

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



Analýza kritické a vrcholové pevnosti prohněteného jílu
z lomu Jiří

Diplomová práce

Vlastimil Mužík

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha 2014

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

11.8.2014

Vlastimil Mužík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří umožnili vznik této práce. Ing. Janu Boháčovi CSc. děkuji za odborné vedení, konzultace a rady poskytované během přípravy této práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Sokolovská uhelná a.s. za poskytnutá data a RNDr. Petru Rojíkovi, Ph.D., RNDr. Martinu Šípkovi z poskytnutí informací ke studovanému materiálu. V neposlední řadě bych rád poděkoval Martinovi Krupičkovi, Tomáši Mohylovi a Monice Černíkové za pomoc při práci v laboratoři mechaniky zemin.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá stanovením kritické a vrcholové pevnosti výsypkového jílu z vnitřní výsypky lomu Jiří. V práci jsou stručně popsány pevnostní charakteristiky zemin, přičemž je kladen důraz na kritickou pevnost a její laboratorní stanovení, a chování jílovitých výsypek. V rámci diplomové práce byly vykonány laboratorní zkoušky v triaxiálních přístrojích se standardním uspořádáním a s kluznými podstavami, v rotačním a translačním smykovém přístroji. Výsledky z těchto zkoušek jsou diskutovány a porovnány s daty z geotechnického průzkumu vnitřní výsypky lomu Jiří z roku 2012.

Abstract

This Thesis deals with the determination of the critical and peak strength of clay fill soils from open mine Jiří. The strength of clay was determined by conventional triaxial apparatus and triaxial apparatus with frictionless specimens, and two types of direct shear box: translational and ring shear box. The results of laboratory tests are discussed and compared with data of geotechnical investigation of landslide in mine Jiří.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Úvod..... | 9 |
| 2. Pevnost zemín | 10 |
| 2.1 Typy pevnosti zemín | 11 |
| 2.1.1 Vrcholová pevnost..... | 11 |
| 2.1.2 Pevnost v kritickém stavu | 12 |
| 2.1.3. Reziduální pevnost | 14 |
| 2.2 Laboratorní stanovování pevnosti v kritickém stavu | 14 |
| 3. Výsypky | 18 |
| 3.1 Materiál výsypek | 18 |
| 3.2. Chování výsypek | 19 |
| 3.4 Pevnost výsypek | 22 |
| 3.5. Deformace výsypek..... | 24 |
| 4. Laboratorní experimenty | 26 |
| 4.1. Charakteristika materiálu | 26 |
| 4.2. Příprava vzorků | 27 |
| 4.3. Trojosé smykové zkoušky | 28 |
| 4.3.1. Popis přístroje..... | 28 |
| 4.3.2. Kluzné podstavy | 29 |
| 4.3.3 Zdroje chyb | 30 |
| 4.3.4 Kalibrace měřidel | 32 |
| 4.3.5 Průběh zkoušek | 34 |
| 4.3.6 Vyhodnocení zkoušek | 35 |
| 4.3.6.1 Výsledky zkoušek na rekonstituovaných vzorcích | 36 |
| 4.3.6.2 Výsledky zkoušek na neporušených vzorcích..... | 41 |
| 4.4. Zkoušky v rotačním smykovém přístroji | 47 |
| 4.4.1. Popis přístroje..... | 47 |
| 4.4.2 Zdroje chyb | 48 |
| 4.4.3 Kalibrace měřidel | 49 |
| 4.4.4 Průběh zkoušek | 50 |
| 4.4.5 vyhodnocení zkoušek | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5. Zkouška v translačním smykovém přístroji | 54 |
| 4.5.1 Popis přístroje..... | 54 |
| 4.5.2 Zdroje chyb a kalibrace měřidel..... | 56 |
| 4.5.3 Průběh zkoušky | 56 |
| 4.5.4 Vyhodnocení zkoušky | 57 |
| 5. Zkoušky provedené Hájkem | 60 |
| 6. Diskuse..... | 64 |
| 6.1 Srovnání výsledků zkoušek na rekonstituovaných vzorcích..... | 64 |
| 6.2 Srovnání výsledků zkoušek na neporušených vzorcích | 67 |
| 7. Závěr..... | 69 |
| 8. Seznam literatury | 70 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr.2.1 Kritéria porušení zemin podle Atkinson (1993)..... | 10 |
| Obr.2.2 Graf závislosti smykového napětí na posunu (Atkinson 1993)..... | 11 |
| Obr.2.3 Graf závislosti smykového napětí na přetvoření pro zeminy na suché(D) a mokré(W) straně od kritické (Atkinson, 1993). | 12 |
| Obr.2.4 Kritické stavy zemin podle (Atkinson, 1993). | 13 |
| Obr.2.5 Schéma vzorku při prostém smyku (Jewell, 1989). | 15 |
| Obr.2.6 Schéma vzorku při zkoušce v translační a rotační smykové krabici (Head, 1998). | 15 |
| Obr.2.7 Zobrazení orientace hlavních napětí při zkoušce v translačním smykovém přístroji (Head, 1998). | 16 |
| Obr.2.8 Působící napětí na vzorek při triaxiální zkoušce (Atkinson, 1993). | 16 |
| Obr.2.9 Čára kritických stavů pro trojosé zkoušky (Atkinson, 1993). | 17 |
| Obr.3.1 Čtyři různé stavy struktury výsypky popsané na základě modelování v minicentrifuze (Najser, 2010). | 22 |
| Obr.3.2 Výsledky smykových zkoušek na granulovaném jílu (Feda, 1998). | 23 |
| Obr.3.3 Výsledky smykových zkoušek na výsypkovém jílu s přirozenou vlhkostí (Herbstová a Herle, 2009). | 23 |
| Obr.3.4 Sekundární stlačitelnost granulovaného jílu (Feda 1998). | 24 |
| Obr.4.1 Obecné schéma triaxiálního přístroje (Atkinson, 1993). | 29 |
| Obr.4.2 Schéma uspořádání zkoušek s kluznými podstavami. | 30 |
| Obr.4.3 Zdroje chyb při vnějším měření osově deformace podle Baldi et al. (1988). | 31 |
| Obr.4.4 Ukázka kalibrační křivky snímače deviátorové síly. | 33 |
| Obr.4.5 Ukázka kalibrační snímače pórového tlaku. | 33 |
| Obr.4.6 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky se standardním uspořádáním. | 37 |
| Obr.4.7 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky s kluznými podstavami. | 37 |
| Obr.4.8 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky se standardním uspořádáním. | 38 |
| Obr.4.9 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky s kluznými podstavami. .. | 39 |
| Obr.4.10 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí v průběhu zkoušek se standardním uspořádáním. | 40 |
| Obr.4.11 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí v průběhu zkoušek s kluznými podstavami. | 40 |
| Obr.4.12 Obálky kritické pevnosti pro zkoušky na rekonstitovaných vzorcích. | 41 |

| | |
|---|----|
| Obr.4.13 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m | 42 |
| Obr.4.14 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36 – 36,5 m | 43 |
| Obr.4.15 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m..... | 44 |
| Obr.4.16 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m..... | 44 |
| Obr.4.17 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí v průběhu zkoušek na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m | 45 |
| Obr.4.18 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí na středním napětí v průběhu zkoušek na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m | 46 |
| Obr.4.19 Obálky pevnosti neporušených vzorků z vrtu SVVJ 2geo..... | 47 |
| Obr.4.20 Schéma vzorku v rotační smykovém přístroji (Head, 1998)..... | 48 |
| Obr.4.21 Kalibrační křivka dynamometru 15803A..... | 50 |
| Obr.4.22 Kalibrační křivka dynamometru 15803B..... | 50 |
| Obr.4.23 Graf závislosti smykového napětí na posunu..... | 52 |
| Obr.4.24 Obálka kritické a reziduální pevnosti ze zkoušek na rekonstituovaném materiálu..... | 54 |
| Obr.4.25 Schéma translačního smykového přístroje..... | 54 |
| Obr.4.27 Kalibrační křivka dynamometru translačního přístroje..... | 56 |
| Obr.4.29 Obálka kritické pevnosti ze zkoušky v translačním přístroji..... | 59 |
| Obr.5.1 Obálky pevnosti vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo – konvenční vyjádření (Hájek 2012)..... | 62 |
| Obr.5.2 Obálky pevnosti vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo – vyjádření s nulovou soudržností (Hájek 2012)..... | 62 |
| Obr.5.3 Obálky pevnosti vzorků z vrtu ZA 12geo – konvenční vyjádření (Hájek 2012). | 63 |
| Obr.5.4 Obálky pevnosti vzorků z vrtů ZA 12geo – vyjádření s nulovou soudržností (Hájek 2012)... | 63 |
| Obr.6.1 Srovnání obálek kritické pevnosti..... | 65 |
| Obr.6.2 Srovnání vrcholových obálek pevnosti s CSL..... | 68 |

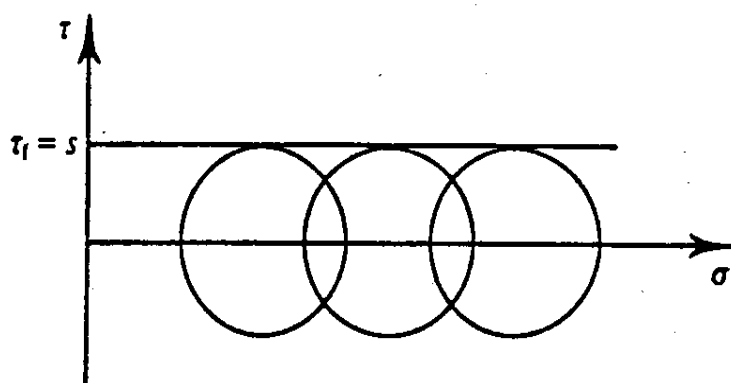
1. Úvod

Jak uvádí například Bolton (1979) je pevnost zemin v kritickém stavu, respektive úhel vnitřního tření v kritickém stavu, vhodným parametrem pro rutinní posouzení dlouhodobé stability nasycených zemin přirozených i umělých svahů (jako jsou například svahy jílovitých výsypek v severozápadních Čechách). V geotechnické praxi při posuzování stability jílovitých výsypek v České republice je stále dáována přednost vrcholové pevnosti, ačkoli pevnost v kritickém stavu je teoreticky vhodnější a její laboratorní stanovení je jednodušší (nevyžaduje neporušené vzorky).

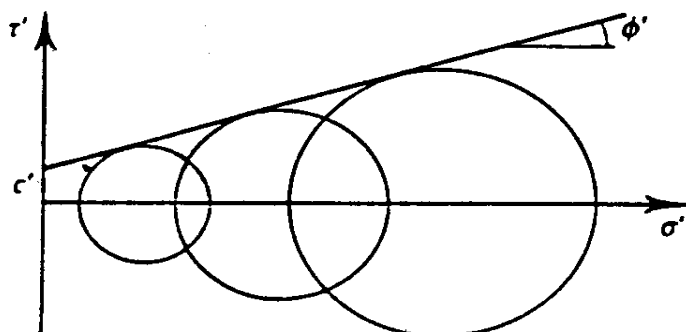
Cílem této práce je stanovit pevnost v kritickém stavu výsypkového jílu z vnitřní výsypky lomu Jiří, která byla v roce 2009 postižena rozsáhlým sesuvem. Pro stanovení pevnosti v kritickém stavu v rámci této práce byly použity přístroje, jimiž disponuje laboratoř mechaniky zemin Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky na Univerzitě Karlově v Praze. Konkrétně byly použity trojosé smykové přístroje, rotační a translační smykové přístroje. V případě trojosých smykových zkoušek byl zvolen typ CIUP (izotropně konsolidované nedrénované zkoušky s měřením pórového tlaku) se standardními podstavami a s kluznými podstavami.

2. Pevnost zemin

Pevnost materiálu lze obecně definovat jako maximální rozdíl napětí, které je materiál schopen vydržet. Hovoříme tedy o pevnosti smykové, která je charakterizována jako odpor proti usmyknutí zeminy na tvořící se smykové ploše. Atkinson (1993) rozlišuje pro zeminy dvě základní kritéria porušení (viz Obr.2.1). První, označované Trescovo kritérium, popisuje, že k porušení dojde, když Mohrova kružnice napětí dosáhne obálky dané vztahem: $\tau = s$, kde s je smyková pevnost materiálu a τ smykové napětí. Druhé kritérium, označované jako Mohr-Coulombovo kritérium říká, že pevnost se zvyšuje lineárně se zvyšujícím se efektivním napětím a k porušení dojde, když Mohrova kružnice napětí dosáhne obálky pevnosti popsanou rovnicí: $\tau' = c' + \sigma' \tan \phi'$, kde c' je soudržnost a ϕ' uhel vnitřního tření. Dále Atkinson (1993) uvádí, že pro většinu zemin platí $c' = 0$. Trescovo kritérium se uplatňuje v případě neodvodněného zatížení a Mohr-Colombovo v případě odvodněného zatížení.



(a) Tresca criterion

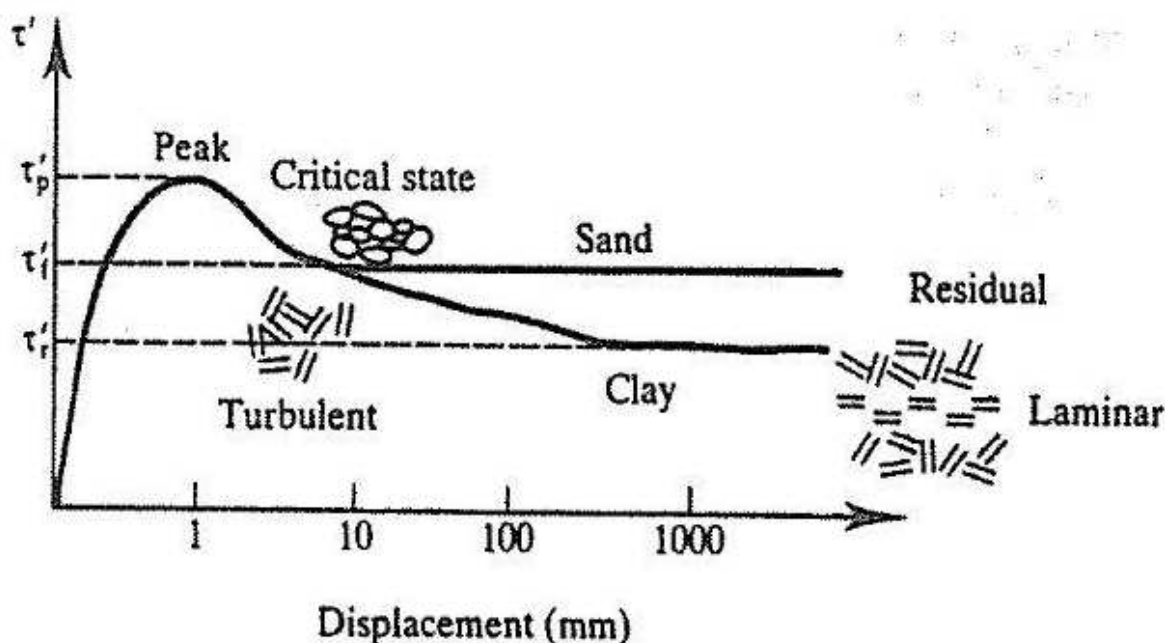


(b) Mohr-Coulomb criterion

Obr.2.1 Kritéria porušení zemin podle Atkinson (1993).

2.1 Typy pevnosti zemin

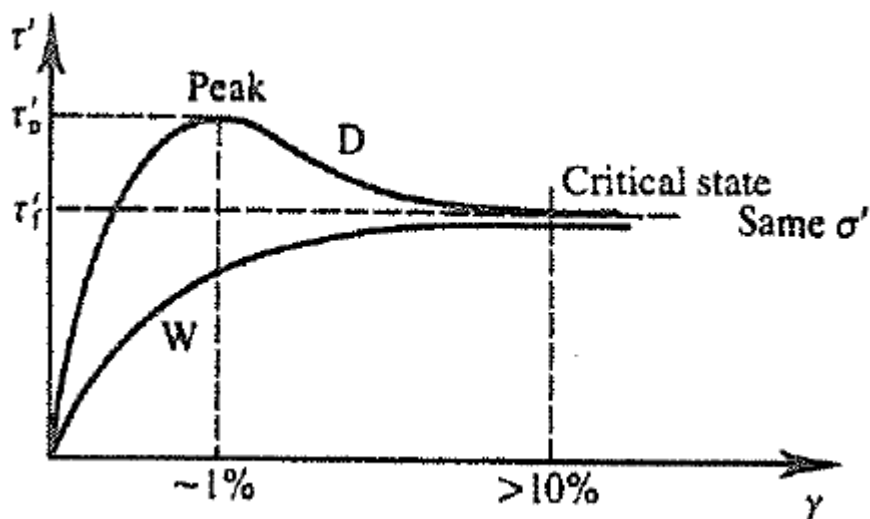
Mobilizovaná smyková pevnost zemin závisí na délce posunu na smykové ploše. Pevnost zemin si můžeme definovat pro jakékoliv posunutí jako smykové napětí, kterému zemina při tomto posunutí vzdoruje. Atkinson (1993) rozlišuje pro zeminy vrcholovou pevnost ϕ_p , pevnost v kritickém stavu ϕ_{cr} a reziduální pevnost ϕ_{rez} . Jednotlivé typy pevnosti jsou zobrazeny na Obr.2.2 v grafu závislosti smykového napětí na posunu.



Obr.2.2 Graf závislosti smykového napětí na posunu (Atkinson, 1993).

2.1.1 Vrcholová pevnost

Vrcholová pevnost je maximální smykové napětí, které je zemina schopna vydržet. Atkinson (1993) uvádí, že v případě zemin na suché straně od kritické (ulehlých hrubozrnných zemin a překonsolidovaných jemnozrnných zemin) smykové napětí rychle stoupá již při malém posunu až do mezní hodnoty, která právě představuje vrcholovou pevnost. Po dosažení této hodnoty začne smykové napětí klesat. V případě zemin na mokré straně od kritické (kyprých hrubozrnných zemin a normálně konsolidovaných jemnozrnných zemin) pevnost pozvolna stoupá bez znatelného vrcholu do limitní hodnoty představující kritickou pevnost. V tomto případě se vrcholová pevnost rovná pevnosti kritické. Z tohoto vyplývá, že vrcholová pevnost významně závisí na struktuře zeminy.



