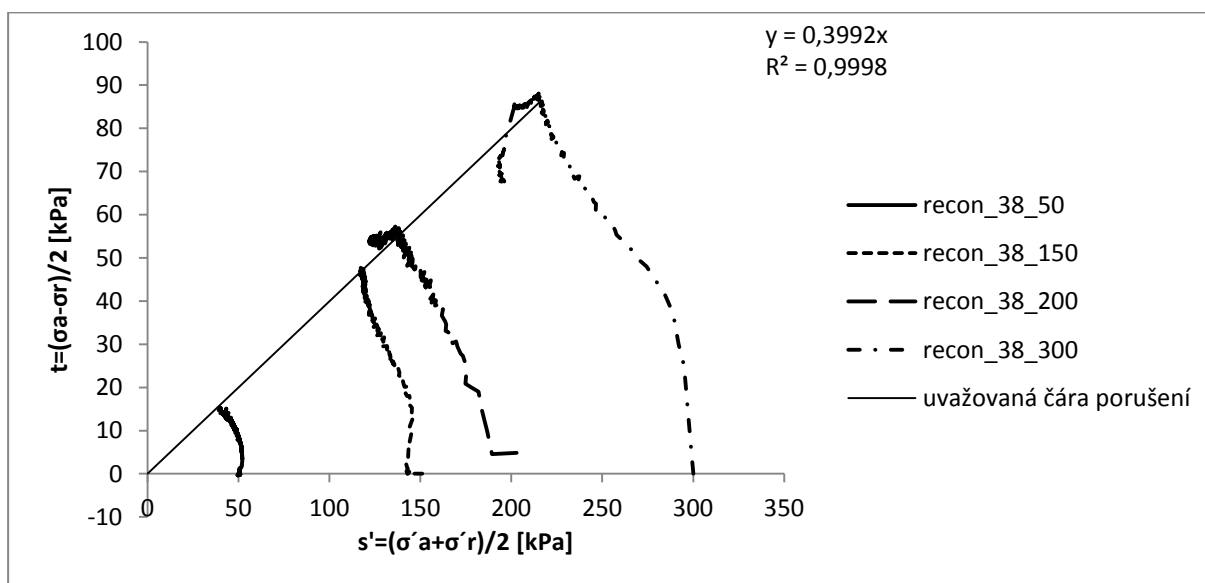


Obr. 6.23. Průběh změny deviátorového napětí s narůstajícím axiálním přetvořením.

Při porovnání grafů znázorňujících změny deviátorového napětí pro standardní zkoušky a pro zkoušky s kluznými destičkami, je na první pohled patrné, že oproti standardním zkouškám, nedochází u experimentů s kluznými podstavami k poklesu deviátorového napětí ani po dosažení vyšších přetvoření.

Relativní ustálení či mírný pokles hodnot deviátorového napětí napovídá, že jednotlivé vzorky dosáhly stavu zplastizování, které by kritickému stavu napovídalo.

Z vyhodnocení všech zkoušek a vynesení výsledných dat do grafu závislosti deviátorového napětí na středním napětí dostaneme dráhy napětí (Obr. 6.24)



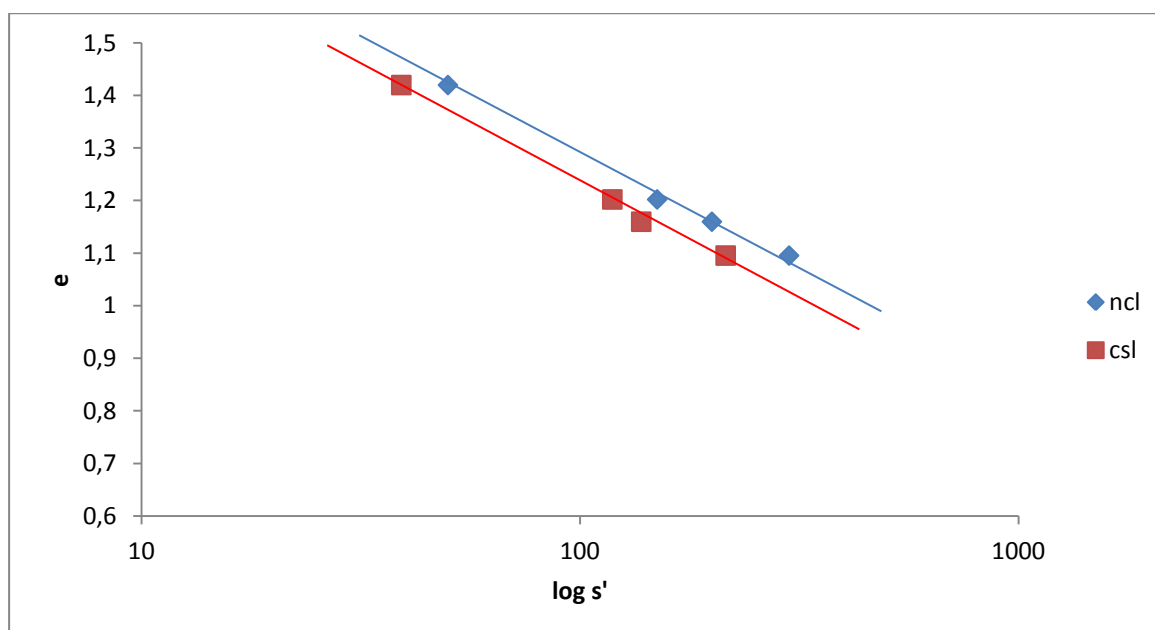
Obr. 6.24. Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí. Současně je proložena čára předpokládaného porušení.

Hodnoty předpokládaného porušení (zplastizování), jsou shrnuty v tabulce 6.2. Oproti triaxiálním zkouškám na standardních vzorcích není patrné zakřivení obálky pevnosti.

Mobilizovaný úhel vnitřního tření brněnských jíílů v kritickém stavu (kluzné destičky)			
	$t=(\sigma_a-\sigma_r)/2$ [kPa]	$s'=(\sigma'_a+\sigma'_r)/2$ [kPa]	$\phi'_{cr}$ [°]
recon_38_50	14,82	39,14	22,2
recon_38_150	46,91	118,56	23,3
recon_38_200	55,33	138,04	23,6
recon_38_300	86,24	215,45	23,6

Tab. 6.2. Hodnoty mobilizované pevnosti brněnských jíílů stanovené pomocí triaxiálních zkoušek za použití kluzných destiček.

S použitím cyklometrické funkce arcsin byl dopočítán úklon obálky kritické pevnosti  $\phi'_{cr}=23,5^\circ$ . Získané hodnoty středního napětí při porušení a středního napětí při kterém byly vzorky konsolidovány byly vykresleny společně s čísly pórovitosti jednotlivých vzorku do grafu obr. 6.25. Graf znázorňuje předpokládanou čáru kritických stavů (CSL) a čáru normálního stlačení (NCL).



Obr. 6.25. Graf závislosti čísla pórovitosti na logaritmu středního napětí při zplastizování a středního napětí při kterém byly vzorky konsolidovány s vykreslenými čarami NCL a CSL.

Všechny zkoušky leží na definované čáře kritických stavů. Z rovnoběžnosti čar CSL a NCL vyplývá, že zkoušky provedené s kluznými destičkami dosáhly kritického stavu.

### 6.3 Zkoušky v rotačním smykovém přístroji

Další ze série zkoušek, provedených v rámci stanovení kritické pevnosti brněnských jílu, byly realizovány na rotačním smykovém přístroji typu Bromhead (obr. 6.26). Přístroj spadá do kategorie, kde se přímo měří smykové napětí, tzv. „direct shear“.



Obr. 6.26. Rotační smykový přístroj typu Bromhead.