Obr.2.3 Graf závislosti smykového napětí na přetvoření pro zeminy na suché(D) a mokré(W) straně od kritické (Atkinson, 1993).

Pro hrubozrnné zeminy udává Mitchell (1993), že vrcholová pevnost je dána součtem následujících faktorů: tření na kontaktech jednotlivých zrn zeminy, přeskupování částic a dilatance, v případě velkého normálového napětí a malé pórovitosti také drcení zrn zeminy. U jemnozrnných zemín jsou nejvýznamnější faktory ovlivňující vrcholovou pevnost zemín tyto: struktura zeminy a stupeň překonsolidace, mineralogické složení, adsorbované kationty, pH.

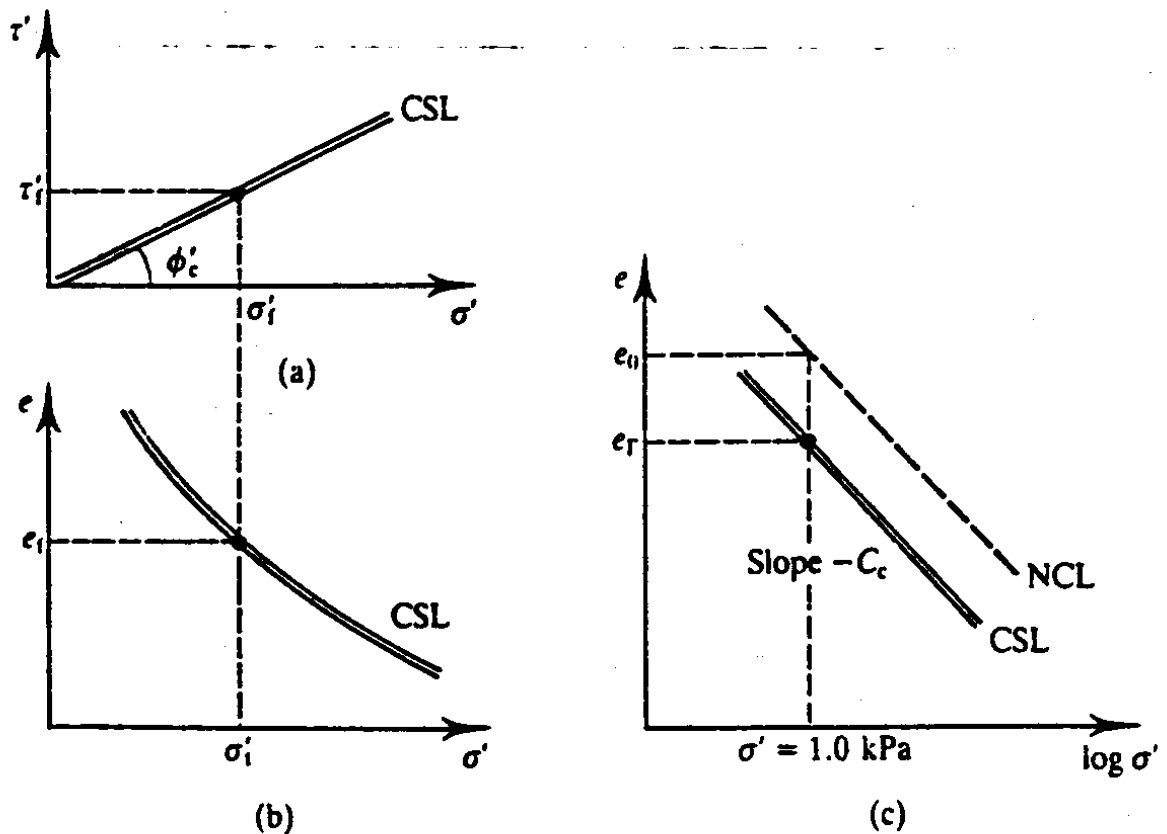
Z výše uvedeného vyplývá, že vrcholová pevnost není vhodný parametr pro popis pevnosti v geotechnické praxi.

2.1.2 Pevnost v kritickém stavu

Jak je uvedeno v kapitole 2.1.1 po překročení vrcholové pevnosti, která je závislá na struktuře zeminy, dosáhne vždy zemina limitní hodnoty smykového napětí, která je označována jako pevnost v kritickém stavu, bez ohledu na původní strukturu zeminy. Během smyku se zemina na smykové ploše dostane do stavu turbulentního tečení a zemina se chová jako ideálně plastický materiál, kterého je možné dosáhnout jen při určité pórovitosti. Pokud je zemina na suché straně od kritické, tak se pórovitost zvětší a pokud je na mokré straně od kritické, tak se pórovitost zmenší. Pórovitost tedy vždy dosáhne stejné hodnoty a pevnost v kritickém stavu je vždy stejná, nezávisle na původní pórovitosti.

Atkinson (1993) uvádí, že kritického stavu je dosaženo po přetvoření nejméně 10 %. Najser a Boháč (2005) udává, že z obecného výchozího stavu je pro dosažení kritického stavu při trojosé zkoušce potřebné obvykle osové přetvoření 15 až 20%. Santamarina et al. (2001) uvádějí, že při zkouškách písku ve smykové krabici bylo potřebné přetvoření 50 %. Rozhodující však není velikost osového přetvoření, ale výše uvedený ustálený stav.

Atkinson (1993) popisuje kritický stav zemin pomocí čáry kritických stavů CSL, která udává vztah mezi smykovým napětím, normálovým napětím a číslem pórovitosti. Tento vztah je zobrazen na Obr.2.4.



Obr.2.4 Kritické stavy zemin podle Atkinson (1993).

Čára kritický stavů CSL je pak popsána pomocí následujících rovnic:

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \Phi_c$$

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

kde τ'_f je efektivní smykové napětí při porušení v kritickém stavu, σ'_f je efektivní normálové napětí při porušení v kritickém stavu, Φ_c je úhel vnitřního tření v kritickém stavu e_f je číslo pórovitosti při porušení v kritickém stavu, C_c je sklon čáry normálního stlačení NCL, která je rovnoběžná s čarou kritických stavů CSL. Parametr e_r je číslo pórovitosti v kritickém stavu při referenčním napětí $\sigma' = 1 \text{ kPa}$ a udává pozici čáry kritických stavů CSL stejně jako počáteční číslo pórovitosti e_0 definuje pozici čáry normálního stlačení NCL.

2.1.3 Reziduální pevnost

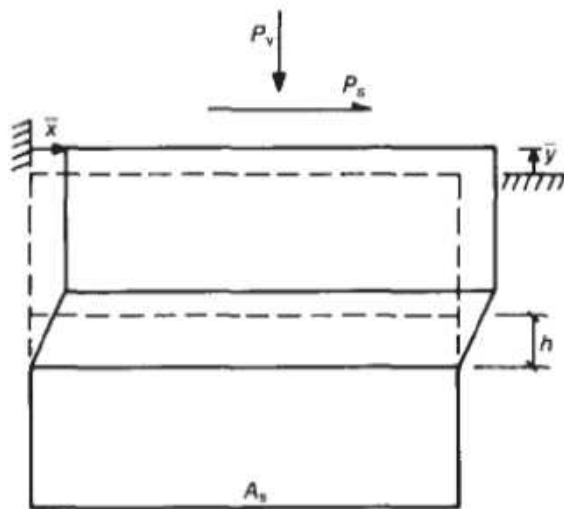
U jemnozrnných zemin, kde převládají plochá zrna (především jílové minerály), dochází při dalším posunu po dosažení kritického stavu k poklesu pevnosti směrem k reziduální pevnosti. Tento pokles je dán tím, že při velkém posunu nezůstávají zrna na smykové ploše v turbulentního tečném, ale dojde k uspořádání plochých zrn ve směru smyku a začne převládat kluzné chování. V případě maximálního možného usměrnění částic dosáhne zemina své nejnižší možné pevnosti, která je označována jako reziduální. Skempton (1985) udává hraniční hodnotu jílových minerálů, při které ještě můžeme zaznamenat pokles z kritické na reziduální pevnost 25%. U hrubozrnných zemin, kde převládá kulovitý tvar zrn, nedochází k uspořádání zrn a kritická pevnost je konečná hodnota odvozené pevnosti.

Reziduální pevnost se uplatňuje především při analýze a sanaci již aktivovaných sesuvů, nebo jak uvádí Burland et al. (1996) i u nově vznikajících sesuvů v intenzivně rozpukaných jílovcích, kde skutečná pevnost leží často mezi kritickými a reziduálními parametry. Reziduální pevnost bývá také často využívána při výpočtech stability opěrných zdí nebo plášťových pilot, kde k mobilizaci reziduální pevnosti dochází při zarážení, což popisují například Lehane a Jardine (1992) a Lemos a Vaughan (2000).

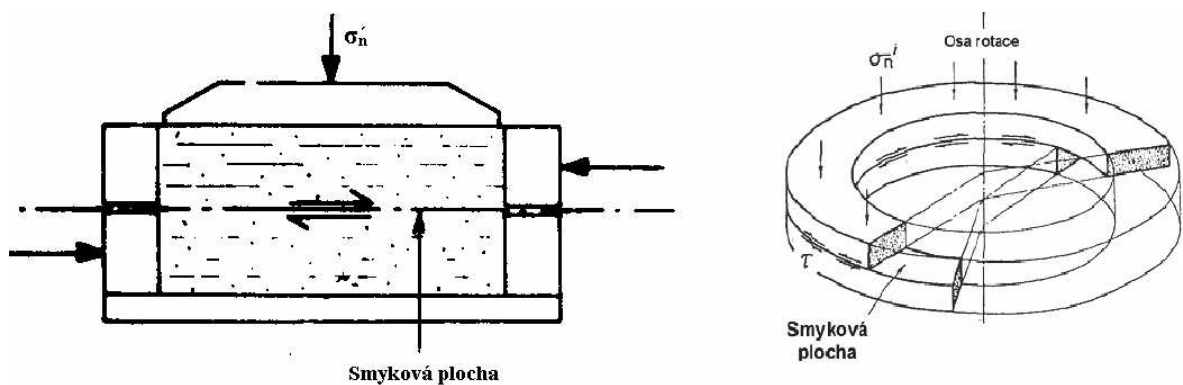
2.2 Laboratorní stanovování pevnosti v kritickém stavu

Laboratorní zkoušky pro určování kritické pevnosti můžeme rozdělit do dvou kategorií: zkoušky typu „direct shear“ a „undirect shear“. Zkoušky typu „direct shear“ jsou zkoušky při nichž přímo měříme velikost smykového napětí. V případě zkoušek typu „undirect shear“ je smykové napětí vypočítáváno ze známých hodnot hlavních napětí.

Mezi nejčastěji používané zkoušky z kategorie direct shear patří zkoušky v translačním a rotačním smykovém přístroji a v zahraničí také zkoušky založené na principu prostého smyku. U přístrojů založených na principu prostého smyku není přesně předurčena smyková plocha a často tak vzniká širší smyková zóna, ve které se částice pohybují v rovnoběžných plochách ukloněných od horizontální roviny. Tyto přístroje poskytují poměrně homogenní distribuci smykového napětí a rovnoměrnou smykovou deformaci. Schématické znázornění prostého smyku je na Obr.2.5.



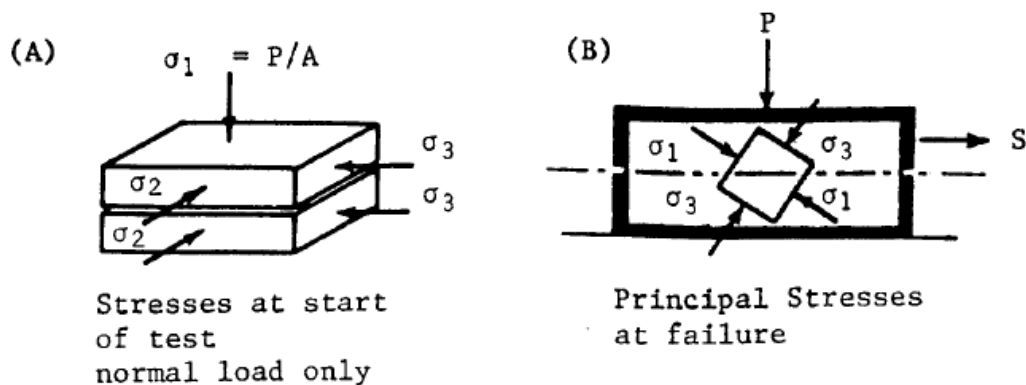
Obr.2.5 Schéma vzorku při prostém smyku (Jewell, 1989).



Obr.2.6 Schéma vzorku při zkoušce v translační a rotační smykové krabici (Head, 1998).

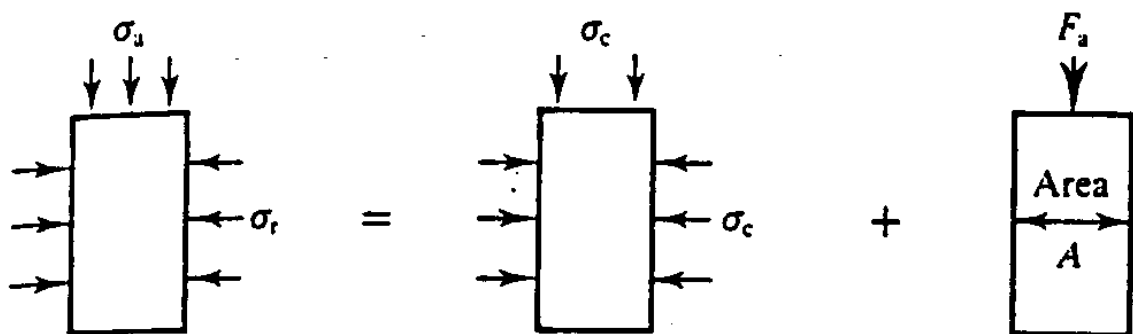
U translačních krabicových přístrojů a některých typů rotačních krabicových přístrojů (např. typ Bromhead) je smyková plocha předurčena mezi horní a dolní čelist krabice. Feda (1977) udává, že předurčení smykové plochy a neúplnosti vymezení stavu napjatosti

vzorku, což spolu s nehomogenitou napjatosti krabicovou zkoušku znehodnocuje. Během zkoušky dochází k rotaci směrů hlavních napětí (Obr.2.6) a jejich orientace není v průběhu zkoušky přesně známa. Z tohoto důvodu nelze získat dostatek informací pro vykreslení Mohrovy kružnice napětí a pevnost se vyhodnocuje na základě přímo měřených hodnot smykového a normálového napětí. Přes všechny nevýhody zkoušek ve smykových krabicích patří tyto zkoušky k nejpoužívanější v geotechnické praxi a jejich objektivitu prokázal například Rowe (1969) korelacemi s lépe interpretovatelnými zkouškami.



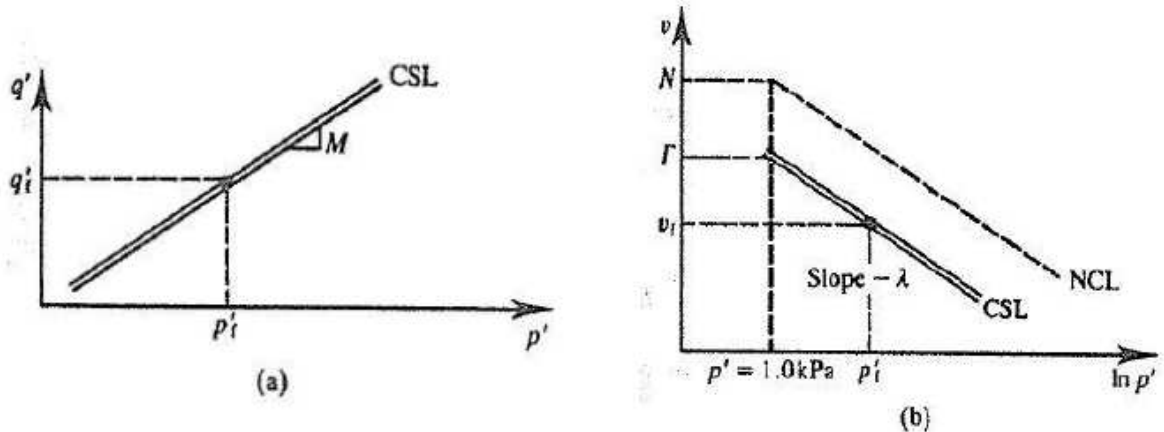
Obr.2.7 Zobrazení orientace hlavních napětí při zkoušce v translačním smykovém přístroji (Head, 1998).

Mezi nejčastěji používané zkoušky z kategorie „undirect shear“ patří trojosé smykové zkoušky. Při trojosých smykových zkouškách je zemina vystavena působení konstantního radiálního napětí σ_r a axiálnímu napětí σ_a (viz Obr.2.8), které se v průběhu zkoušky zvětšuje až do porušení vzorku. Během trojosé smykové zkoušky nedochází ke změně orientace hlavních napětí $\sigma_1 = \sigma_a$ a $\sigma_3 = \sigma_r$. K dalším výhodám oproti krabicovým zkouškám patří možnost měření pórového tlaku a také to, že smyková plocha není předem předurčena konstrukcí přístroje.



Obr.2.8 Působící napětí na vzorek při triaxiální zkoušce (Atkinson, 1993).

V trojosých smykových přístrojích je tedy možné dostatečně přesně měřit a stanovit efektivní napětí a přetvoření. Čára kritických stavů CSL získána z trojosých smykových zkoušek je zobrazena na Obr.2.9.



Obr.2.9 Čára kritických stavů pro trojosé zkoušky (Atkinson, 1993).

Čára kritický stavů CSL je pak popsána pomocí následujících rovnic:

$$q'_f = Mp'_f$$

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

kde q'_f je deviátorové ($q' = \sigma'_a - \sigma'_r$) napětí při porušení, p'_f střední hlavní napětí ($p' = \frac{1}{3}(\sigma'_a + 2\sigma'_r)$) při porušení, M je směrnice CSL v rovině p'/q' , v_f je specifický objem při porušení, Γ je specifický objem zeminy v kritickém stavu při $p' = 1,0$ kPa, λ určuje gradient CSL a izotropní NCL, tyto dvě čáry jsou zároveň rovnoběžné.

3. Výsyvky

Výsyvky lze rozdělit na vnitřní výsyvky, zasypaný vyhloubený prostor, a vnější výsyvky, které jsou sypány mimo lom. Z hlediska geomechaniky není principiální rozdíl mezi vnitřní a vnější výsypkou, vnitřní bývá založena na podloží sloje s lepšími parametry, než má povrch terénu pod vnější výsypkou.

3.1 Materiál výsypek

Do výsypek se zakládají zeminy z nadloží uhelných slojí, nebilanční uhlí, stavební suť, strusky a jiné materiály. Většinu materiálu však tvoří skrývkové zeminy z nadloží uhelné sloje.

V sokolovské pánvi tvoří skrývku převážně jílovce cyprisového souvrství. Pešek et al. (2010) udávají, že téměř celé cyprisové souvrství je tvořeno slabě karbonátickými bitumenními jílovci se střídajícími se světlejšími a tmavšími laminami o průměrné mocnosti klem 0,2 mm. Mineralogické a chemické složení v profilu cyprisového souvrství kolísá v závislosti na denudaci kaolinických zvětralin, ochlazování klimatu a vulkanismu. Z jílových minerálů dominuje při bázi souvrství kaolinit, výše se přidávají illit a deficit, které postupně převládají. Ve svrchní části souvrství se vyskytují v proměnlivém množství montmorillonit, nontronit a chlorit. Jílovce obsahují jemně rozptýlenou alifatickou bitumenní substanci, která povléká povrch lamin, jílových částí a trhlinek. Pro cypřišové souvrství je charakteristická jemně rozptýlená příměs 5-22 % karbonátů, převážně sideritu, méně kalcitu, dolomitu a ankeritu. Klastické sedimenty nejsou v cyprisovém souvrství časté. Základní geomechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulce. Miocénní cyprisové souvrství je překryto pleistocenními sedimenty, jejichž mocnost zpravidla nepřesahuje 3 m, tvořenými převážně sprašovými a štěrkovitými hlínami. V místech, kde je sloj tektonicky vyvlečena a zčásti porušena zlomy, je ze stabilitních důvodů přibírán pruh podloží, který zahrnuje pestrou škálu hornin od kaolinizovaných žul přes celé starosedelské souvrství (pískovce a křemence), novosedelské souvrství (pískovce, písčité jílovce, sloj Josef, zjílovělé a zkarbonatizované tufy) a sokolovské souvrství (převážně kaolinizované tufity a uhelnaté jílovce).

| Parametr | Jednotka | Počet měření | Aritmetický průměr | Min. hodnota | Max. hodnota | Směrodatná odchylka |
|----------------------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Přirozená vlhkost hmotnostní w | % | 81 | 29,11 | 14,1 | 51,9 | 5,48 |
| Přirozená vlhkost objemová w_V | % | 81 | 42,31 | 25,3 | 53,6 | 4,20 |
| Mez tekutosti w_L | % | 81 | 81,91 | 51,7 | 183,6 | 19,70 |
| Mez plasticity w_p | % | 81 | 27,86 | 19,0 | 45,4 | 0,55 |
| Index plasticity I_p | % | 81 | 54,05 | 26,0 | 138,2 | 17,84 |
| Stupeň konzistence I_C | | 81 | 0,98 | 0,8 | 1,2 | 0,094 |
| Objem. hmotnost vlhká σ | kg. m ⁻³ | 81 | 1 897 | 1 560 | 2 050 | 90,51 |
| Objem. hmotnost suchá σ_d | kg. m ⁻³ | 81 | 1 474 | 1 034 | 1 624 | 118,42 |
| Měrná hmotnost σ_s | kg. m ⁻³ | 81 | 2 559 | 2 060 | 2 740 | 114,61 |
| Pórovitost a | % | 81 | 42,3 | 27,8 | 56,5 | 4,39 |
| Stupeň nasycení S_r | % | 81 | 98,16 | 86,9 | 100,0 | |
| Penetrace P_p | N. cm ⁻¹ | 48 | 140,7 | 47,7 | 392,6 | 81,65 |

Tab.3.1 Přehled geomechanických vlastností hornin cyprisového souvrství. Rojník s využitím údajů VÚHU Most a SGG Praha v Pešek et al. (2010).

3.2 Chování výsypek

Výsypky jsou materiály s dvojitou pórovitostí. Celková pórovitost výsypky (n_t , e_t) je dána kombinací intragranulární pórovitosti (n_i , e_i), která charakterizuje pórovitost hrud jílu a intergranulární pórovitosti (n_e , e_e), která charakterizuje objem makro pórů mezi hrudami jílu. Obě pórovitosti jsou vzájemně propojeny pomocí rovnic uvedených níže (Fedá, 1998).

$$n_t = n_i (1 - n_e) + n_e$$

$$e_t = e_i (1 + e_e) + e_e$$

Fedá (1998) uvádí, že typická pórovitost čerstvé sypaniny může dosáhnout až 70%.

Z výsledků výzkumů Herštuse et al. (1991) plyne, že v počáteční fázi má sypanina vysokou mezerovitost, je průvzdušná, jednotlivé hroudy jsou při plné nasycenosti zpevnovány negativním pórovým tlakem. Podle dosavadních zkušeností mají vrstvy při povrchu výsypky různé vlastnosti. Zemina ve svrchní vrstvě má kusovitý charakter, je mezerovitá a průvzdušná. Tato svrchní vrstva je vystavena cyklickým změnám obsahu vody, to může vést k rychlejší degradaci struktury s dvojitou pórovitostí (Charles a Watt 2001). Kostkanová (2011) pozorovala degradaci hrud vystaveným cyklům zvlhčování a sušení a zjistila, že jedno zvlhčení hroudy při její přirozené vlhkosti je nedostatečné, aby rozrušilo její strukturu. Zatímco aplikace cyklů

vede k rozrušení hroudy. Z toho vyplývá, že oscilace sání vede k degradaci granulační struktury a uzavírání makropórů. Dykast (1993) uvádí, že změny v důsledku klimatických vlivů lze pozorovat až do hloubky cca 5 metrů. Pod ní následuje přechodová vrstva, v níž je zachován granulární charakter, ale průvzdušnost a propustnost řádově klesá. Nejspodnější vrstvu lze popsat jako relativně homogenní neprůvzdušnou vrstvu s velmi malou propustností. Uzavírání intergranulárních pórů výrazně snižuje propustnost výsypky a zvyšuje stupeň nasycení. Ještě 20 – 30 let po ukončení sypání není zemina zcela homogenní a struktura s dvojí pórovitostí přetrvává, zejména ve svrchní vrstvě. I přes uzavření makro pórů lze očekávat podobné chování jako popsali Robinson et al. (2005): Překonsolidované zóny jsou reprezentovány původními hručkami jílu a normálně konsolidované zóny jsou reprezentovány makropóry vyplněnými materiálem odděleným z vnějších částí hrud jílu.

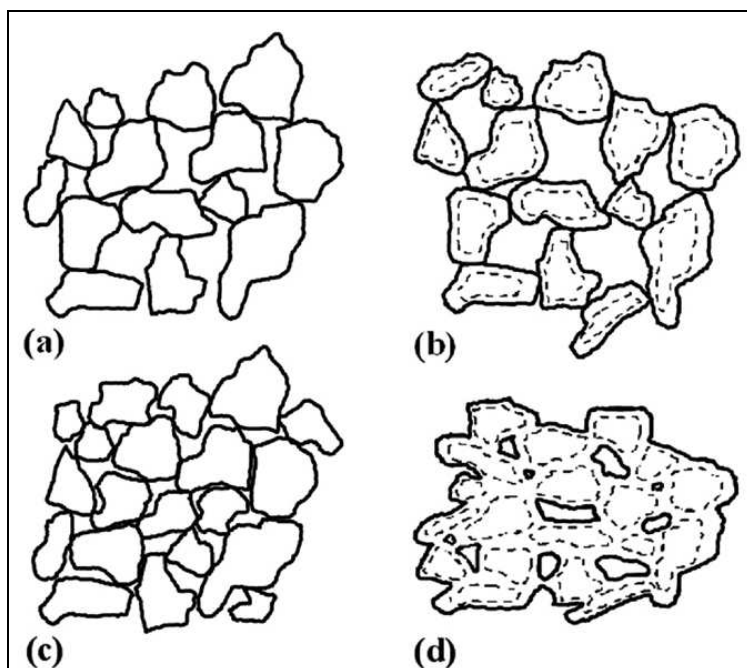
Komplexními mechanismy přechodu výsypek z chování granulárních zemin k chování soudržných zemin se zabýval Feda (1998). Byly popsány následující strukturní mechanismy:

1. Drcení hrud jílu – častěji dochází k drcení hrud s vyšší vlhkostí, kdy je pevnost hrud nižší vlivem nižšího sání. U suchých hrud je k drcení nutné vyšší napětí na kontaktech hrud.
2. Stlačení hrud – hroudy jílu nejsou rozdrceny, ale jsou stlačené a duktilně přetvářené. Dochází tak k postupnému uzavírání makropórů. Tento typ deformace je typický pro vlhký jíl.
3. Přeskupení hrud – skládá se z posouvání a otáčení hrud, které vede ke snížení intergranulární pórovitosti zeminy.
4. Vliv kontaktních vazeb – je typické pro vlhké hroudy jílu na jejichž kontaktech působí sání, které zabraňuje přeskupování hrud. Až do porušení kontaktních vazeb způsobuje tento mechanismus vyšší intergranulární pórovitost než by odpovídala struktuře suchých hrud.

Jako produkt těchto elementárních mechanismů vzniká následující komplex strukturálních procesů:

1. Difuze – Difuze je samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice druhé látky téhož skupenství. V mechanice zemin je typickým příkladem difuzního procesu konsolidace.
2. Perkolace – Perkolace je v geologii definovaná jako pomalé proudění vody v pórech zemin a propustných hornin.
3. Normalizované chování – Mechanické chování, které může být popsáno pomocí jedné konstituční funkce za použití bezrozměrného vztahu. Lineární Mohr-Colombova obálka je typickým příkladem normalizovaného parametru.
4. Kolaps – Kolaps je náhlá změna mechanického chování zeminy z důvodu změny její struktury. Kolaps je třeba očekávat u zemin s vysokou pórovitostí, protože mají metastabilní strukturu. Čerstvá výsypka patří k těmto materiálům. Kolaps může mít dvě formy: zhroucení a bifurkační kolaps.

Z výše uvedeného vyplývá, že za stejných výchozích podmínek (shodná zdrojová vrstva, stejná mechanizace apod.) se mohou vytvořit výsypkové vrstvy se zcela odlišnými vlastnostmi. Na základě výsledků zkoušek v minicentrifuze uvádí Najser (2010), že byly identifikovány čtyři rozdílné stavy struktury výsypky (Obr. 3.1). Obr. 3a ukazuje strukturu volně nasypaných hrudek „suchého“ jílu (termín „suchý“ v tomto případě charakterizuje materiál vysušený při 50 °C, jehož vlhkost odpovídá přibližně 5 %). Pokud jsou hrudky nasypané do vody, vznikne struktura s vyšší intergranulární pórovitostí (Obr.3.1b). Obrázek 3.1c ukazuje změnu struktury „suchého“ modelu výsypky po zatížení – dochází k snižování celkové pórovitosti vlivem drcení a přeskupování hrudek, přičemž intergranulární póry zůstávají stále vzájemně propojené. Obrázek 3.1d znázorňuje změnu struktury výsypky v důsledku zatížení hrudek nasypaných do vody – intergranulární póry jsou buď zcela uzavřené nebo vzájemně izolované v důsledku plastické deformace jílových hrudek. Struktura s uzavřenými makropóry je z geotechnického pohledu nejpříznivější, neboť hlavní nepříznivé vlastnosti výsypek (kolapsibilní chování, vysoká a nerovnoměrná stlačitelnost) jsou spojené právě s výskytem makropórů.



Obr.3.1 Čtyři různé stavy struktury výsyvky popsané na základě modelování v minicentrifuze (Najser 2010).

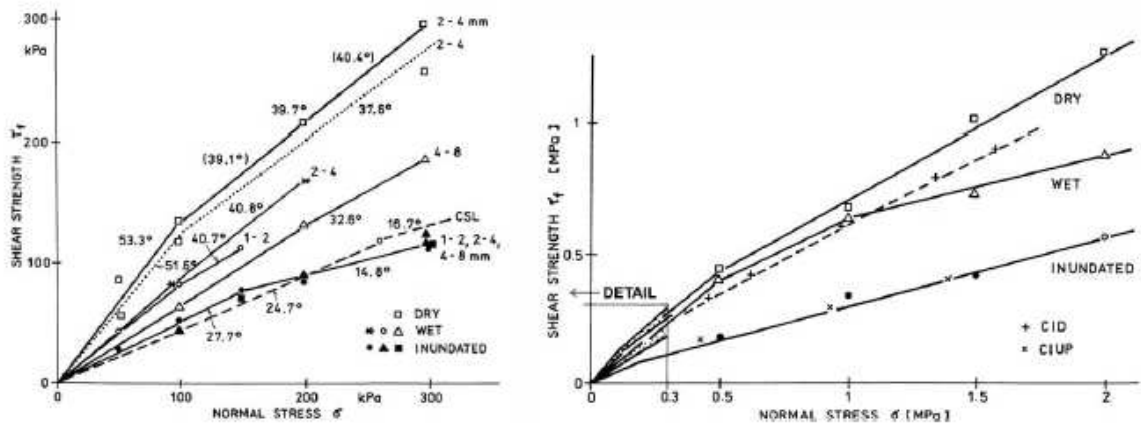
Z geotechnického pohledu nejvhodnější podmínky (minimální intergranulární pórovitost) vznikají kombinací sypání výsyvky „na sucho“ a následného rychlého přirozeného nasycení výsyvky.

3.4 Pevnost výsypek

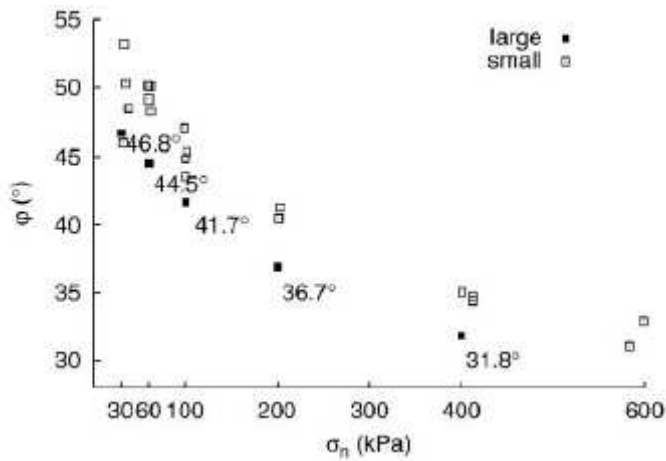
Stanovení smykové pevnosti výsypek je obvykle velmi obtížné. Laboratorní testy jsou komplikované z důvodu problematické přípravy reprezentativních vzorků a interpretace měření in-situ může být komplikovaná z důvodů nehomogenního chování výsypek a zónami se sníženou pevností. Pevnost výsyvky se mění v čase s tím jak je postupně zatěžována a s rozpadem původních hrud jílu vlivem vlhkosti. Pro čerstvou sypaninu, ve které převládá granulární chování, je typická vyšší pevnost. A s tím, jak se čerstvá sypanina mění vlivem procesů popsaných v předchozí kapitole přechází v jílovitou zeminu pevnost klesá. Lze předpokládat, že po rozpadu původní struktury se pevnost bude blížit pevnosti normálně konsolidované zeminy.

Podobný pokles pozorovali Feda (1998) při triaxiálních a krabicových zkouškách na granulovaném jílu (Obr.3.2) a Herbstová a Herle (2009) při zkouškách ve velkém

krabicovém přístroji (300 x 300 mm) na jílu s původní zrnitostí a vlhkostí (Obr.3.3). Vaníček a Vaníček (2008) při parametrických studiích svahů postižených sesuvem zjistili úhel vnitřního tření 13 – 16°, který po porušení klesá přibližně na 7°. Ale smykové zkoušky, které provedl Feda (1998) dávají úhel vnitřního tření vyšší než 20°.



Obr.3.2 Výsledky smykových zkoušek na granulovaném jílu Feda (1998).



Obr.3.3 Výsledky smykových zkoušek na výsypkovém jílu s přirozenou vlhkostí (Herbstová a Herle, 2009).

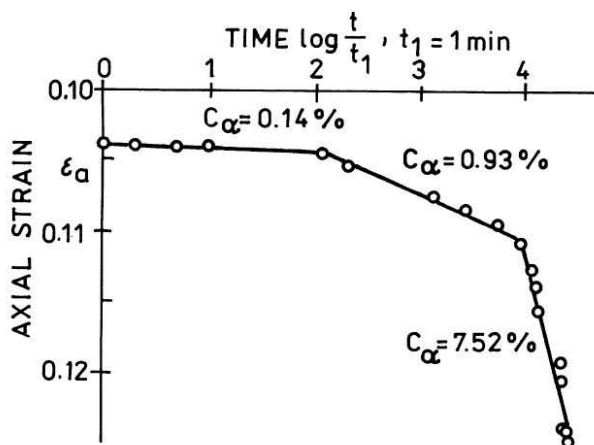
3.5 Deformace výsypek

Primární stlačení výsypek je spojeno s přechodnými mechanismy uvedenými výše. Hlavní část sednutí při kompresi vlastní hmotností je okamžitá a začíná během sypaní. Většina sypaniny je během sypaní nenasyčená, což zvyšuje pevnost hrudek zeminy a snižuje rychlost přechodu od granulárního k soudržnému chování.

Podle Fedy (1983) je teoretická podstata sekundárního stlačení v tom, že se dvojrozměrný obraz mechanického chování zemin, tedy závislost přetvoření na napětí, doplňuje o třetí rozměr, o čas. Sekundární stlačení můžeme charakterizovat indexem sekundárního stlačení C_α :

$$C_\alpha = \frac{-\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}}$$

Sekundární stlačení jílovitých výsypek je široce popsán například v Charles (2008); Charles a Watts (2001). Lineární vztah mezi sekundárním stlačením a logaritmem času byl popsán pro většinu typů výsypek s průměrnými hodnotami $C_\alpha = 0,005-0,01$. Laboratorní experimenty prováděné Fedou (1998) na granulovaného jílu však ukázaly multi-lineární chování (Obr.3.4). Multi-lineární chování bylo vysvětleno různou časovou závislostí strukturních mechanismů (drcení hrud, přeskupení apod.) s kolapsibilní fází ($C_\alpha = 0,0752$), podobně jako u sekundárního stlačení tuhého komunálního odpadu.