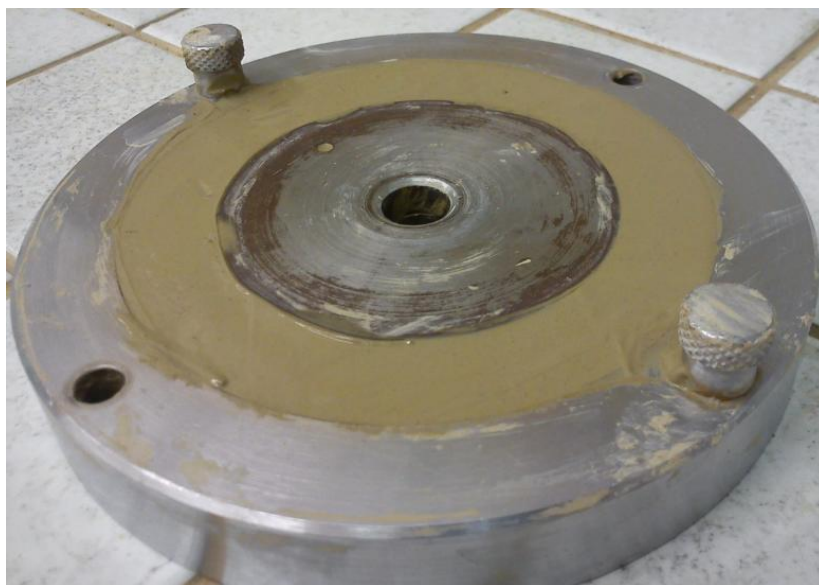
#### 6.3.1 Popis přístroje

Vzorek se instaluje do vzorkové krabice kruhového tvaru, která je umístěna uvnitř plexisklové nádržky a je při přípravě vzorku a čištění snadno odnímatelná od těla přístroje. Mezikruží, jež se nachází ve spodní části krabice, má vnitřní a vnější průměr 70 mm a 100 mm, a slouží pro instalaci vzorku. Počáteční výška vzorku je 5 mm. O odvodnění vzorku se starají dvě bronzové porézní destičky umístěny jak ve spodní části vzorkové krabice, tak v části horní, jež přesně nasedá na část spodní. Ty mají po celém obvodu radiální rýhy a zdrsňený povrch, aby nedošlo k vytvoření smykové plochy na kontaktu zeminy s porézní destičkou. Vzorková krabice je před zkouškou vložena do plexisklové nádržky, pevně uchycena pomocí dvou šroubů a zalita vodou, aby nedošlo k vyschnutí vzorku během zkoušky. Normálové napětí je na vzorek vyvozováno pomocí pákového mechanismu v poměru 1:10. Každý kilogram závaží působí na plochu vzorku napětím zhruba 25 kPa. Ramena na horní části přístroje zabraňující rotaci horní desky vzorkové krabice a přenášejí v průběhu zkoušky torzní moment na dynamometry, s nimiž jsou spojené. Samotnou rotaci během smykové zkoušky zajišťuje pohonná jednotka, spojená s plexisklovou nádržkou, v níž je umístěna vzorková krabice. Rychlost motoru je nastavitelná pomocí jednoduchého převodového systému.

### 6.3.2 Metodika zkoušky

Typ zkoušky prováděný v rotační smykové krabici je nazýván „Single stage test procedure“. Použitým materiálem byla rekonstituovaná zemina, jejíž příprava je popsána v kapitole 6.1. Prvním krokem je nasycení porézní destičky spodní části vzorkové krabice vodou. Následně dojde k postupnému nanášení materiálu. Je nutné dbát na vyplnění veškerých mezírek zeminou, aby nedošlo ke vzniku bublinek ve vzorku. Kakou et al. (2001) doporučují při nanášení vzorku do mezikruží nezarovnávat do jedné roviny s horním okrajem krabice, ale o jeho navýšení o 1 až 2 mm. Po vyplnění mezikruží vzorkem (obr. 6.27), se umístí vzorková krabice do plexisklové nádržky, upevní pomocí dvou šroubů, přiklopí horní část vzorkové krabice a zalije vodou (obr. 6.28). Tímto začne proces konsolidace. První fáze konsolidace začne probíhat ihned po zaklopení smykové krabice, v ten moment začne působit na vzorek normálové napětí 25 kPa.

Zvolená normálová napětí v rámci smykových zkoušek byla 28, 50, 100 a 200 kPa. Sednutí vzorku při konsolidaci bylo zaznamenáváno pomocí digitálních úchylkoměrů. Hodinky stejné značky byly použity také pro měření deformace dynamometrů. Smykání zkonsolidované zeminy bylo prováděno konstantní rychlostí 0,036 mm/min. Rychlost smykání byla zvolena tak, aby ve vzorku nedocházelo během smyku ke vzniku pórových tlaků.



Obr. 6.27. Spodní část smykové krabice vyplněna rekonstituovaným materiálem.



Obr. 6.28. Smyková krabice umístěná a připevněná do plexisklové nádržky na smykovém přístroji.

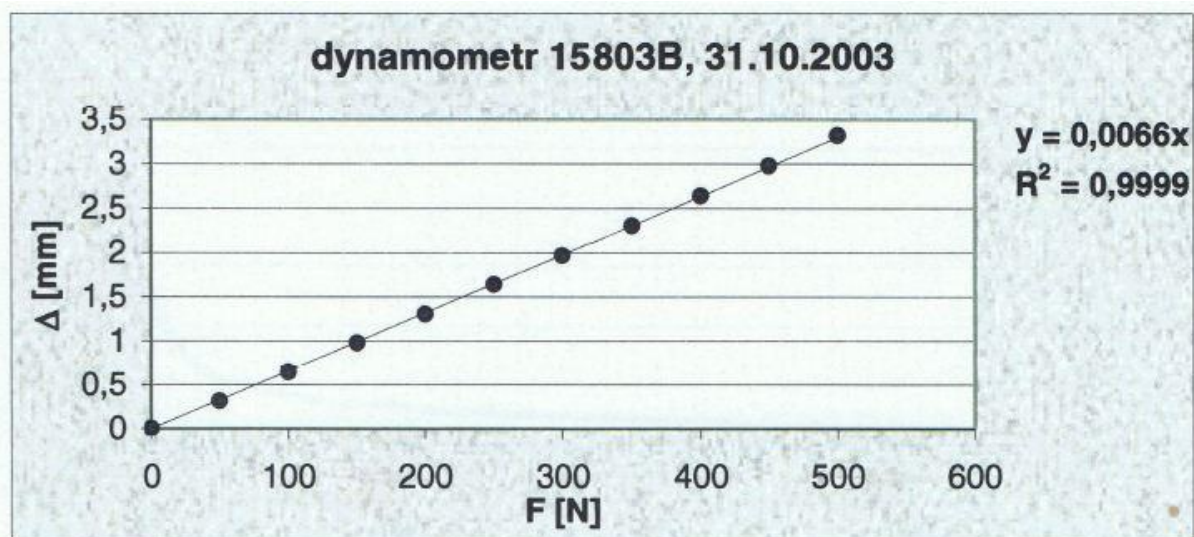
### 6.3.3 Vyhodnocení zkoušek v rotačním smykovém přístroji

Doba trvání jedné smykové zkoušky v rotačním krabicovém přístroji byla okolo dvou dnů, ale pokud bychom zahrnuli i konsolidační fázi, pak se délka jedné zkoušky vyšplhá až na dobu přesahující jeden až dva týdny, v závislosti na zvoleném normálovém napětí, pod kterým chceme zeminu nechat konsolidovat a smykat. V tomto časovém rozmezí bylo nutno přístroj každý den kontrolovat a dbát, aby nedošlo k vysušení vzorku během probíhající zkoušky. Případné vysušení by mělo za následek zvýšení výsledného smykového napětí a veškerá získaná data by byla zkreslena.

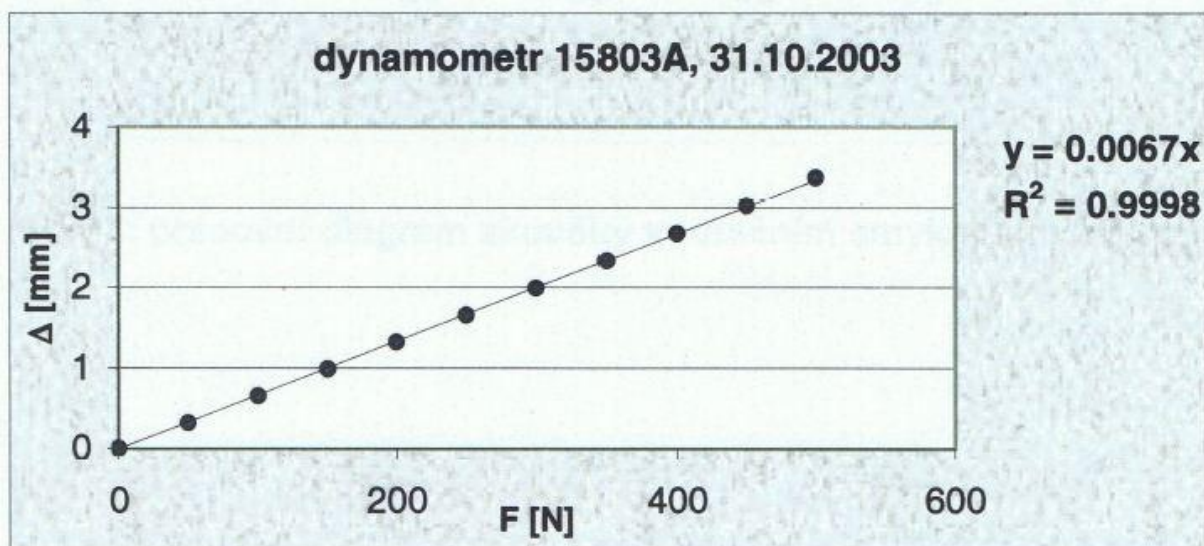
K vyhodnocení získaných dat ze smykových zkoušek byl použit tabulkový editor Microsoft Excel 2007. Samotná práce s daty probíhala následovně:

Textový soubor obsahoval informace o přesném datu a časovém období, ve kterém zkouška probíhala, dále odečty z digitálních úchylkoměrů, které byly použity na měření deformace dynamometrů a sednutí vzorku během zkoušky. Veškerý zápis probíhal ve mnou zvoleném časovém intervalu.