Obr.3.4 Sekundární stlačitelnost granulovaného jílu (Feda, 1998).

Jílovité výsypky s vysokou pórovitostí představují typický příklad kolapsibilní zeminy. Kolaps (náhlá změna strukturního uspořádání) je většinou spojen se zvýšením stupněm nasycení S_r (hydrokolaps). Jak uvádí Charles a Watts (2001), většina typů částečně nasycené sypaniny je náchylná ke kolapsu v širokém rozsahu působícího napětí, když je poprvé zaplavena, pokud byla umístěna ve volném a suchém stavu. Ve Velké Británii popisuje Charles a Watts (2001) hydrokolapsy jílovitých výsypek spojené se vzestupem hladiny podzemní vody i s infiltrací povrchových vod.

Stlačitelnosti výsypky se liší v prostoru (nerovnoměrné sedání) a v čase (sezónní vlivy, srážky). Nerovnoměrné sedání je způsobeno lokálními nehomogenitami ve struktuře výsypky. Jedním důvodem může být segregace hrudek během sypání, což vede k rozdílům v intergranulární pórovitosti v horizontálním i vertikálním směru. Další důvodem může být zvýšení obsahu vody ve výsypce, což může být způsobeno lokálními strukturními kolapsy během konsolidace. Změny v obsahu vody mohou být spojeny s vyšší infiltrací vody z atmosférických srážek v depresích kde povrchové vody jsou soustředěny (Vaníček a Vaníček 2008).

4. Laboratorní experimenty

Pevnost výsypkového jílu jsem laboratorně stanovil pomocí trojosých smykových přístrojů a rotačního a translačního krabicového smykového přístroje. Celkem jsem provedl šest trojosých smykových zkoušek na neporušených vzorcích a šest na rekonstituovaných vzorcích, tři zkoušky na rekonstituovaných vzorcích v rotační smykové krabici a jednu zkoušku v translační smykové krabici. Všechny zkoušky jsem provedl na vzorcích z výsypkového materiálu z vnitřní výsyvky lomu Jiří v sokolovské pánvi. Zkušební vzorky jsem připravil a zkoušky provedl v laboratoři mechaniky zemin Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky.

4.1 Charakteristika materiálu

Vzorky pro laboratorní zkoušky byly odebrány v rámci kombinovaného geotechnického průzkumu vnitřní výsyvky lomu Jiří, která byla v roce 2009 postižena rozsáhlým sesuvem. Vzorky byly odebrány ve formě vrtných jader z vrtů OZ 2geo, OZ 2Ageo, ZA 12geo a SVVJ 2geo. Vrty OZ 2geo a OZ 2Ageo jsou situovány na východní okraj sesuvu. Vrt ZA 12geo je situován do oblasti, kde se uvažovaly záhozové přítěžovací lavice. Vrt SVVJ 2geo je situován do oblasti, kde se uvažovalo stabilizační pásmo se šterkopískovými pilotami.

Základní fyzikální a klasifikační vlastnosti zemin byly stanoveny v rámci průzkumu, v laboratoři společnosti PUDIS a.s. Příslušné výsledky rozborů jsou uvedeny v příloze č. 1. Z rozborů zrnitosti je patrné, že svrchní část výsyvky má relativně hrubozrnnější složení (s vyšším zastoupením ještě nerozložených střípků a úlomků jílovců) a je převážně klasifikována jako hlína šterkovitá MG nebo hlína písčitá MS. Spodní část výsyvky má naopak jemnozrnné složení a je klasifikována jako jíl s vysokou plasticitou CH až jíl velmi vysokou plasticitou CV. Indexové vlastnosti odpovídají hodnotám hornin cyprisového souvrství uvedených v Tab. 3.1, které v tělese výsyvky dominují.

4.2 Příprava vzorků

Pro zkoušky na neporušených vzorcích byly připraveny válcové zkušební vzorky o průměru přibližně 38 mm a výšce 76 mm z vrtu SVVJ 2geo z hloubek 25,5 – 26,0 m a 36,0 – 36,5 m. Zkušební vzorky byly připraveny standardním způsobem ořezáním nožem z blízkosti osy odebraných neporušených vzorků

Pro zkoušky na rekonstituovaných vzorcích byla použita rekonstituovaná pasta připravená z neporušených vzorků z vrtu OZ 2geo z hloubky 13,0 – 14,0 m. Při přípravě rekonstituované pasty byl nastrouhaný materiál rozmíchán s destilovanou vodou. Materiál byl pečlivě rozmíchán v hnětacím přístroji do podoby pasty s vlhkostí odpovídající přibližně 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti, tak aby výsledná pasta byla zcela homogenní. Následně se pasta protlačila přes síto s otvory 1 mm. Rekonstituované vzorky pro trojosé zkoušky byly připraveny tak, že se vzniklá pasta nalila do kovových válců o průměru 38 mm tak, aby se uvnitř nevytvářely vzduchové kapsy. Následně se zatížila vertikálním napětím o velikosti přibližně 70 kPa. Po ukončení konsolidace se vzorek vytlačil a ořízl na požadovanou výšku. Pro standardní zkoušky na výšku odpovídající přibližně dvojnásobku průměru vzorku a pro zkoušky s kluznými postavami na výšku odpovídající přibližně průměru vzorku.

V případě zkoušek v krabicových přístrojích byla rekonstituovaná pasta umístěna přímo do vzorkového prostoru krabicového přístroje.

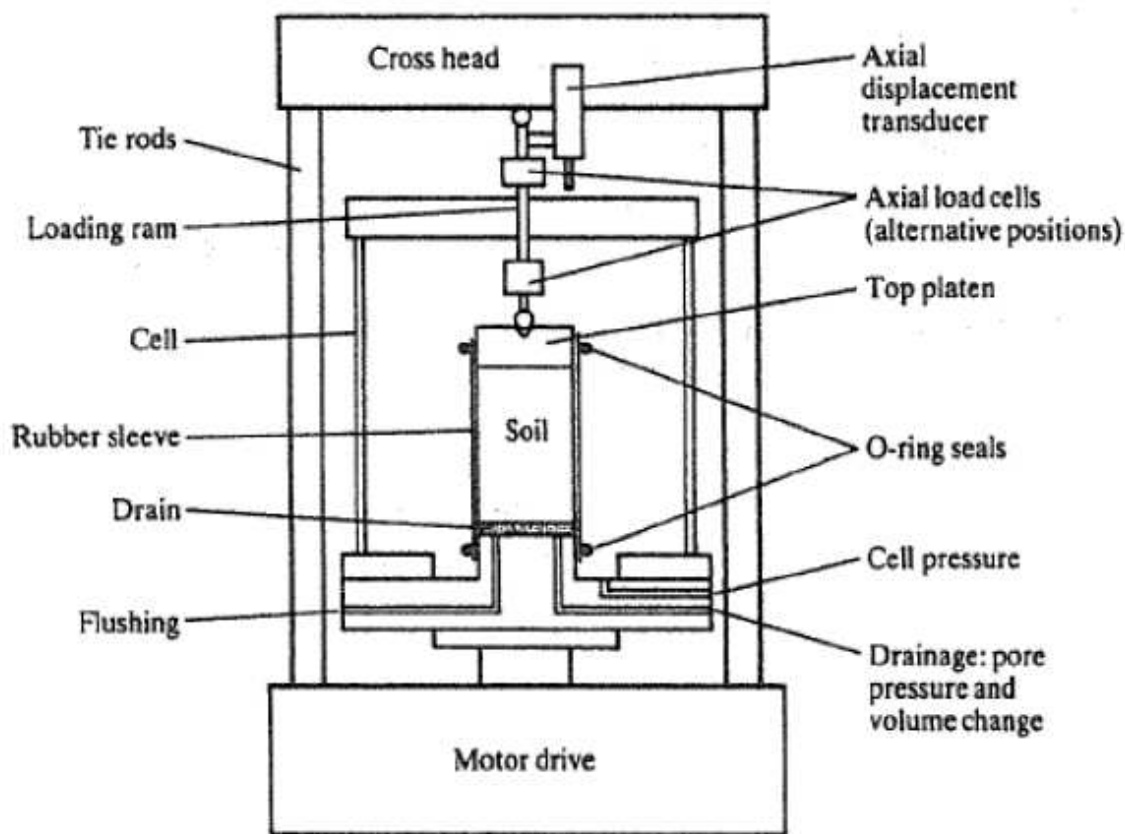
Vlhkost pasty pro přípravu vzorků pro trojosé zkoušky byla přibližně 1,5 násobek vlhkosti na mezi tekutosti, jak doporučuje Burland (1990) pro přípravu rekonstituovaných vzorků. Vlhkost pasty pro zkoušky v krabicových smykových přístrojích byla menší než v případě triaxiálních vzorků. A to z důvodu, že menší vlhkost umožňovala snížit ztrátu objemu vzorku během konsolidační fáze.

4.3 Trojosé smykové zkoušky

Celkem jsem provedl šest trojosých zkoušek na rekonstituovaných vzorcích a šest trojosých zkoušek na neporušených vzorcích typu CIUP (izotropně konsolidované nedrénované zkoušky s měřením pórového tlaku). Zkoušky na neporušených vzorcích probíhaly se standardním uspořádáním a ze šesti zkoušek na rekonstituovaných vzorcích byly tři zkoušky se standardním uspořádáním a tři zkoušky s kluznými podstavami, jak je popisuje například Sosna (2003).

4.3.1 Popis přístroje

Všechny zkoušky byly provedeny v konvenčních trojosých přístrojích, obecné schéma trojosého přístroje je na Obr.4.1. Vertikální pohyb komory byl zajištěn lisem s nastavitelnou rychlostí deformace. Komora se pohybovala proti pístu, který byl zapřen o rám trojosého přístroje. Komory byly vybaveny vnitřním ponorným snímačem deviátorové síly. Pro zkoušky byly použity snímače od firmy Wykeham Farrance s maximálním povoleným zatížením 5 a 10 kN a s přesností $\pm 8,82$ N. Jak uvádí Head (1998), snímače deviátorové síly umístěné uvnitř komory mají oproti vnějším dynamometrům dvě hlavní výhody. Síla se snímá uvnitř přímo nad vzorkem, není proto zatížena chybou způsobenou třením pístu, jak je tomu u vnějších dynamometrů. Další výhodou je, že snímač je naplněn olejem, který přenáší prostřednictvím membrány komorový tlak. Měření síly jím není ovlivněno a nemusí se zavádět korekce na jeho změnu. Komorové a sytící tlaky byly vyvozovány pomocí kontrolerů GDS. Tyto kontrolery sloužily rovněž k záznamu objemových změn uvnitř vzorku. Rozlišitelnost těchto kontrolerů je ± 1 kPa a ± 1 mm³. Snímač pórového tlaku pro neodvodněný smyk byl umístěn vně komory bezprostředně za kohoutem drenážního vedení. Osová deformace byla zaznamenávána externě pomocí digitálního úchylkoměru s rozlišitelností $\pm 0,001$ mm. Všechna měřící zařízení byla propojena s počítačem, který umožňoval pravidelný záznam dat v libovolném intervalu.



Obr.4.1 Obecné schéma triaxiálního přístroje (Atkinson, 1993).

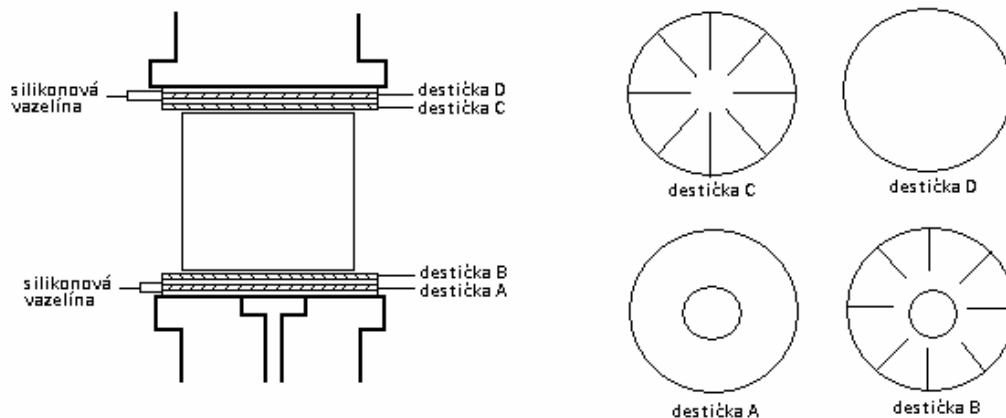
4.3.2 Kluzné podstavy

Sosna (2003) uvádí, že pokud je cílem trojosé zkoušky získat konstituční vztah zkoumané zeminy je třeba zajistit, aby pole napětí a deformací vzorku bylo homogenní. Napětí a deformace jsou homogenní, neexistují-li v tělese gradienty těchto veličin.

Při standardním uspořádání trojosé zkoušky jsou podstavy vzorku v kontaktu s drsnými drenážními destičkami. Na tomto rozhraní dochází ke tření, a to způsobuje, že pole napětí a deformace je nehomogenní. Vznikají zde smykové složky napětí a z toho důvodu není svislé napětí hlavním napětím, což je v rozporu s předpoklady vyhodnocení trojosé zkoušky. Vlivem tření na podstavách dochází k omezení radiální deformace vzorku a ten nabírá tvar soudku.

Boháč (1991) uvádí, že nejvhodnější metodou, která zajišťuje alespoň jistou homogenitu napětí a deformace, je opatřit podstavy jednou nebo více kluznými vrstvami připravenými z běžné gumové membrány a vrstvami vhodného maziva.

Pro stanovení kritické pevnosti výsypkového jílu bylo zvoleno následující uspořádání: na spodní a horní hliníkovou podstavu byla nanášena vrstva silikonové vazelíny, poté byla na podstavu umístěna destička z gumové membrány. Na destičku z gumové membrány byla nanášena další vrstva silikonové vazelíny, na kterou byla umístěna druhá destička z gumové membrány, která byla radiálně dělena na osm segmentů. Vzhledem k tomu, že vzorek je drénován porézní destičkou umístěnou uprostřed spodní hliníkové podstavu je uprostřed spodních destiček vystřihnout otvor, který umožňuje pohyb vody. Schéma kluzných destiček je na Obr.4.2.



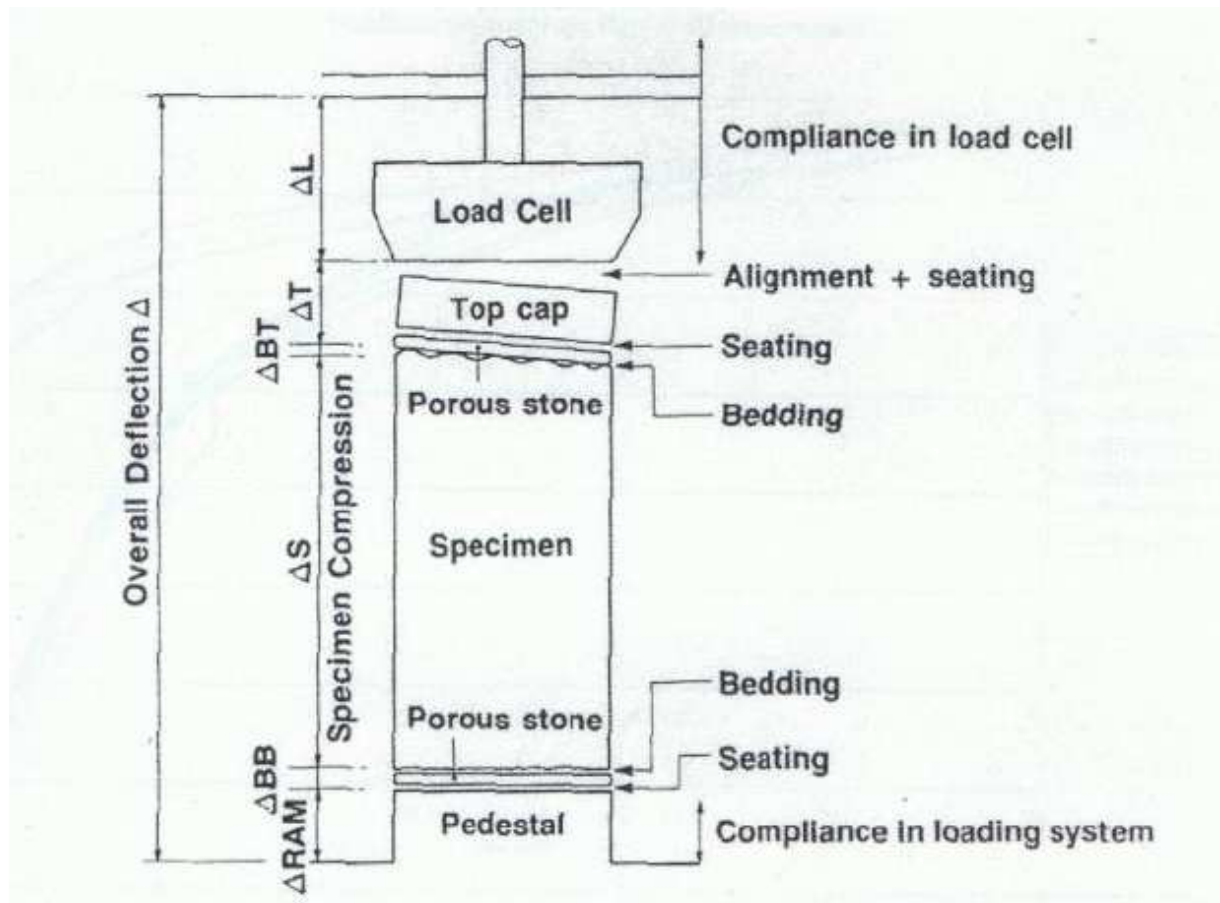
Obr.4.2 Schéma uspořádání zkoušek s kluznými podstavami.

4.3.3 Zdroje chyb

Největším množstvím chyb je zatíženo měření osově deformace, z důvodu umístění měřidla osově deformace vně triaxiální komory. Některé jsou neodstranitelné, jiné lze částečně eliminovat pečlivou přípravou vzorku a jeho osazením. Typické chyby podle Baldi et al (1988) zahrnují:

1. Dosednutí – tato chyba je způsobena uzavíráním mezer mezi snímačem deviátorové síly a podstavou a mezi podstavou a porézní destičkou.

2. Nesouosost – tato chyba je spojena s vybavením komory a klonu vzorku. Příčinou může být zatěžovací píst, který není zcela souosý s komorou, a jeho excentricitou. Dále šikmostí povrchu podstav vzorku.
3. Ložný efekt – ložný efekt je způsoben nedostatečným dosednutím nebo nepravidelností povrchu na rozhraní mezi podstavou vzorku a porézními destičkami nebo podstavami.
4. Poddajnost – tato chyba zahrnuje deformaci komory při rostoucím tlaku, prohýbání snímače síly s rostoucím zatížením, pohyby komory na mechanických spojích a deformace kluzných destiček.



Obr.4.3 Zdroje chyb při vnějším měření osové deformace podle Baldi et al. (1988).

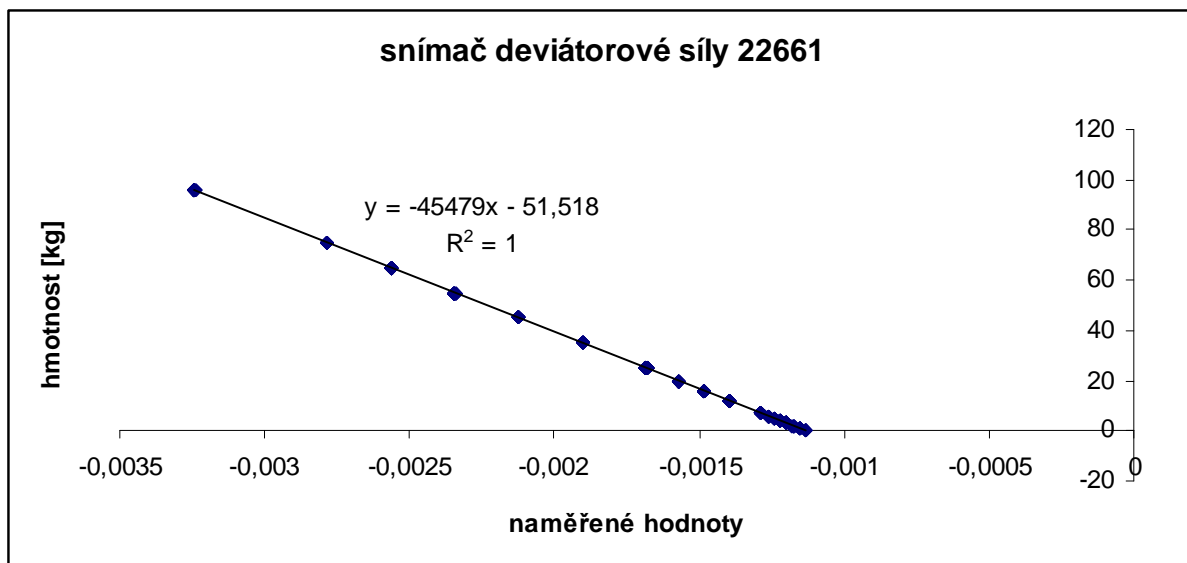
Další skupina chyb je spojena s vlastnostmi elektronických měřicích zařízení a přenosem elektronického signálu. Přesnost každého měřidla je omezena rozlišovací schopností a přesností čtení. Rozlišovací schopnost je chápán jako nejmenší změna měřené veličiny,

kteřou je měřidlo schopno zaznamenat. Všechna použitá měřidla měla takovou rozlišovací schopnost, že nemohla žádným způsobem ovlivnit naměřené hodnoty. Přesnost čtení je míra shody naměřené hodnoty s její okamžitou skutečnou hodnotou. Přesnost čtení je ovlivňována nelinearitou, šumem a driftem. Nelinearita je dána jako maximální odchylka hodnot naměřených při kalibraci od regresní přímky. Šum je zkreslení výstupního signálu náhodnými jevy. Drift je postupná změna čtení při konstantních podmínkách a byl nejproblematictějším vlivem v průběhu zkoušek. Pro eliminaci těchto vlivů byl na začátku a na konci každé zkoušky nakalibrován snímač deviátorové síly a snímač pórového tlaku.

4.3.4 Kalibrace měřidel

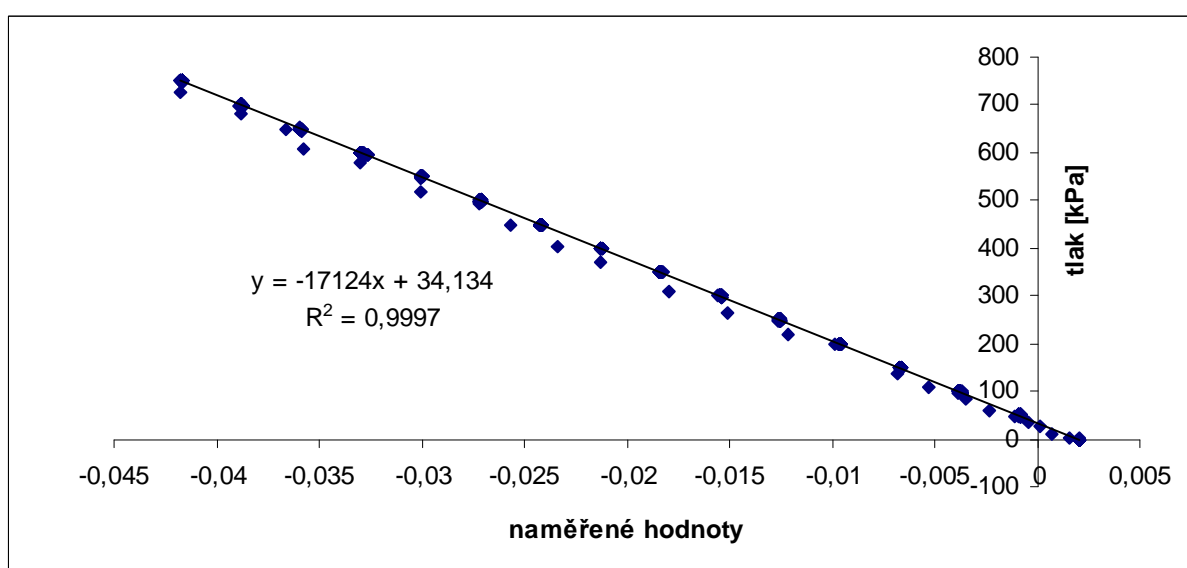
V případě trojosých zkoušek bylo nutné provést kalibrace snímače deviátorové síly (označovaného loadcell) a snímače pórových tlaků. Měřicí zařízení u každého přístroje byla kalibrována před a po každé zkoušce.

Snímač deviátorové síly „loadcell“ je elektronický snímač, jehož nepřesnost vychází z oscilace při přenosu elektrického signálu. Tyto nepřesnosti jsou při správně provedené kalibraci menší než při použití vnějších dynamometrů. Kalibrace snímače probíhala tak, že snímač byl vyjmut z triaxiální komory a umístěn do držáku pro „loadcell“, který umožnil jeho zatěžování závaží. Následně byl snímač připojen k počítači a poté postupně zatěžován. Zatížení bylo vyvozováno pomocí závaží, které bylo pokládáno na destičku připevněnou na snímač. Pro jednotlivé zatěžovací kroky byly hodnoty zaznamenávány v počítači. Naměřené hodnoty pro jednotlivé zatěžovací kroky byly následně vyneseny do grafu (viz Obr.4.4). Získaná lineární závislost byla popsána rovnicí přímky a její výstižnost vyjádřena pomocí hodnoty spolehlivosti R. Hodnota spolehlivosti pro všechny kalibrace byla rovna jedné nebo se jí velmi blížila.



Obr.4.4 Ukázka kalibrační křivky snímače deviátorové síly.

Snímač pórového tlaku byl kalibrován pomocí GDS kontrolerům, a to vždy vůči tomu kontroleru, kterým byl vyvozován komorový tlak během zkoušky. Kalibrace probíhala tak, že se kontroler připojil na vstup dolní drenáže do podstavy triaxiální komory. Následně se uzavřel kohout za snímačem pórového tlaku a pomocí GDS kontroleru byl ve snímači pórového tlaku postupně zvyšován tlak. Pro každý krok se zaznamenávaly hodnoty elektrického napětí ze snímače. Naměřená data byla vynesena do grafu (Obr.4.5) a získaná lineární závislost popsána pomocí rovnice přímky a její výstižnost vyjádřena pomocí hodnota spolehlivosti R.



Obr.4.5 Ukázka kalibrační snímače pórového tlaku

4.3.5 Průběh zkoušek

Zkušební vzorky pro triaxiální zkoušky byly připraveny tak, jak je popsáno v kapitole 4.2. a zkoušky se uskutečnily na přístroji popsaném v části 4.3.1. Před osazením do komory byl každý vzorek změřen a zvážen.

Při standardních zkouškách byl vzorek umístěn na porézní destičku, na které byl filtrační papír, který zamezoval zanesení drenáže jemnou frakcí. V případě zkoušek s kluznými podstavami byl vzorek umístěn na postavu opatřenou kluznými destičkami. Vzorky pro standardní zkoušky byly opatřeny bočními drény z filtračního papíru pro urychlení konsolidační fáze. Následně byla na vzorek položena horní podstava a vzorek byl přetažen gumovou membránou. Těsnost vzorku vůči komorové vodě byla zajištěna pomocí O kroužků umístěných na podstavách.

Po osazení vzorku byla komora naplněna pitnou vodou. Průběh fáze sycení vzorku byl kontrolován pomocí GDS kontrolerů. Sycení probíhalo tak, že se nejdříve zvýšil komorový tlak na 10 kPa. Poté se souběžně zvyšoval komorový tlak z 10 na 310 kPa a sytící tlak z 0 na 300 kPa při standardních zkouškách a v případě zkoušek s kluznými podstavami na 500 kPa respektive na 510 kPa. Kontrola nasycení byla prováděna pomocí Skemptonova součinitele „B“ (Skempton 1954) definovaného jako $\Delta u / \Delta \sigma$, kde Δu značí přírůstek pórového tlaku a $\Delta \sigma$ přírůstek všesměrného napětí. Ověření probíhalo tak, že byla uzavřena dolní drenáž a komorový tlak byl zvýšen o $\Delta \sigma = 100$ kPa. Po ustálení byl snímačem pórových tlak odečten přírůstek Δu . Po dosažení hodnoty parametru $B = 0,95$, při níž je vzorek považován za nasycený, byla sytící fáze ukončena. Vzhledem k nízkému koeficientu filtrace zkoušeného materiálu nedocházelo v průběhu manipulace se vzorkem ke ztrátě vlhkosti a parametr $B > 0,95$ byl dosažen u všech zkoušených vzorků.

Po nasycení byl vzorek zkonsolidován na zvolenou hodnotu efektivního radiálního napětí. Hodnoty radiálního napětí se pohybovaly v rozmezí od 100 do 300 kPa. Konsolidace pobíhala jednorázovým zvýšením komorového tlaku za nemněného sytícího tlaku a byl zaznamenáván objem vytlačené vody. Konsolidační fáze byla považována za skončenou při ustálení objemových přetvoření vzorku. Tato fáze obvykle trvala jeden až dva týdny.

Z výsledné konsolidační křivky byla podle ČSN CEN ISO/TS 17892-9 (2005) vypočtena maximální přípustná rychlost smyku podle vzorce:

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

kde v_{\max} je maximální rychlost smyku, H_i je počáteční výška vzorku, ΔH_c je výška vzorku po konsolidaci, 0,15 předpokládané axiální přetvoření při dosžení kritického stavu, 2,1 je konstanta vycházející z počtu drenáží vzorku a t_{50} je čas 50% konsolidace.

Výška vzorku po konsolidaci byla vypočítána pomocí vzorce:

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

kde V_i je objem vzorku před konsolidací, ΔV_c je změna objemu vzorku během konsolidace.

Pro standardní zkoušky byla zvolena rychlost smyku 0,002 mm/min a pro zkoušky s kluznými podstavami 0,001 mm/min. Všechny prováděné zkoušky probíhaly za neodvodněných podmínek a s měřením pórového tlaku. Délka smyku byla volena individuálně a zkouška byla ukončena po dosažení maximálního možného axiálního přetvoření, což bylo zpravidla 20 – 30 % pro standardní zkoušky a 40 – 50 % pro zkoušky s kluznými podstavami. Po ukončení zkoušky byl vzorek zvážen v nasyceném stavu a po vysušení při 110°C, aby mohla být určena vlhkost.

4.3.6 Vyhodnocení zkoušek

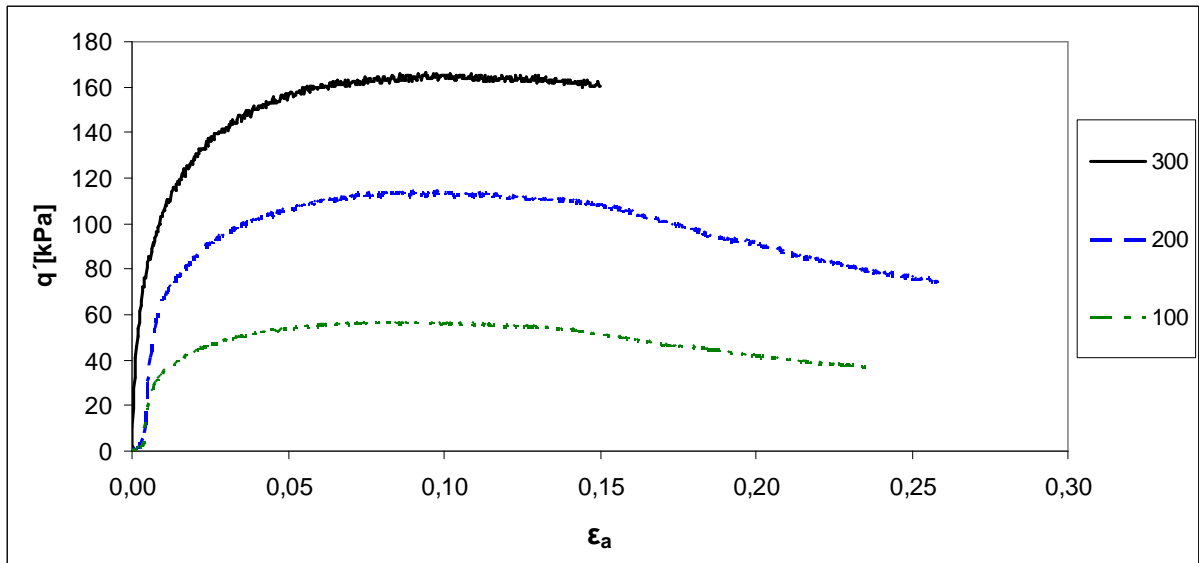
V průběhu každé zkoušky byly v pravidelném intervalu zaznamenávány data do počítače. Zaznamenávány byly hodnoty komorového tlaku [kPa], změny objemu vody v komoře [mm³], sytícího tlaku [kPa], změny objemu vody ve vzorku během konsolidace [mm³], změna výšky vzorku pomocí digitálního úchylkoměru [mm], hodnoty ze snímače deviátorové síly [mV] a snímače pórových tlaků [mV]. Pro výpočet deviátorové síly a pórového tlaku byly použity kalibrační křivky popsané v kapitole 4.3.4.

Dosažení kritického a vrcholového stavu bylo určeno z grafu závislosti deviátorového napětí $q' = \sigma'_a - \sigma'_r$ na axiálním přetvoření $\varepsilon_a = \Delta h_i/h_0$. Zkoušky byly vyhodnoceny a vyneseny do grafu závislosti poloviny deviátorového napětí $t' = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ na napětí $s' = (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$. Pro vyhodnocení pevnosti u provedených zkoušek byl použit vztah:

$$\sin \varphi' = \frac{t'}{s'}$$

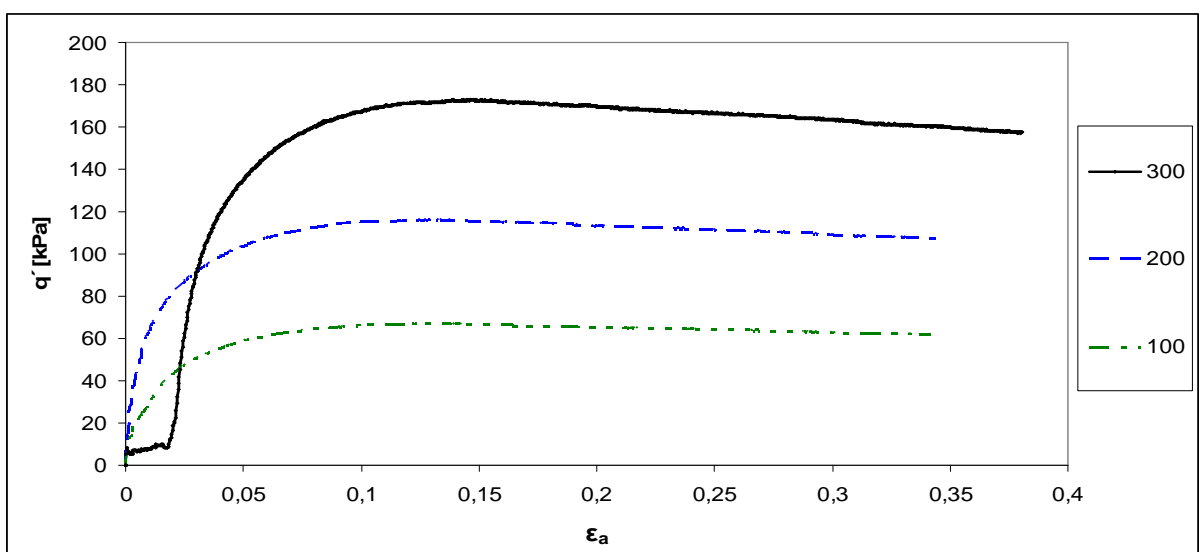
4.3.6.1 Výsledky zkoušek na rekonstituovaných vzorcích

Vzorky při zkouškách se standardním uspořádáním i s kluznými podstavami byly izotropně konsolidovány za efektivních napětí 100, 200 a 300 kPa a následně byly vystaveny nedrénovanému smykání za konstantní rychlosti. Smykání probíhalo do velkých axiálních přetvoření. Dosažení kritického stavu bylo uvažováno při takové hodnotě osového přetvoření, kdy došlo k ustálení deviátorového napětí. Grafy závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření jsou zobrazeny na Obr.4.8 a 4.9. Pro dosažení kritického stavu je důležité, aby během zkoušky nedošlo k vytvoření smykové plochy ještě před tím, než by průběh experimentu dosáhl samotného kritického stavu. Vzniklá smyková plocha výrazně mění rozložení a působení napětí ve vzorku. Pokud by vznikla smyková plocha před dosažením kritického stavu, byly by ovlivněny celkové výsledky probíhající zkoušky a tím i stanovená hodnota pevnosti. O vzniku smykových ploch napovídá graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření. Grafy závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření jsou zobrazeny na Obr.4.6 a 4.7.