Pro vyhodnocení grafu závislosti smykového napětí na posunu je třeba přepočítat deformace dynamometrů s pomocí kalibračních křivek. Kalibrační křivky a jejich grafy (obr. 6.29 a 6.30) byly převzaty z diplomové práce Najsera (2004), který jako součást práce připojil i kompletní manuál na rotační smykový přístroj Bromhead.



Obr. 6.29. Kalibrační křivka dynamometru 15803B (Najser, 2004).



Obr. 6.30. Kalibrační křivka dynamometru 15803A (Najser, 2004).

Výsledné smykové napětí se potom spočítá podle vzorce (Najser, 2004):

$$\tau = \frac{3 * (F_1 + F_2) * L}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)}$$

kde  $F_1$  a  $F_2$  jsou síly působící na levý a pravý dynamometr,  $L$  vzdálenost mezi rameny,  $R_2$  a  $R_1$  vnější a vnitřní poloměr vzorkového prostoru. V kapitole o popisu rotačního smykového přístroje jsem uvedl, že závaží o hmotnosti 1 kg vyvodí na zkoušený vzorek, s pomocí pákového zařízení, napětí zhruba 25 kPa. Výsledné normálové napětí je pak jednoduše spočitatelné. Matematickým vzorcem jej vyjádříme:

$$\sigma' = \frac{P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$$

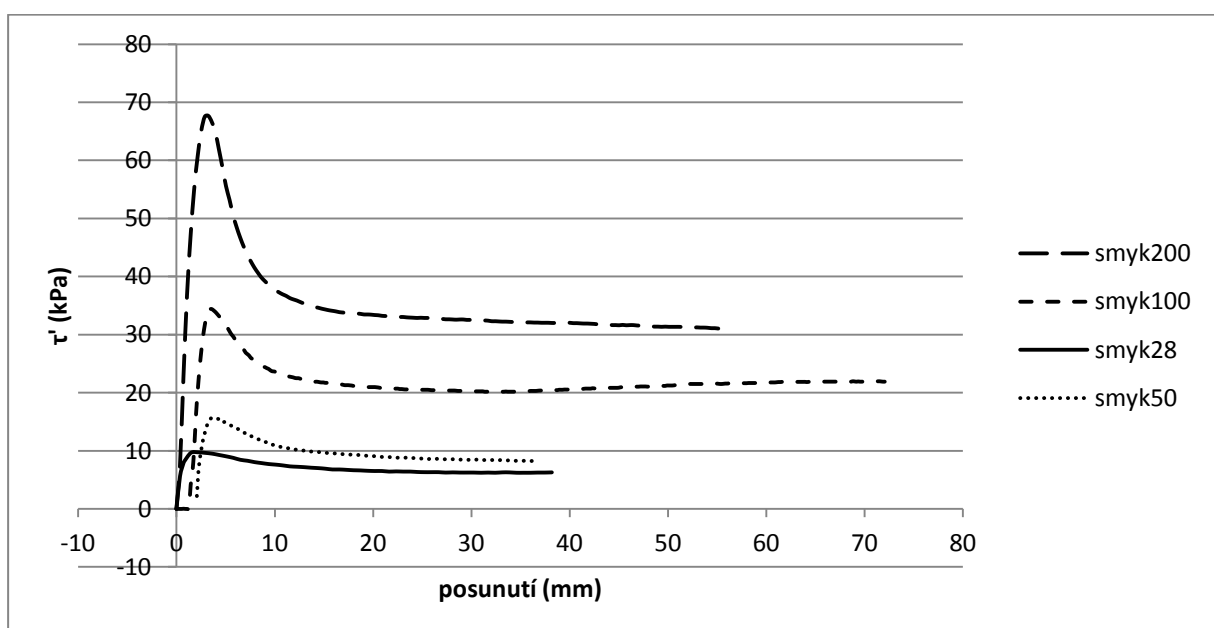
což je síla  $P$  působící na plochu mezikruží.

Zkoušky byly prováděny po tak dlouhou dobu, aby u každé z nich bylo dosaženo jak pevnosti kritické, tak reziduální. Po ukončení zkoušky byla vyjmuta smyková krabice a kontrolována vzniklá smyková plocha. Příklad smykové plochy je na obr. 6.31. Během zkoušek nedošlo k nadměrnému vytlačení materiálu a lze říci, že naměřené výsledky můžeme považovat za relativně přesné.



Obr. 6.31. Spodní část smykové krabice s vyplněným mezikružím, na které je patrná hladká smyková plocha.

Výsledky zkoušek jsou vyneseny v pracovním diagramu závislosti smykového napětí na posunu (obr. 6.32).



Obr. 6.32. Graf závislosti smykového napětí na posunutí.

Z grafu Obr. 6.30 je patrné, že kritického stavu bylo, s výjimkou zkoušky při normálovém napětí 25 kPa, dosaženo po délkovém přetvoření zhruba 4 – 5 mm. Je zde také vidět, že se vzrůstajícím normálovým napětím, vzrůstá také smykové napětí, což je celkem logické. To se v grafu projeví strmějším a jasnějším vrcholem. Najser a Boháč (2005) uvádí, že pro rotační smykovou krabici a rekonstituovaný vzorek je vrcholová pevnost v grafu pevností kritickou.

Smykové zkoušky provedené při normálovém napětí 100 kPa (v obr. 6.30 znázorněno křivkou smyk100) ukazují nárůst smykového napětí až od posunu cca 2mm, je to způsobeno tím, že při začátku smykové zkoušky nebyla ramena dynamometru přímo spojena se smykovou krabicí. To však nutně neznamená, že výsledná data ze zkoušky jsou chybná. Na zkoušce smyk100 lze demonstrovat, jak vysušení vzorku během zkoušky ovlivní smykovou pevnost. Po dosažení reziduální pevnosti smykaného vzorku byl ten ponechán ve smykovém přístroji za pokračujícího smyku bez zalévání smykové krabice vodou. To se nutně projevilo narůstáním smykové pevnosti, jak je z grafu patrné.

Samotné vyhodnocení kritické pevnosti brněnských jíílů, měřených v rotačním smykovém přístroji bylo vyhodnoceno rovnicí:

$$\sin\varphi' = \frac{\tau}{\sigma}$$

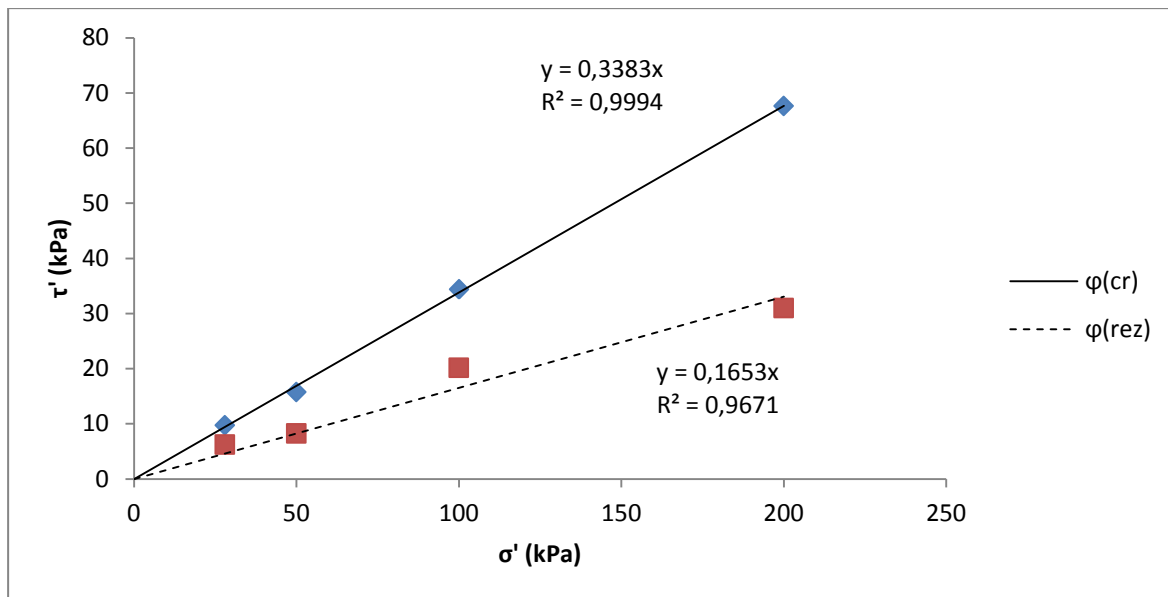
Tento vztah vychází z nulové dilatance za kritického stavu a je tak přesnější než standardně používaný vztah  $\tan\varphi' = \frac{\tau}{\sigma}$ . Najser a Boháč (2005) uvádějí, že nepřesnost posledního vzorce narůstá se zvyšujícím se úhlem vnitřního tření. Tabulka výsledných hodnot (tab. 6.3) je uvedena níže pod textem.