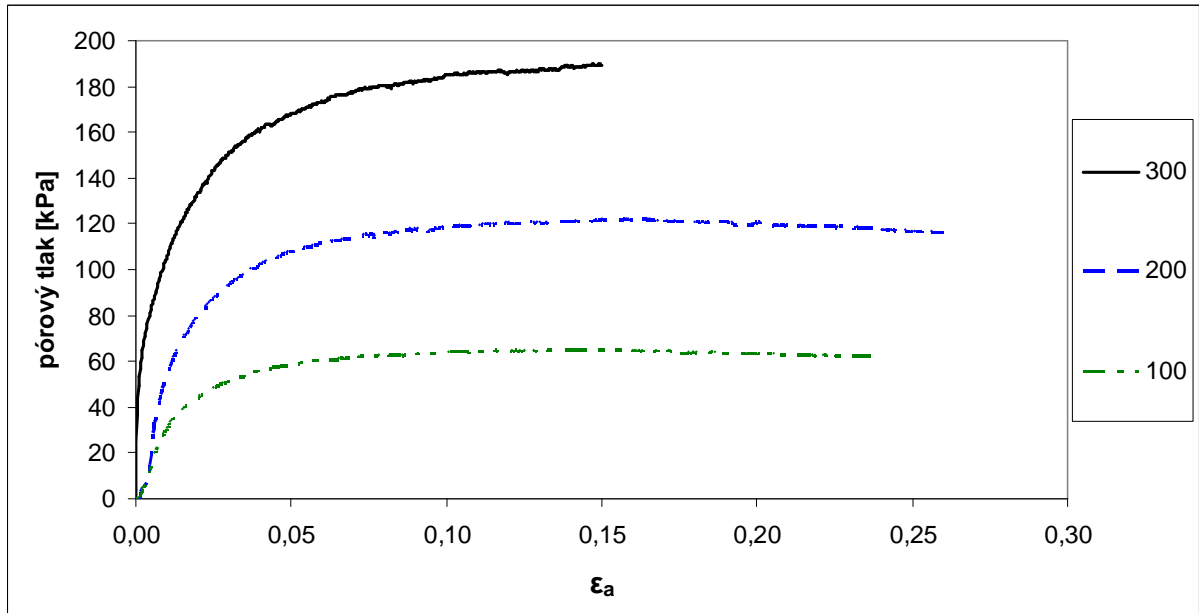
Obr.4.6 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky se standardním uspořádáním.

Graf s průběh deviátorového napětí při zkouškách se standardním uspořádáním ukazuje, že po počátečním nárůstu a ustálení deviátorového napětí došlo k poklesu deviátorového napětí při osovém přetvoření přibližně 15 %. Což lze vysvětlit vznikem smykové plochy. Změna v průběhu deviátorového napětí je ztelnější u zkoušek konsolidovaných za vyššího efektivního napětí. Zkouška při počátečním efektivním komorovém napětí 300 kPa (v grafu označená „300“) byla z technických důvodů ukončena při menší hodnotě osového přetvoření a pokles deviátorového napětí při této zkoušce nebyl zaznamenán.



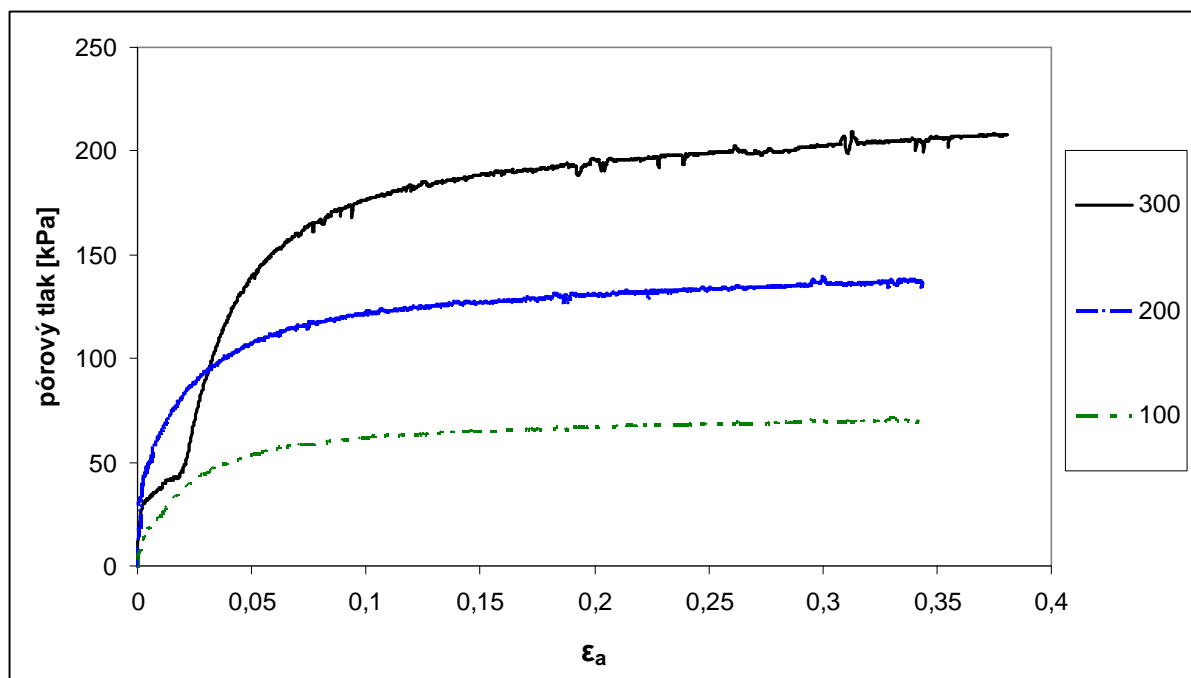
Obr.4.7 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky s kluznými podstavami.

Z průběh deviátorového napětí při zkouškách s kluznými podstavami je patrné, že nedochází k významnému poklesu deviátorového napětí při dosažení vyšších přetvoření. Což naznačuje, že nedocházelo ke vzniku smykových ploch ve vzorcích. Relativní ustálení nebo mírný pokles hodnot deviátorového napětí napovídá, že jednotlivé vzorky dosáhly stavu ideálního zplastizování, který by odpovídal kritickému stavu.



Obr.4.8 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky se standardním uspořádáním.

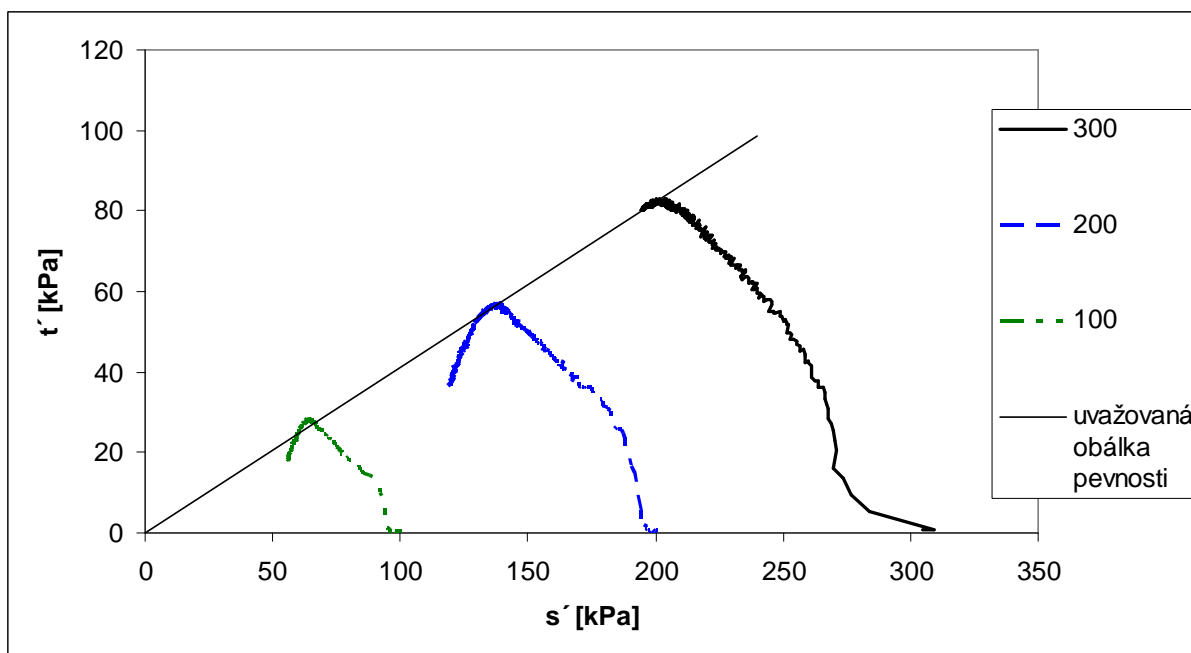
Z grafu závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky se standardním uspořádáním (viz Obr.4.8) je patrné, že k ustálení pórových tlaků došlo po dosažení osového přetvoření přibližně 10 %. Což by odpovídalo podmínce dosažení kritického stavu při nedrénované triaxiální zkoušce.



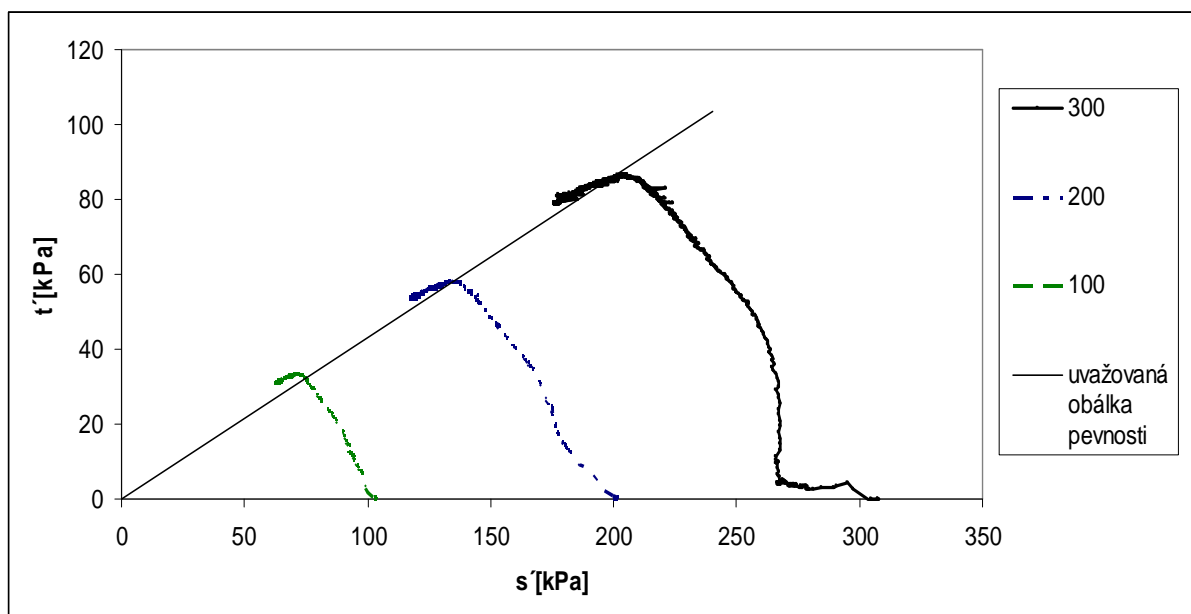
Obr.4.9 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky s kluznými podstavami.

Z grafu závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky s kluznými podstavami je patrné, že oproti zkouškám se standardním uspořádání nedošlo k relativnímu ustálení na konstantní hodnotě, ale po dosažení osového přetvoření přibližně 10% k ustálení na nárůstu pórových tlaků při konstantním gradientu. Konstantní gradient nárůstu pórových tlaků naznačuje, že během zkoušek nedocházelo ve vzorcích ke vzniku smykových ploch, což je v souladu s grafem závislosti změny deviátorového napětí na osovém přetvoření. Pokud bychom vycházeli z podmínky ustálení pórových tlaků na konstantní hodnotě pro dosažení kritického stavu, pak by kritický stav u zkoušek s kluznými podstavami nebyl dosažen.

Z grafů průběhu deviátorového napětí a pórových tlaků v závislosti na osovém přetvoření lze tedy předpokládat, že u všech zkoušek bylo dosaženo kritického stavu a data získaná z těchto zkoušek lze použít pro stanovení kritické pevnosti. Kritická pevnost byla určena obálkou procházející počátkem. Uvažované obálky pevnosti jsou vykresleny společně s dráhami napětí na Obr.4.10 a 4.11.



Obr.4.10 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí t' na napětí s' v průběhu zkoušek se standardním uspořádáním.



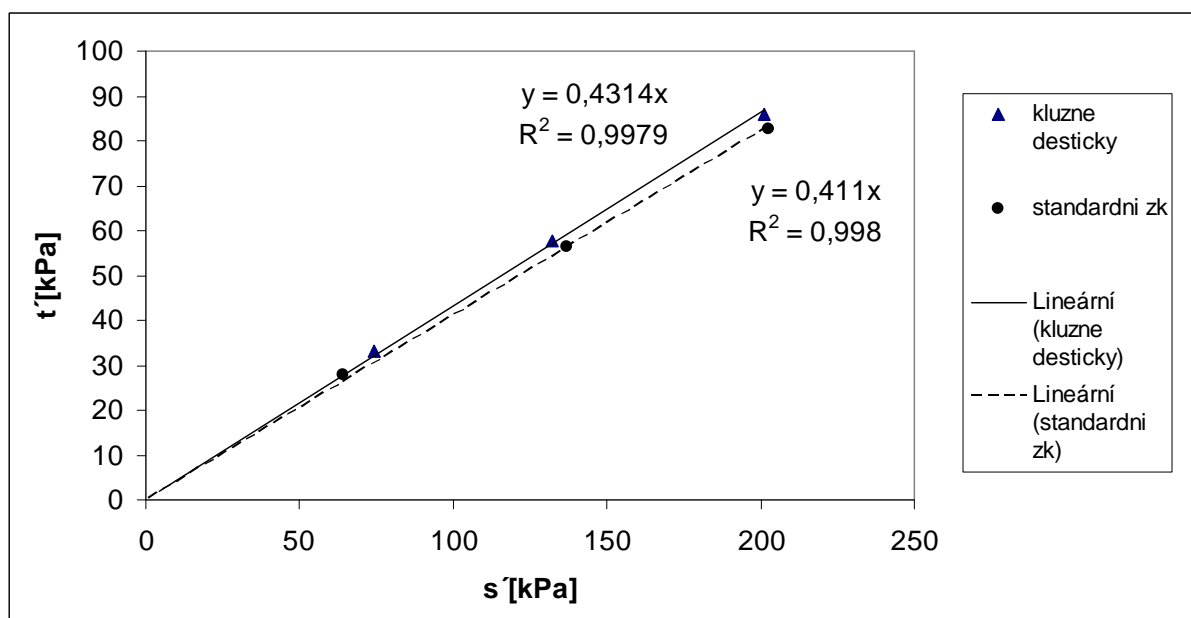
Obr.4.11 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí t' na napětí s' v průběhu zkoušek s kluznými podstavami.

Výsledné hodnoty kritické pevnosti jsou shrnuty v Tab.4.1, kde σ'_r je počáteční efektivní napětí, s'_{cr} je uvažovaná hodnota napětí v kritickém stavu, t'_{cr} je uvažovaná hodnota poloviny deviátorového napětí v kritickém stavu a ϕ_{cr} je úhel vnitřního tření v kritickém stavu. Obálky

kritické pevnosti pro zkoušky se standardním uspořádáním a s kluznými podstavami jsou zobrazeny na Obr.4.12.

| typ zkoušky | σ'_{cr} [kPa] | s'_{cr} [kPa] | t'_{cr} [kPa] | ϕ_{cr} [°] |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| zkoušky s kluznými podstavami | 100 | 72,84 | 33,16 | 25,6 |
| | 200 | 132,04 | 57,74 | |
| | 300 | 201,17 | 85,84 | |
| standardní zkoušky | 100 | 64,13 | 27,97 | 24,3 |
| | 200 | 136,81 | 56,36 | |
| | 300 | 202,42 | 82,61 | |

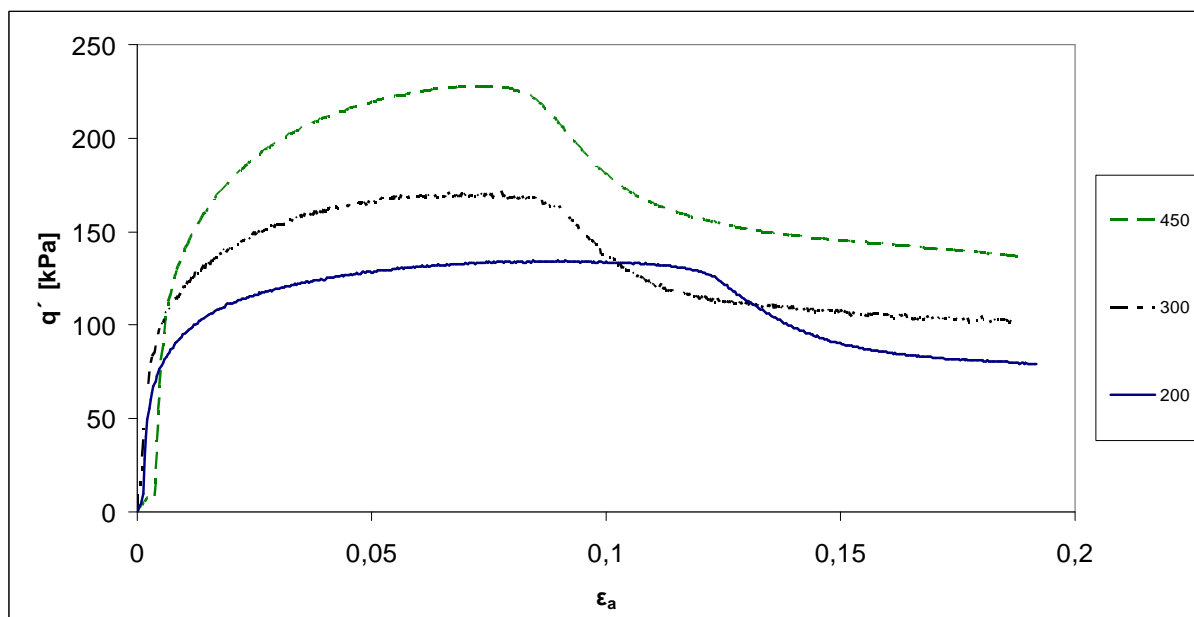
Tab.4.1 Přehled výsledků zkoušek na rekonstituovaných vzorcích.



Obr.4.12 Obálky kritické pevnosti pro zkoušky na rekonstitovaných vzorcích.

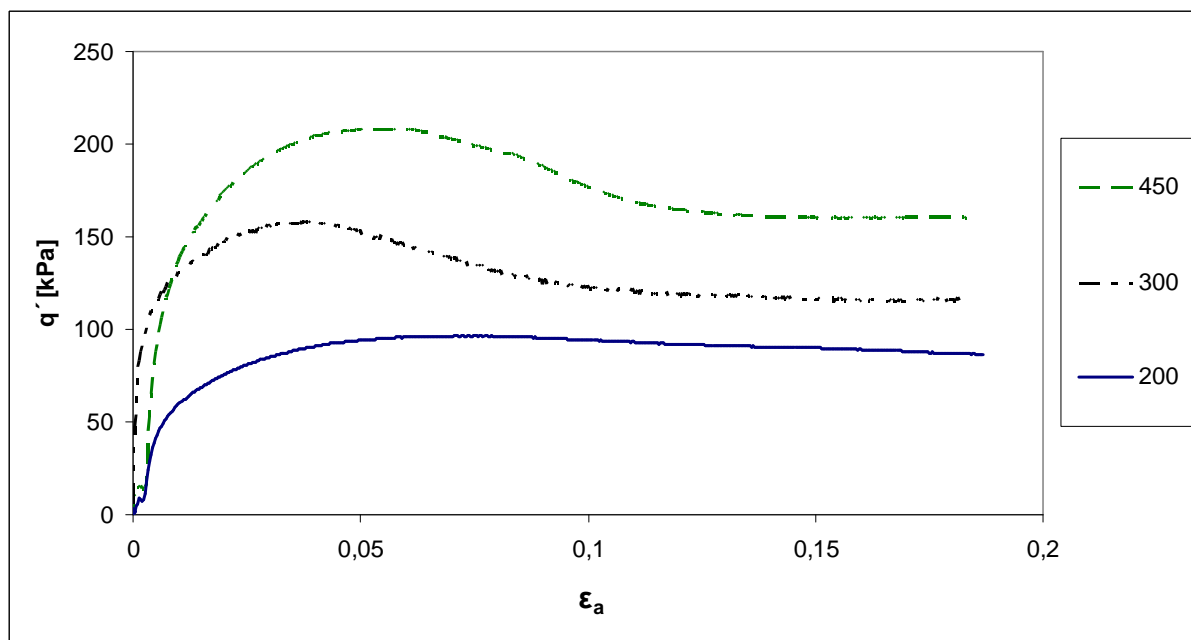
4.3.6.2 Výsledky zkoušek na neporušených vzorcích

Zkoušky na neporušených vzorcích z vrtu SVVJ 2geo byly prováděny na základě objednávky firmy PÚDIS a.s. a jejich cílem bylo stanovit vrcholovou pevnost, nikoli pevnost kritickou. Neporušené vzorky byly izotropně konsolidovány za efektivních napětí 200, 300 a 450 kPa a následně byly vystaveny nedrénovanému smykání za konstantní rychlosti. Smykání probíhalo do velkých axiálních přetvoření. Dosažení vrcholového stavu bylo odečteno z grafů závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření, tyto grafy jsou zobrazeny na Obr.4.13 a 4.14.



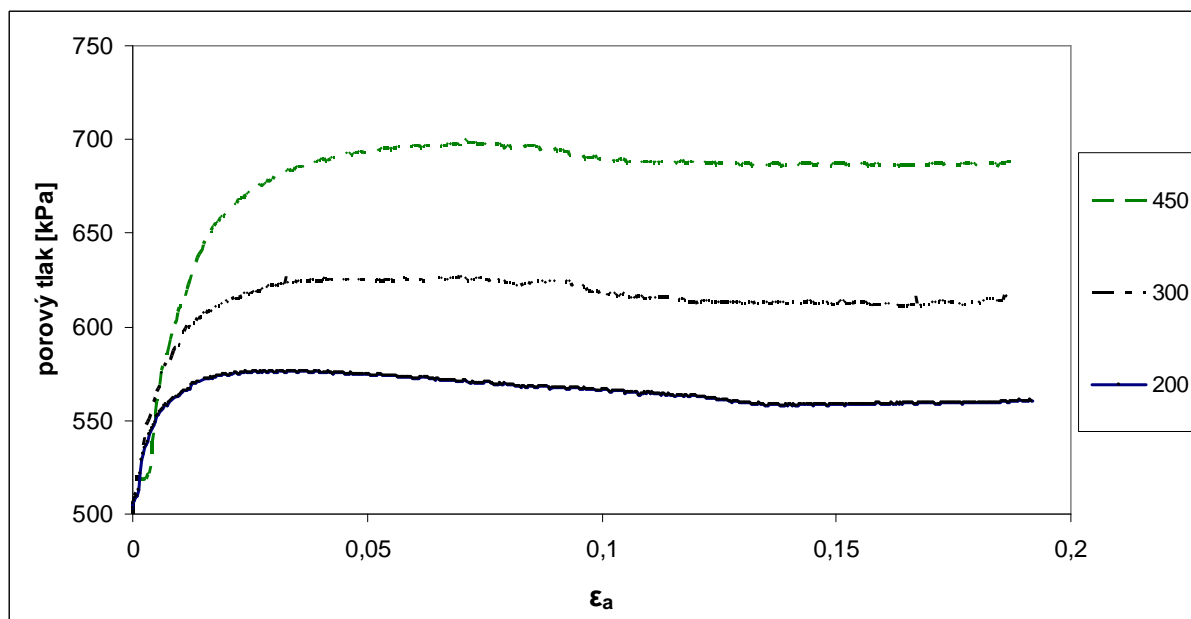
Obr.4.13 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m.

Z grafu (Obr.4.13) závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m je patrné, že po počátečním nárůstu a relativním ustálení deviátorového napětí došlo k výraznému poklesu deviátorového napětí při osovém přetvoření přibližně 12% u zkoušky konsolidované při efektivním napětí 200 kPa a 8% u zkoušek konsolidovaných při efektivním napětí 300 a 450 kPa. Což je pravděpodobně způsobeno vznikem smykové plochy. Smykové plochy byly pozorovány na všech vzorcích po ukončení zkoušek.



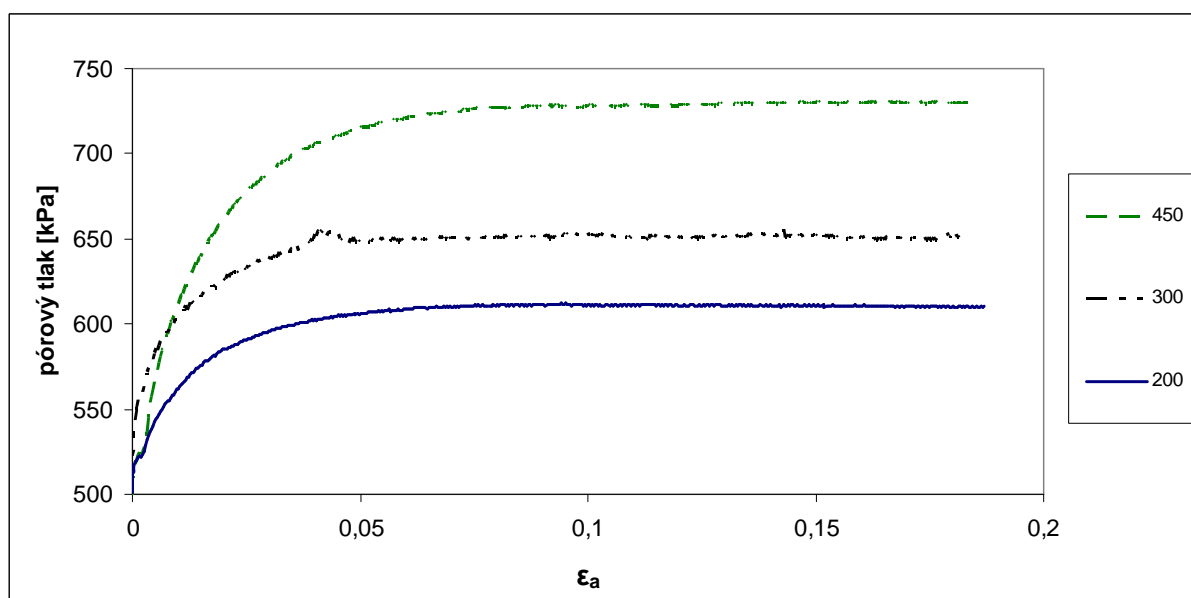
Obr.4.14 Graf závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36 – 36,5 m.

Z grafu (Obr.4.14) závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m je patrné, že průběh deviátorového napětí při zkoušce konsolidované při efektivním napětí 200 kPa je odlišný od zkoušek konsolidovaných při efektivním napětí 300 a 450 kPa. V případě zkoušky konsolidované při efektivním napětí 200 kPa nedošlo k významnému poklesu deviátorového napětí po dosažení maxima, jako v případě zkoušek konsolidovaných při efektivním napětí 300 a 450 kPa. Stejně jako v předchozím případě byly u všech zkoušek znatelné smykové plochy po ukončení zkoušek.



Obr.4.15 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m.

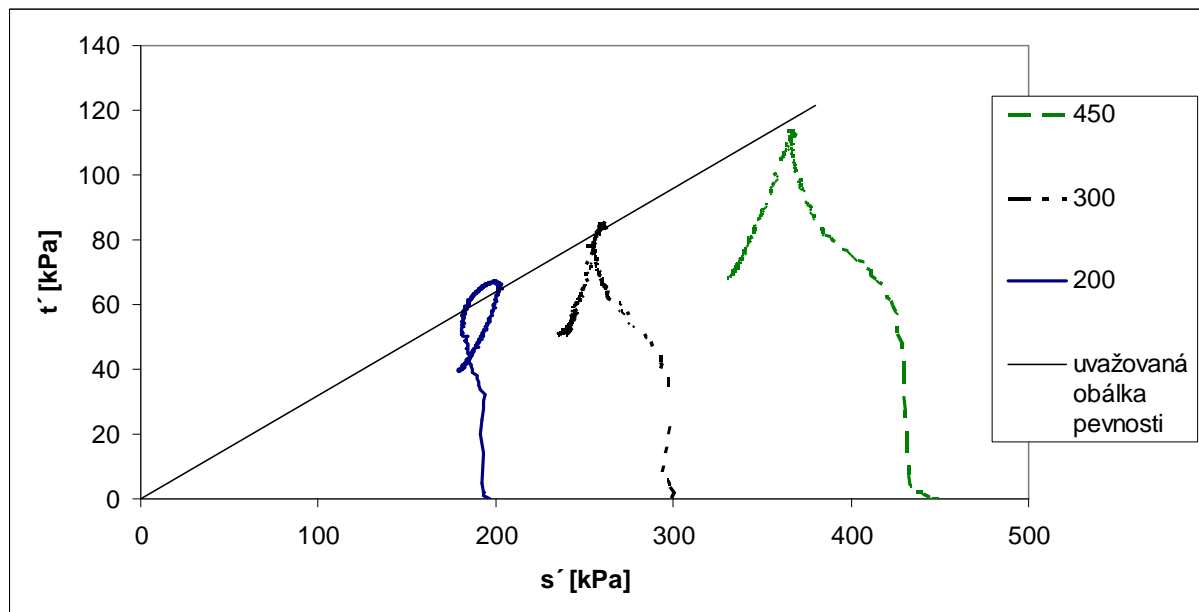
Z grafu (Obr.4.15) závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m je patrné, že u všech zkoušek po dosažení osové deformace 10 – 15 % nedocházelo k výrazným změnám pórového tlaku.



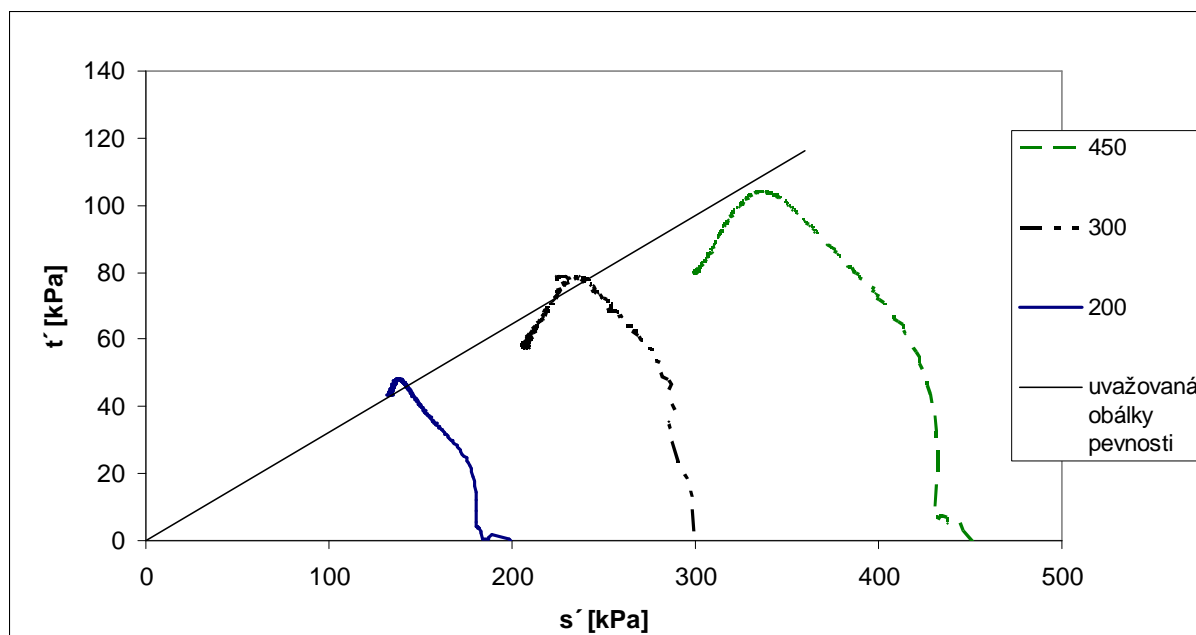
Obr.4.16 Graf závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m.

Z grafu (Obr. 4.16) závislosti pórového tlaku na osovém přetvoření pro zkoušky na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m je patrné, že u všech zkoušek po dosažení osově deformace 5 – 10 % nedocházelo k výrazným změnám pórového tlaku. V případě zkoušky konsolidované při efektivním napětí 200 kPa lze z průběhu deviátorového napětí a pórových tlaků předpokládat, že došlo k dosažení kritického stavu, který je roven vrcholovému stavu. Což by odpovídalo předpokladu, že chování výsyvky po rozpadu původní struktury se blíží chování normálně konsolidované zeminy.

Pro určení vrcholové pevnosti nebyly použity konvenční přímkové obálky s vrcholovou soudržností, ale přímkové obálky procházející počátkem (předpokládá se nulová soudržnost). Uvažované obálky pevnosti jsou vykresleny společně s dráhami napětí na Obr.4.17 a 4.18.



Obr.4.17 Graf závislosti poloviny deviátorového napětí t' na napětí s' v průběhu zkoušek na vzorcích z hloubky 25,5 – 26,0 m.

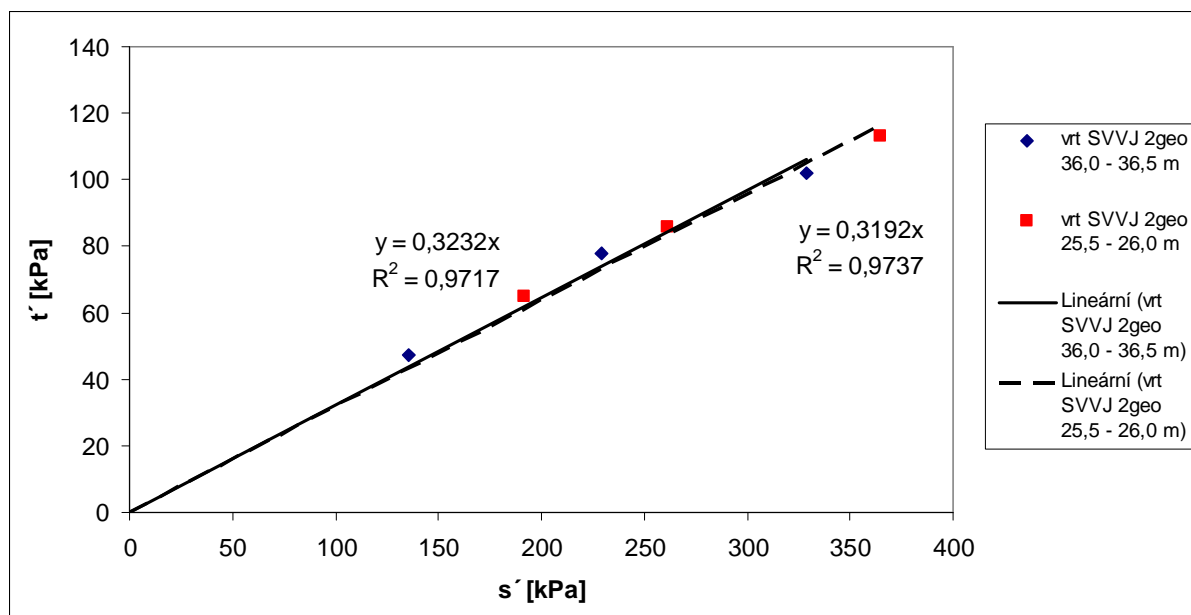


Obr.4.18 Graf závislosti poloviny deviatorového napětí t' na napětí s' v průběhu zkoušek na vzorcích z hloubky 36,0 – 36,5 m.