Shrnutí smykových pevností z rotačního smykového přístroje					
	$\sigma'$ (kPa)	$\tau'$ (kPa)	$\phi'_{cr}$ (°)	$\tau'$ (rez) (kPa)	$\phi'$ rez (°)
smyk 200	200	67,64	19,8	31	8,9
smyk 100	100	34,38	20,1	20,17	11,6
smyk 50	50	15,77	18,4	8,27	9,5
smyk 28	28	9,75	20,4	6,25	13

Tab. 6.3. Kritická a reziduální pevnost brněnských jíílů stanovená pomocí rotační krabice.

Výsledné hodnoty kritické pevnosti brněnských jíílů, stanovených pomocí smykové krabice jsou pro případ zkoušek za normálového napětí 28, 50, 100 a 200 kPa téměř shodné, a jsou cca 19 - 20°.

Graf (obr. 6.33) vykresluje kritickou a reziduální obálku pevnosti brněnských jíílů získanou ze zkoušek v rotačním smykovém přístroji. Ty byly získány proložením lineární čáry nulou a hodnotami kritické a reziduální pevnosti. Sklony obálek pevnosti jsou  $\varphi'_{cr} = 19,8^\circ$  a  $\varphi'_{rez} = 9,5^\circ$ .



Obr. 6.33. Obálka kritické a reziduální pevnosti brněnských jíílů.

#### 6.3.4 Problémy při laboratorních experimentech na rotačním smykovém přístroji

Laboratorní práce spojené s měřením smykové pevnosti v rotační krabici v sobě nesou několik možných problémů. Mezi nejhlavnější patří měření v nepřesnosti smykového napětí, tření na středícím kolíku, vznik tření mezi horní deskou a krabicí v důsledku naklonění desky nebo zachycení unikajícího materiálu, boční tření materiálu, nadměrné vytlačení materiálu a možnost nestejnomyšného působení smykové síly u vnějšího a vnitřního okraje vzorku (Najser, 2004). Ne všem těmto problémům se dá předcházet, avšak například pro snížení tření byl středící kolík namazán silikonovou vazelinou.

Nejčastějším z problémů byla závada na měřicích hodinkách, nebo softwarové problémy s počítačem, kdy nedocházelo k zápisu dat. U hodinek, které měří deformace dynamometrů a změnu výšky vzorku, je nutné dbát, aby nedošlo k vybití baterie. Avšak i u tak malého elektronického zařízení hrozí porucha softwaru, jež se mi přihodila formou náhodné změny čísel na hodinkách.

Nadměrnému vytlačování materiálu jsem předcházet tím, že jsem na začátku konsolidační fáze přidával malé zatěžovací kroky.

## 6.4 Zkouška v translačním smykovém přístroji

Poslední typ laboratorních zkoušek byl proveden v translační smykové krabici. Materiálem byla opět rekonstituovaná zemina v podobě brněnských neogenních jíílů. V translačním smykovém přístroji byla provedena pouze jedna zkouška pro ověření dat naměřených v rotačním smykovém přístroji.

### 6.4.1 Popis přístroje

Experimenty byly realizovány v translační smykové krabici (obr. 6.34). Stejně jako v případě rotační krabice, je součástí translačního smykového přístroje odnímatelná vzorková krabice. Tato je složena opět ze dvou částí, s hlavním rozdílem ve tvaru prostoru pro ukládání vzorku. Ten je v tomto případě kruhového průřezu o průměru 6 cm a výšky 5 cm. Odvodnění vzorku je zajištěno pomocí dvou drenážních destiček, které se osazují do vzorkové krabice při instalaci vzorku. Smyková krabice je před zkouškou uložena do kovové otevřené nádoby obdélníkového tvaru, ke které je pomocí dvou šroubů upevněna.



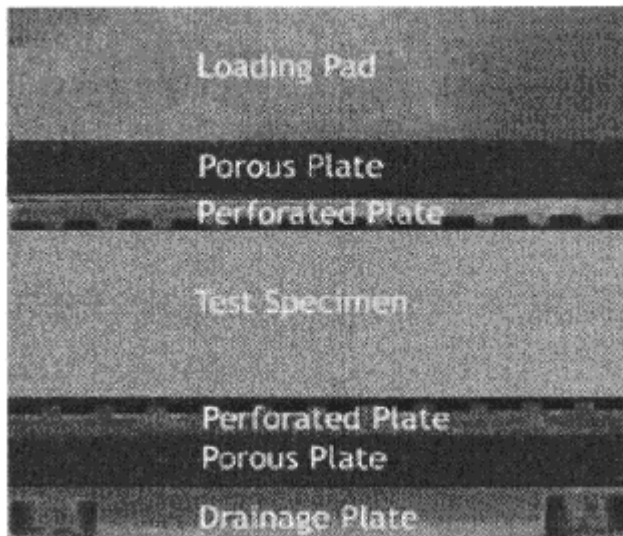
Obr. 6.34. Translační smykový přístroj.

Axiální normálové napětí je na zkoušený vzorek vyvozeno pákovým systémem, který pracuje v poměru 1:10. Vzhledem k ploše vzorku odpovídá tedy jeden kilogram na pákovém systému napětí

zhruba 35 kPa. Dynamometr v horní části přístroje je při smyku pevně přichycen k smykové, vzorkové, krabici a je tahově namáhán. Vlastní rychlost smykání zajišťuje elektrický motor umístěný v těle smykového přístroje.

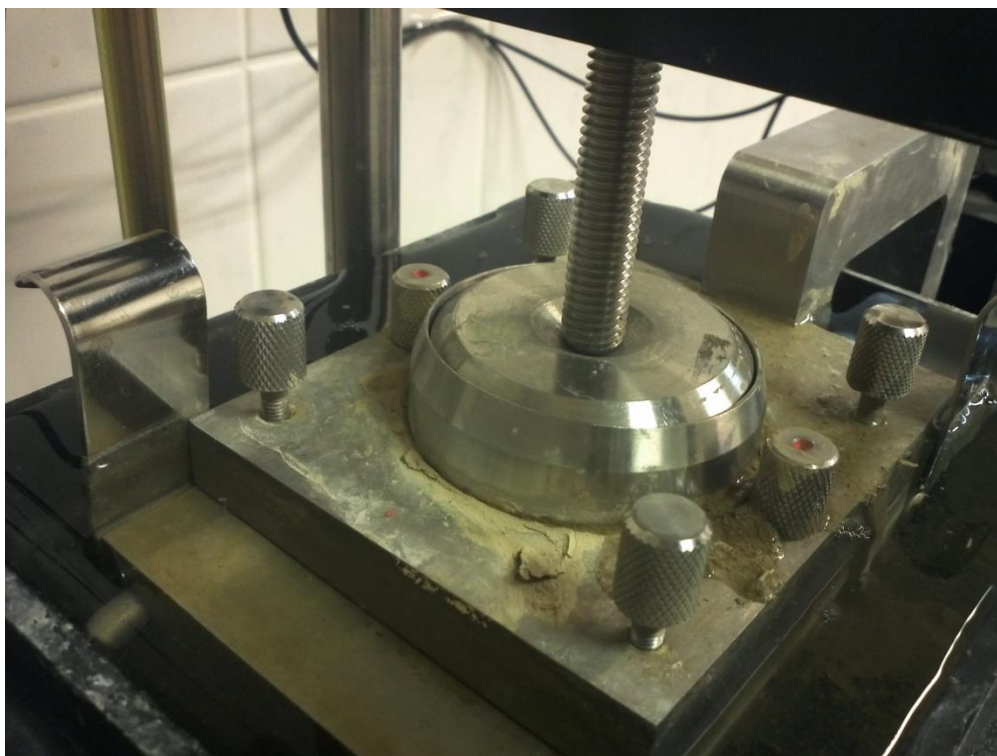
#### 6.4.2 Metodika zkoušky

Použitým materiálem v rámci zkoušek v translačním smykovém přístroji byla opět rekonstituovaná zemina (kapitola 2.1) brněnských téglů. Obrázek 6.35 znázorňuje schéma uspořádání vzorku, podstav a porézních destiček ve vzorkové krabici.



Obr. 6.35. Schéma uspořádání vzorku ve smykové krabici (ShearPLEX user manual, 2004)

Drenážní destičky nasytíme vodou v ultrazvukové lázni, která zajistí rovněž jejich případné pročištění. Dle manuálu provedeme osazení vzorku do smykové krabice. Pokud je vzorkem rekonstituovaný materiál, pak při konsolidaci dochází k vytlačování materiálu a tedy ke značnému snížení výšky vzorku. Pro zajištění dostatečné výšky vzorku po konsolidační fázi bylo při instalaci vzorku postupováno tak, že rekonstituovaný materiál byl nanesen po okraj vzorkové krabice. Dále bylo postupováno dle manuálu. Aby nedošlo k vychýlení, či zaražení horní perforované destičky o okraj horní části vzorkové krabice, byl zde umístěn prstenec, sloužící k vyřezávání vzorků z neporušené zeminy (obr. 6.36). Po osazení a zaklopení vzorku závažím, začne fáze konsolidace. Normálová napětí, pod kterými byl vzorek zeminy konsolidován, byla 100 a 200 kPa. Sedání vzorku při konsolidaci, posun smykové krabice a deformace dynamometru byla měřena pomocí digitálních úchylkoměrů.



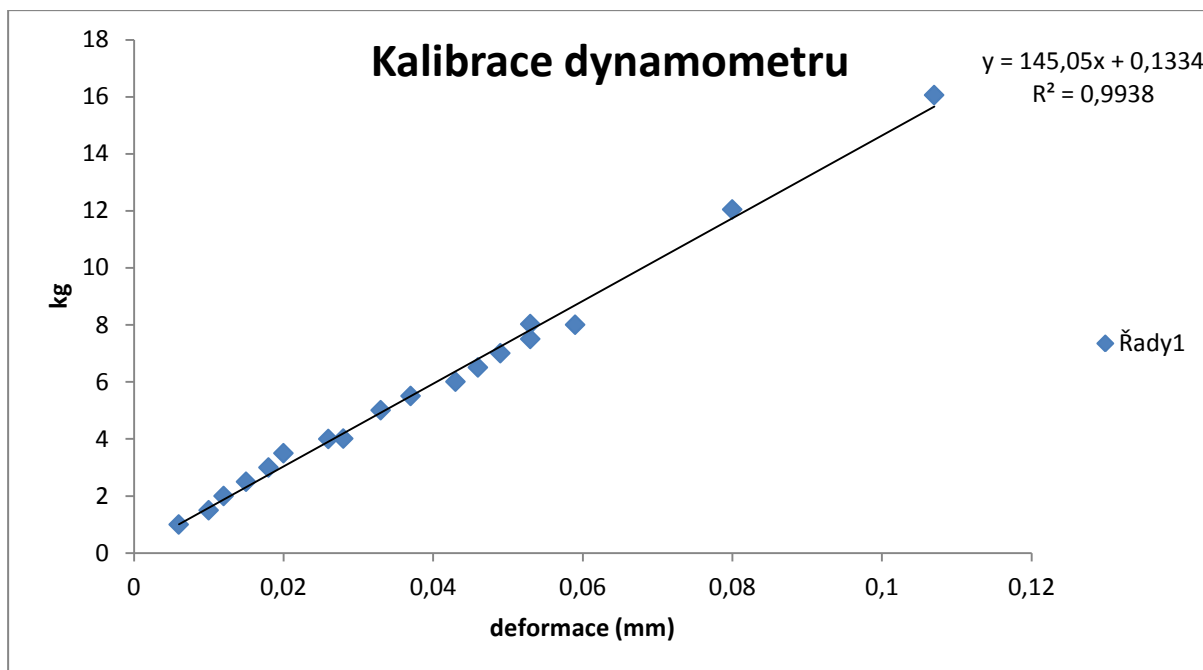
Obr. 6.36. Smyková krabice s prstencem během konsolidační fáze.

#### 6.4.3 Vyhodnocení zkoušky

Časová náročnost jedné zkoušky, se zahrnutím konsolidační fáze, se pohybovala v rozmezí dvou až tří týdnů a odvíjí se od zvoleného normálového napětí, při kterém má být vzorek konsolidován. Během celé zkoušky bylo potřeba denně zalévat vzorkovou krabici, aby nedošlo k vysušení vzorku a tím zkreslení výsledných dat. K vyhodnocení dat byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel, do něhož byl importován textový soubor, obsahující zaznamenané časové období průběhu zkoušky, deformace dynamometru a posun smykové krabice. Veškerý zápis dat do textového souboru probíhal ve zvoleném časovém intervalu.

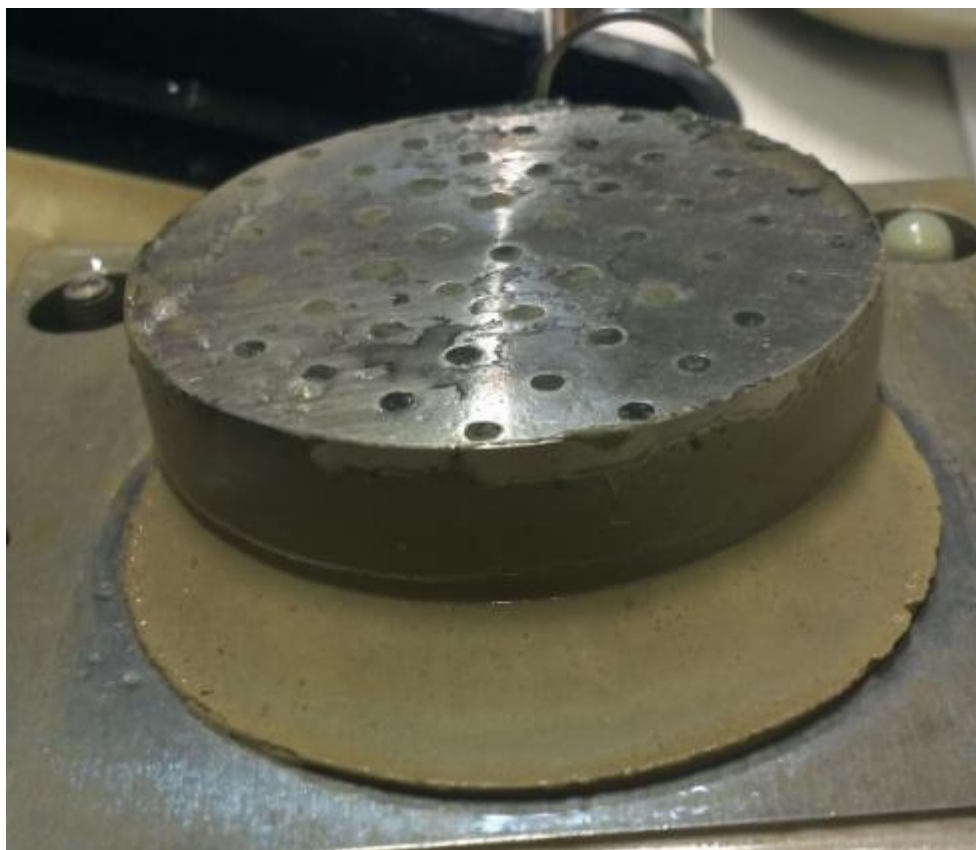
Před začátkem smyku byly odejmuty fixační šrouby, zamezující pohybu horní a dolní části smykové krabice, a byla nastavena výška smykové plochy pomocí čtyř šroubů k tomu sloužících. Výška smykové plochy byla nastavena podle doporučení manuálu ShearPlex User Manual (2004) na 0,4 mm, což odpovídalo polovině otočky všech čtyř šroubů.

Pro vyhodnocení grafu závislosti smykového napětí na napětí normálovém bylo potřeba provést kalibraci dynamometru. Dynamometr byl vyjmut ze smykového přístroje a postupným přidáváním závaží byla získána kalibrační křivka, jež udávala směrnici, s jakou byl ocelový dynamometr deformován (obr. 6.37)



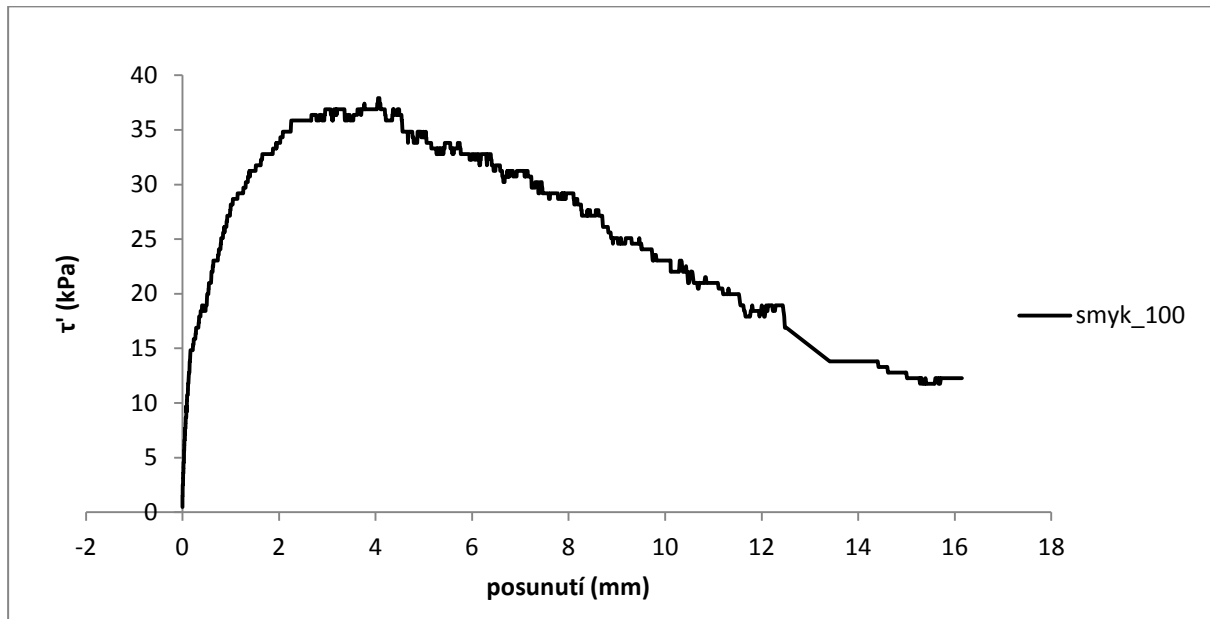
Obr. 6.37. Kalibrační křivka dynamometru translačního smykového přístroje.

Zkouška byla prováděna do takových přetvoření, aby bylo dosaženo kritické pevnosti. Po ukončení zkoušky byla vyjmuta smyková krabice a zkontrolována vzniklá smyková plocha (obr. 6.38).



Obr. 6.38. Vzniklá smyková plocha po ukončení zkoušky v translačním smykovém přístroji.

S pomocí kalibrační křivky dynamometru bylo vypočítáno výsledné smykové napětí a vyneseno do grafu v závislosti na posunutí (obr. 6.39).



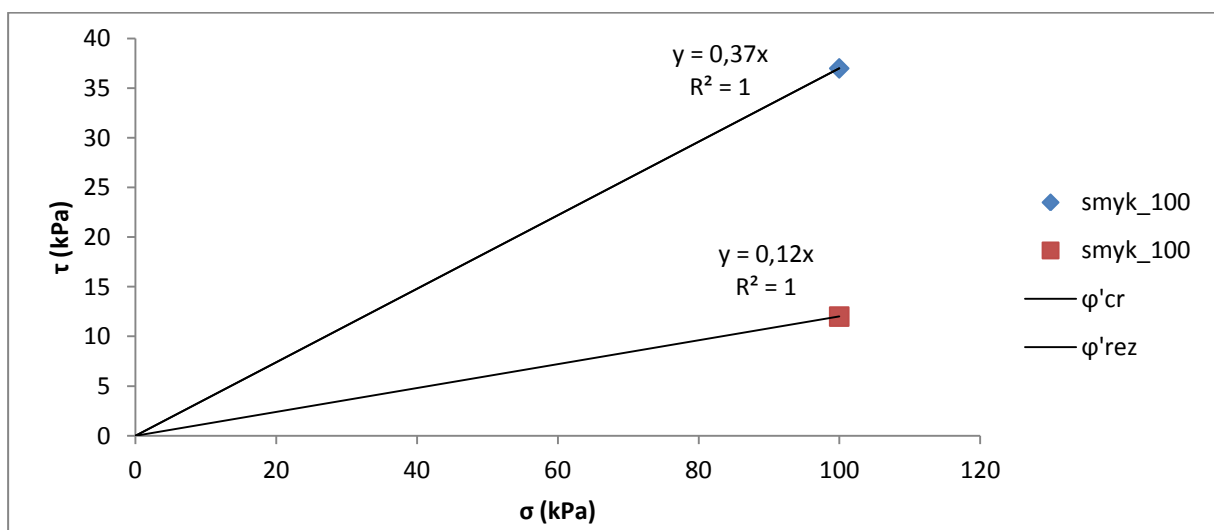
Obr. 6.39. Graf závislosti smykového napětí na posunutí.

Tabulka výsledných hodnot je uvedena pod textem.

Smykové pevnosti z translačního smykového přístroje					
	$\sigma$ (kPa)	$\tau'_{cr}$ (kPa)	$\phi'_{cr}$ (°)	$\tau'_{rez}$ (kPa)	$\phi'_{rez}$ (°)
smyk_100	100	37	21,7	12	6,9

Tab. 6.4. Kritická a reziduální pevnost, translační smykový přístroj.

Obálka pevnosti v kritickém a reziduálním stavu je vykreslena na Obr. 6.40.



Obr. 6.40. Kritická a reziduální obálka pevnosti získaná z translačního smykového přístroje.

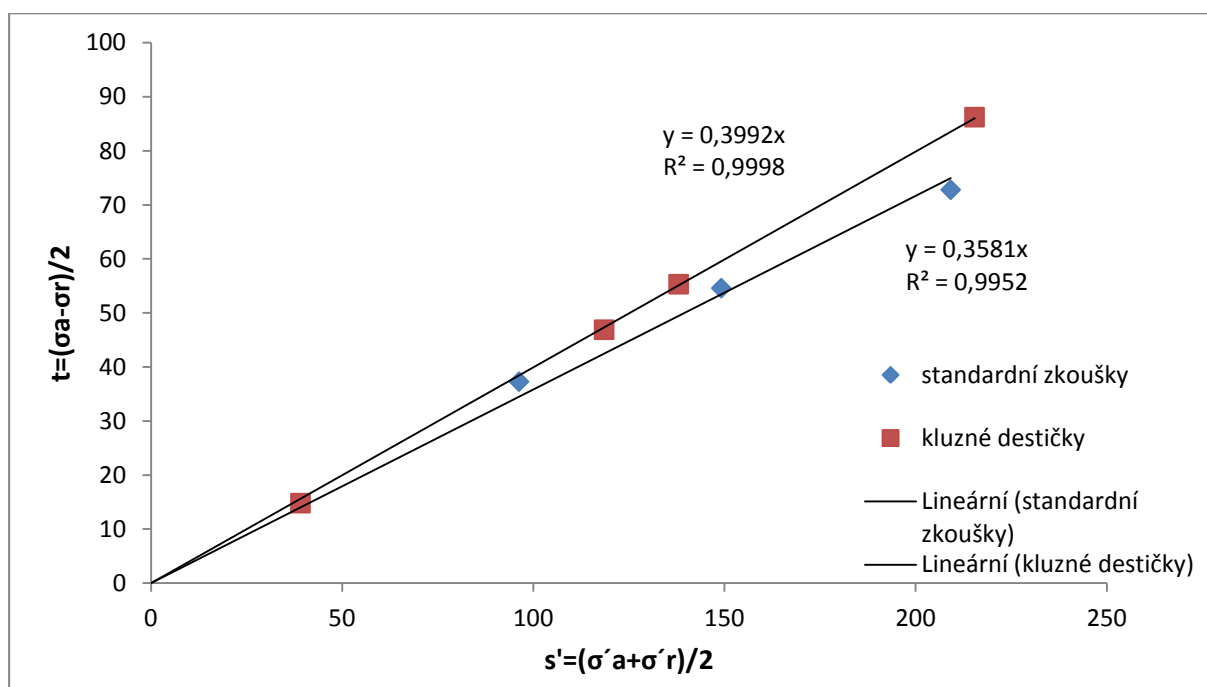
Jelikož byla provedena pouze jedna zkouška v translačním smykovém přístroji, je hodnota kritické pevnosti pouze orientační. Její hodnota bude porovnána s ostatními provedenými laboratorními zkouškami v kapitole o srovnání zkoušek.

## 7 DISKUSE

V této kapitole budou porovnány výsledky hodnot kritické pevnosti brněnských jíílů získaných z jednotlivých laboratorních experimentů. Kritická pevnost brněnského jíílů byla zjišťována za pomoci čtyř typů laboratorních zkoušek. Tyto zkoušky se dají rozdělit do dvou typů: triaxiální zkoušky a zkoušky provedené ve smykových krabicích.

### 7.1 Srovnání dat z triaxiálních zkoušek

První ze série zkoušek byly provedeny v trojosých přístrojích a to na standardních vzorcích a na vzorcích s použitím kluzných destiček. U obou typů zkoušek bylo dosaženo kritických stavů, přesto sklon obálky pevnosti se do značné míry liší. Výsledné hodnoty kritické pevnosti jsou společně vyneseny v grafu (obr. 7.1) závislosti  $t$  na  $s'$ .



Obr. 7.1. Kritické obálky pevnosti získané z triaxiálních zkoušek.

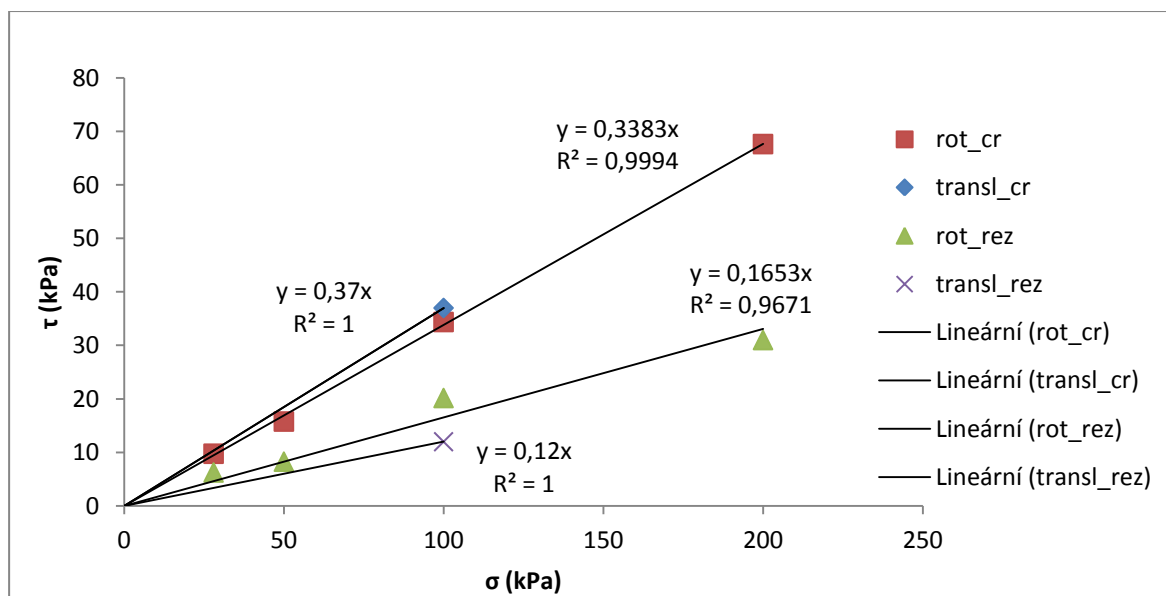
Sklon obálek pevnosti je u standardních zkoušek  $\varphi'_{cr} = 21^\circ$ , kdežto za použití kluzných destiček byla naměřena hodnota  $\varphi'_{cr} = 23,5^\circ$ . Rozpor v naměřených hodnotách by se dal přisuzovat vznikání lokálních smykových ploch během smykových zkoušek na standardních vzorcích, čemuž napovídá snižování deviátorového napětí patrné z grafu v kapitole 6.2.7.1. Jak již bylo řečeno, lze u standardních zkoušek pozorovat určité zakřivení obálky pevnosti, které vyplývá ze snižující se hodnoty mobilizovaného smykového napětí se zvyšujícím se efektivním napětím, při kterém byly vzorky konsolidovány. Tento jev naopak není pozorovatelný u zkoušek s kluznými destičkami. Pokud bychom zahrnuli data, jež získal Svoboda (2010) při své zkoušce na rekonstituovaném materiálu byla

by teorie zakřivení smykové obálky podpořena, jelikož Svoboda prováděl zkoušky při vysokých napětích a jeho výsledná hodnota úklonu byla  $\varphi'_{cr} = 18,9^\circ$ .

Snížení mobilizované pevnosti způsobené poklesem deviátorového napětí s rostoucím axiálním přetvořením způsobuje podhodnocování výsledného sklonu obálky kritické pevnosti a lze tedy předpokládat, že výsledná kritická pevnost bude odpovídat pevnosti naměřené při zkouškách s použitím kluzných destiček. Dalším faktorem ovlivňujícím výslednou smykovou pevnost při zkouškách na standardních vzorcích je soudkovité nabírání tvaru, což způsobuje změnu plochy, na kterou působí axiální napětí.

## 7.2 Srovnání dat z krabicových přístrojů

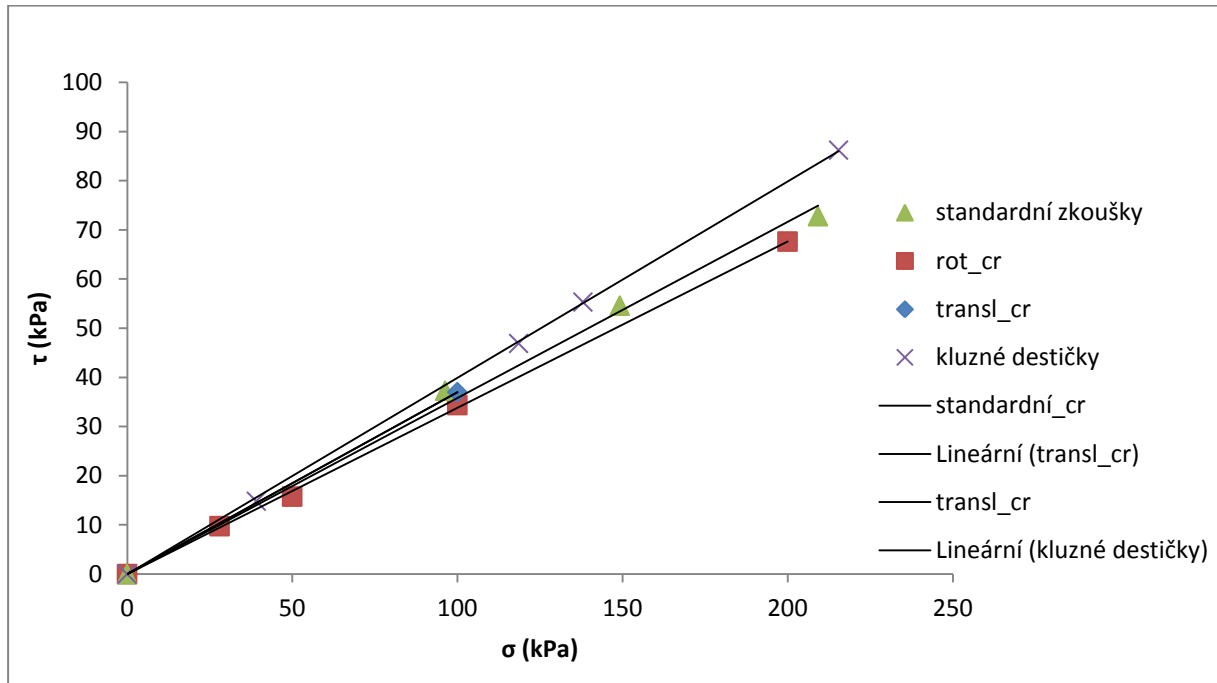
Hlavními rozdíly mezi použitými smykovými přístroji je to, jak vyvozují smykové napětí a lokalizace smykové plochy. U rotačního smykového přístroje dochází k vytvoření smykové plochy při kontaktu s horní porézni smykovou destičkou (víko smykové krabice), kdežto u translačního smykového přístroje, kde je smykové napětí vyvozováno torzí, se smyková plocha vytváří přímo ve vzorku. Lze tedy předpokládat, že i když rotační smykový přístroj více odpovídá prostému smyku, tak hodnota získaná z translační smykové krabice je věrohodnější. Na druhou stranu v translačním smykovém přístroji byla provedena pouze jedna zkouška a nelze jí považovat za dostatečně reprezentativní. Hodnoty kritické pevnosti z rotačního a translačního smykového přístroje jsou  $\varphi'_{cr} = 19,8^\circ$  respektive  $\varphi'_{cr} = 21,7^\circ$ . Obě obálky pevnosti získané ze smykových krabic jsou společně vyneseny do grafu pod textem (obr. 7.2). Společně je v grafu vykresleny i obálky reziduální pevnosti získané z rotačního a translačního smykového přístroje.



Obr. 7.2. Obálky pevnosti získané ze smykových přístrojů.

### 7.3 Srovnání triaxiálních zkoušek a zkoušek ze smykových přístrojů

Hodnoty kritické pevnosti získané ze zkoušek na smykových přístrojích jsou ve větší shodě s kritickou pevností naměřené při standardních triaxiálních zkouškách. Porovnání sklonu kritických obálek pevnosti je vyobrazeno v grafu na obr. 7.3.



Obr. 7.3. Porovnání kritických obálek pevnosti.

Pokud bychom vycházeli z práce Najsera a Boháče (2005), ve které autoři tvrdí, že v rotačním smykovém přístroji je vrcholová pevnost pevností kritickou, pak by za kritickou pevnost brněnských jíílů měla být považována  $\varphi'_{cr} = 19,8^\circ$ , jež je v dobré shodě se standardními triaxiálními zkouškami. Zároveň je třeba připomenout, že kritická pevnost stanovená v triaxiálních přístrojích na standardních vzorcích je podhodnocena vznikajícími smykovými plochami ve vzorku. Toto tvrzení by napovídalo, že skutečná kritická pevnost brněnských téglů je vyšší a odpovídá hodnotám naměřeným v rámci triaxiálních zkoušek za použití kluzných destiček.

## 8 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT S DATY Z PŘEDCHOZÍCH PRACÍ

Naměřená data z rotačního smykového přístroje a z triaxiálních zkoušek na standardních vzorcích jsou v souladu s daty, které naměřil Svoboda (2010). Shrnutí těchto dat je vypsáno v tabulce 8.1.

Odlišnost v kritické pevnosti z triaxiálních přístrojů je pravděpodobně způsobena zakřivením obálky pevnosti.

Pevnost v kritickém stavu brněnských jíílů		
	rotační smykový přístroj	triaxiální přístroj
Svoboda (2010)	$\phi'_{cr} = 19,9^\circ$	$\phi'_{cr} = 18,9^\circ$
Fencl (2012)	$\phi'_{cr} = 19,8^\circ$	$\phi'_{cr} = 21^\circ$

Tab. 8.1. Srovnání kritické pevnosti brněnských jíílů.

Jak již bylo několikrát řečeno, kritická pevnost ze standardních smykových zkoušek je podhodnocena možným vznikem smykových ploch při smykovém namáhání, jež vyplývá z poklesu deviátorového napětí. Svoboda (2010) ve své práci uvádí, že pozoroval během zkoušky na rekonstituovaném vzorku vznik lokálních smykových ploch. Předpokládal však, že přetváření bylo dostatečně homogenní a obálka kritické pevnosti mohla být určena.

Tyto výsledky jsou tedy v rozporu s kritickou pevností naměřenou s pomocí kluzných destiček, nicméně dobrá shoda výsledků s prací Svobody (2010) by vypovídala, že skutečnou kritickou pevností brněnských jíílů jsou hodnoty vyobrazené v tabulce 8.1, jelikož není dostupné ověření pro výsledky získané ze zkoušek s využitím kluzných destiček.

Veškeré výsledky kritické pevnosti z laboratorních experimentů jsou v rozporu s hodnotami naměřenými Boháčem (1999).

## 9 ZÁVĚR

Tato diplomová práce si dávala za hlavní cíl stanovení pevnosti v kritickém stavu brněnských jílu a vyřešení rozporu v hodnotách kritické pevnosti naměřené v pracích Boháče (1999) a Svobody (2010). Úspěšně byly provedeny všechny cílené laboratorní zkoušky a z nich získaná data byla vyhodnocena a porovnána s daty z předchozích prací. Výsledky ze standardních triaxiálních zkoušek a rotačního smykového přístroje byly v dobré shodě s daty, které naměřil Svoboda (2010). Hodnoty kritické pevnosti získané z rotačního smykového přístroje byly prakticky sobě rovné. Při porovnání mnou provedených standardních triaxiálních zkoušek na rekonstituovaném materiálu a jedné zkoušky provedené Svobodou (2010) se potvrdilo zakřivení obálky pevnosti se zvyšujícím se efektivním napětím. Naopak výsledky kritické pevnosti získané s použitím kluzných destiček poukazují na fakt, že při standardních trojosých zkouškách dochází k podhodnocování výsledných hodnot kritické pevnosti vlivem parazitických jevů v podobě vzniku lokálních smykových ploch. To by napovídalo, že skutečná pevnost v kritickém stavu je vyšší a odpovídá spíše výsledkům ze zkoušek na kluzných destičkách. Na druhou stranu kritická pevnost naměřená při triaxiálních zkouškách s kluznými podstavami nebyla nijak ověřena. Jelikož použití kluzných destiček při zkoušení jemnozrnných zemin není běžné, bylo by zapotřebí se do budoucna věnovat jejich aplikaci při laboratorních experimentech a přesnému popsání mechanického chování vzorků během zkoušek.

## 10 LITERATURA

Atkinson J. H., 2007. *The mechanics of soils and foundations*. Second edition. Taylor & Francis, New York, 442 s.

Baldi G., Hight D. W., Thomas G. E., 1998. *A reevaluation of conventional triaxial tests methods*. Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP 977, ASTM, Philadelphia, s. 219 – 263.

Boháč J., 1991. *Trojosé zkoušky vzorků písku s kluznými podstavami*. Výzkumná zpráva, Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Praha, 84 s.

Boháč J., Feda J., 1995. *Chování rozpukavých třetihorních jílu*. Konf. Zakládání staveb, Brno, str. 168 – 173.

Boháč J., 1999. *Pevnost a přetváření brněnského jílu*. XI. Mezinárodní vědecká konference, VUT Brno, str. 33-36.

Boháč J., 2009. *Mechanika zemin I – 4 – Stlačitelnost*. Přednášky z Mechaniky zemin I, Praha, 20 s.

Federico A., Elia G., Germano V., 2008. *A short note on the earth pressure and mobilized angle of internal friction in one-dimensional compression of soils*. Journal of GeoEngineering, Vol. 3, No. 1, str. 41 – 46

Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z., 2002. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.

Kakou B., Shimzu H., Nishimura S., 2001. *Residual shear strength of landslide soils by presheared flush testing for stability quantification*. The Electronic journal of Geotechnical engineering, Vol. 7

Mašín D., 1999. *Pevnost směsí zemin*. Bakalářská práce, PřF UK, Praha, 31 s.

Mesri G., Hayat T.M., 1993. *The Coefficient of earth pressure at rest*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, str. 647 – 666.

Müller P., Novák Z., et al., 2000. *Geologie Brna a okolí*. Český geologický ústav, Praha, 90 + 12 s.

Najser J., 2004. *Použití rotačního smykového přístroje a reziduální pevnost zemin*. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 69 s.

Najser J., Boháč J., 2005. *Pevnost zemin v kritickém stavu v torzním krabicovém přístroji*. K. Weiglová a kol. Sborník příspěvků 33. konference Zakládání staveb Brno, 37-42.

Nehyba S., Tomanová Petrová P. a Zágoršek K., 2008. *Sedimentological and palaeocological records of the evolution of the south-western part of the Carpathian Foredeep (Czech Republic) during the Early Badenian*. In: *Geological Quarterly*, 52 (1), Warszawa, str. 45-60.

Pavlová M., 2011. *Mocnost nadloží a překonsolidace brněnského jílu*. Bakalářská práce, PřF UK, Praha, 22 s.

ShearPLEX User Manual, 2004. *ShearPLEX User Manual*. VJT 2700. VJ Tech Ltd, 17. s

Sosna K., 2003. *Pevnostní charakteristiky směsí písku*. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 101 s.

Svoboda T., 2010. *Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu*. Doktorská disertační práce, PřF UK, Praha, 177 s.

Normy:

ČSN 73 0037 (730037), 1990. *Zemní tlak na stavební konstrukce*. Český normalizační institut, Praha, 56 s.

ČSN CEN ISO/TS 17892-9, 2005. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin*. Český normalizační institut, Praha, 16 s.