Výsledné hodnoty pevnosti jsou shrnuty v Tab.4.2, kde σ'_r je počáteční efektivní napětí, s'_p je uvažovaná hodnota středního napětí, t'_p je uvažovaná hodnota poloviny deviatorového napětí, φ_p je vrcholový úhel vnitřního tření a c_p je vrcholová soudržnost. Obálky kritické pevnosti jsou pro aplikovaný obor napětí vyjádřeny přímkovou obálkou procházející počátkem. Tyto obálky jsou zobrazeny na Obr.4.19.

| vzorek | σ'_r [kPa] | s'_p [kPa] | t'_p [kPa] | φ_p [°] | c_p [kPa] |
|----------------------------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|
| SVVJ 2geo 25,5 - 26,0 m | 200 | 192,0 | 65,0 | 18,6 | 0 |
| | 300 | 261,4 | 85,6 | | |
| | 450 | 364,9 | 113,0 | | |
| SVVJ 2geo 36,0 - 36,5 m | 200 | 135,7 | 47,1 | 18,9 | 0 |
| | 300 | 229,1 | 78,0 | | |
| | 450 | 328,6 | 102,1 | | |

Tab.4.2 Přehled výsledků zkoušek na neporušených vzorcích.



Obr.4.19 Obálky pevnosti neporušených vzorků z vrtu SVVJ 2geo.

4.4 Zkoušky v rotačním smykovém přístroji

Celkem jsem provedl tři zkoušky v rotačním smykovém přístroji typu Broamhead.

4.4.1 Popis přístroje

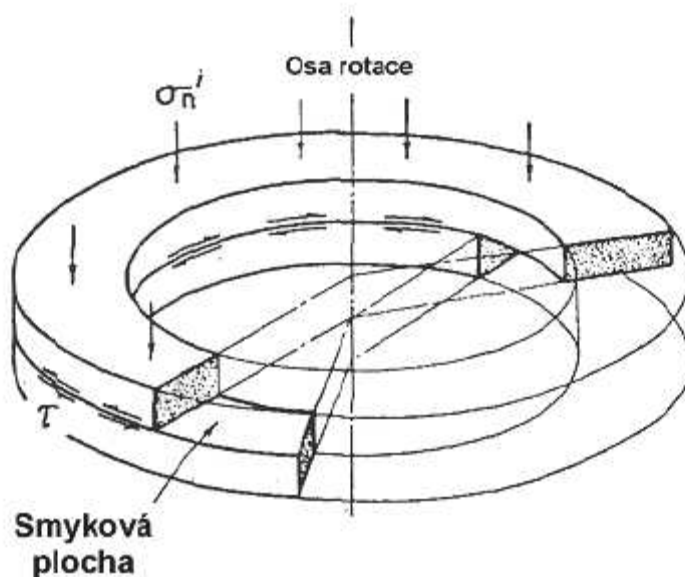
Zkoušky byly provedeny v rotačním krabicovém přístroji navrženém Bromheadem (1979) vyrobeném firmou Wykeham Farrance Ltd.

Rekonstituovaný vzorek se umísťuje do vzorkového kontejneru, který je tvořen jedním dílem a lze jej snadno vyjmout z přístroje. Prostor pro vzorek má tvar mezikruží o vnitřním průměru 70 mm a vnějším průměru 110 mm a výšce 5 mm. Vzorkový kontejner je ukotven v přístroji pomocí dvou zajišťovacích šroubů k rotující desce. Odvodnění vzorku zajišťují bronzové porézní destičky umístěné uvnitř smykové krabice a na horní desce. Destičky mají zdrsňený povrch a zapuštěné radiální rýhy, aby se zabránilo vzniku smykové plochy mezi destičkou a vzorkem.

Vzorek je stlačen mezi dvěma porézními destičkami pomocí pákového mechanismu, na jehož konec se pokládá závaží. Pákový mechanismus je nastaven na poměr 1:10, což vzhledem k ploše vzorku 40 cm² znamená, že každý kilogram závaží na závěsné tyči

vyvozuje 25 kPa normálové zatížení. Horní deska je opatřena dvěma rameny, která jsou v průběhu smyku v kontaktu s dynamometry bránící desce v pohybu. Tyto dynamometry snímají sílu vyvozenou odporem při smykání. Síla se k dynamometrům přenáší dvěma spojovacími tyčemi. Jejich kontakt s konstrukcí přístroje je řešen pomocí kuličkových ložisek, aby nevznikalo nežádoucí tření. Kromě smykové síly je v průběhu zkoušky měřena vertikální deformace vzorku pomocí digitálního úchylkoměru snímajícího změnu výšky horní desky.

Rotaci vzorku zajišťuje elektromotor, který otáčí deskou s níž je spojen vzorkový kontejner. Rychlost smyku se nastavuje pomocí převodovky a kombinací několika ozubených koleček různém průměru.



Obr.4.20 Schéma vzorku v rotačním smykovém přístroji (Head, 1998).

4.4.2 Zdroje chyb

Nejčastější zdroje chyb shrnul Bromhead (1979) do následujících kategorií:

1. Nepřesnosti v měření smykového napětí.
2. Tření na středním kolíku.
3. Vznik tření mezi horní deskou a krabicí v důsledku naklonění desky nebo zachycení unikajícího materiálu.

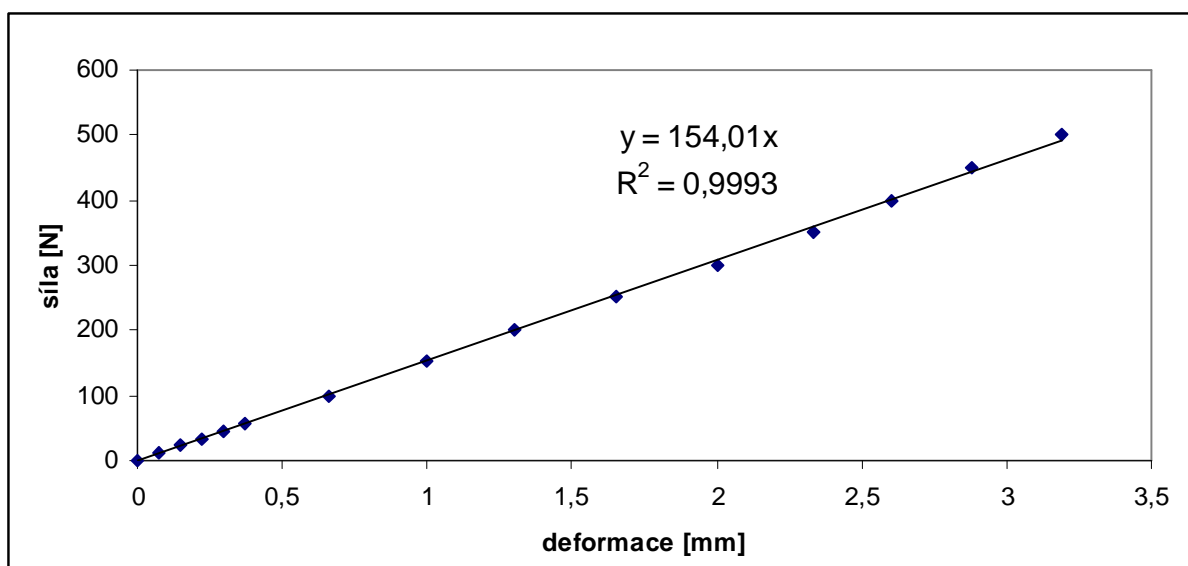
4. Boční tření materiálu, nevytvoří-li se smyková plocha poblíž kontaktu s horní porézní destičkou.
5. Možnost nestejnomyšného působení smykové síly u vnějšního a vnitřního okraje vzorku

Stark a Vettel (1992) pozorovali, že nejzávažnější je přítomnost plášťového tření, které vzniká na kontaktu herní desky a vlastní krabice se vzorkem. V důsledku úniku materiálu během zkoušky dochází ke zmenšování objemu vzorku a zaklesnutí horní desky do rotující krabice. Na kontaktu krabice a desky může vzniknout tření, jehož velikost nelze určit, a které zvyšuje měřené smykové napětí. Stark a Vettel (1992) prokázali, že se tyto jevy intenzivně projevují při zaklesnutí horní desky. Při poklesu výšky vzorku o 2 mm pozorovali zvýšení úhlu vnitřního tření o 25 %. Z tohoto důvodu se někteří autoři snažili upravit testovací proceduru, aby vliv plášťového tření minimalizovali. Byli to například Stark a Vettel (1992) nebo Kakou et al. (2001). Tření na středním kolíku bylo eliminováno namazáním silikonovou vazelínu.

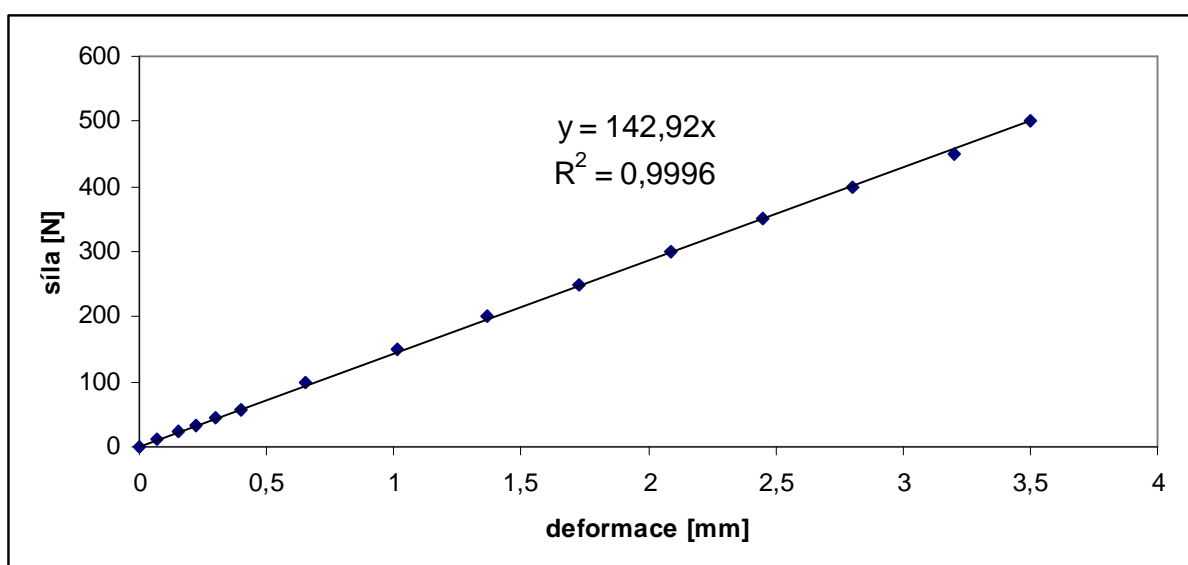
4.4.3 Kalibrace měřidel

V případě zkoušek v rotačním smykovém přístroji bylo nutné kalibrovat dva dynamometry, které sloužily k měření smykové síly. Dynamometry byly vybaveny digitálními úchylkoměry s rozlišením 0,001 mm, což odpovídá změně smykového napětí přibližně 0,07 kPa. Dynamometry byly kalibrovány před první zkouškou a po poslední zkoušce.

Kalibrace probíhala, tak že dynamometry byly vyjmuty z držáků na přístroji. Následně byl dynamometr postupně zatěžován tak, že na něj bylo pokládáno závaží. Pro každý přitěžovací krok byly zaznamenávány hodnoty deformace dynamometru a při odlehčování byly kontrolovány. Ze získaných hodnot byla získána kalibrační křivka, jež je definována rovnicí přímky a její spolehlivost vyjádřena relačním koeficientem. Kalibrační křivky pro oba dynamometry jsou zobrazeny na Obr.4.21 a 4.22.



Obr.4.21 Kalibrační křivka dynamometru 15803A.



Obr.4.22 Kalibrační křivka dynamometru 15803B.

4.4.4 Průběh zkoušek

Pro provedené zkoušky byla zvolena metoda Flush test jak ji popisuje Najser (2004). Metodu navrhl Stark a Vettel (1992) a vychází ze snahy o co nejmenší pokles výšky vzorku před zahájením smyku.

Prvním krokem je nasycení spodní porézní destičky ve vzorkové krabici vodou. Následně se do vzorkového prostoru postupně vpraví rekonstituovaný materiál. Podle Wykeham

Farrance (1988) se vzorek po zaplnění celého mezikruží zarovná do jedné roviny s horním okrajem, čímž je výška vzorku upravena na 5 mm. Alternativně Kakou et al. (2001) doporučují nezarovnávat vzorek do jedné roviny s horním okrajem krabice, ale navýšit vzorek o 2 až 3 mm nad okraj krabice. Tento postup sice neumožňuje přesně určit výšku vzorku před konsolidací, ale zajistí větší výšku vzorku po konsolidační fázi. Pro zkoušku při normálovém zatížení 30 kPa byla zvolena varianta podle Wykeham Farrance a pro zkoušky při normálovém zatížení 60 a 120 kPa varianta podle Kakou et al. (2001).

Poté se krabice umístí do přístroje a zabezpečí se zajišťovacími šrouby. Umístěním horní desky začíná být vzorek konsolidován, pokles vzorku však nelze v této fázi měřit. Následně se na horní desku umístí pákový mechanismus a digitální úchylkoměr pro měření vertikální deformace. Zatěžování probíhalo po malých stupních a před každým přitížením byla umožněna úplná konsolidace vzorku. Za ukončení konsolidace bylo považováno ustálení vertikální deformace na konstantní hodnotě. V případě výrazného poklesu při konsolidaci se odejmula horní deska a na zkonsolidovaný materiál byla nanesena další vrstva rekonstituovaného materiálu a vzorek byl rekonsolidován.

Zkonsolidované vzorky byly smykány konstantní rychlostí, jejíž průměrná hodnota uprostřed byla 0,036 mm/min. Rychlost smyku byla zvolena tak, aby ve vzorku nevznikaly pórové tlaky. Délka smyku závisela na vývoji napětí-odeformačního diagramu a smyk byl ukončen při ustálení hodnoty smykového napětí na nejnižší hodnotě, která odpovídala reziduální pevnosti. Po ukončení smyku byla změřena výška vzorku a vzorek byl zvažen a vysušen pro určení vlhkosti.

4.4.5 Vyhodnocení zkoušek

V průběhu každé zkoušky byly v pravidelném intervalu zaznamenávány hodnoty z digitálních úchylkoměrů, které sloužily k měření deformace dynamometrů a změny výšky vzorku během zkoušky. Pro výpočet smykových sil F_1 a F_2 působící na dynamometr byly použity kalibrační křivky uvedeny kapitole 4.4.3. Výsledné smykové napětí se vypočítá podle vzorce, který uvádí Najser (2004) v manuálu k tomuto přístroji:

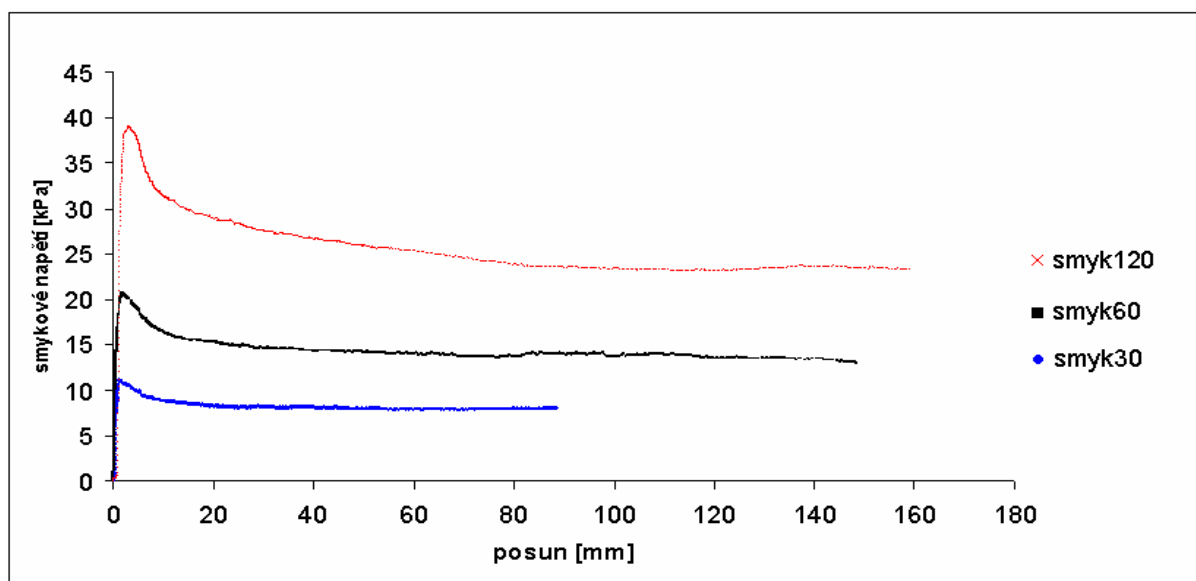
$$\tau = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)}$$

kde F_1 a F_2 jsou síly působící na levý a pravý dynamometr, L je vzdálenost mezi oběma rameny a R_1 a R_2 je vnitřní a vnější poloměr vzorkového prostoru. Normálové napětí se vypočítá podle vzorce:

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

tedy jako síla P působící na plochu mezikruží. Z výsledné závislosti smykového napětí τ na normálovém napětí σ' se určí pevnostní parametry zkoušené zeminy.

Výsledky zkoušek jsou vyneseny v pracovním diagramu závislosti smykového napětí na posunu (Obr.4.23). Zkoušky byly prováděny tak dlouho dokud nedošlo k ustálení smykového napětí na konstantní hodnotě. Tato hodnota smykového napětí představuje reziduální pevnost. Doba trvání jedné zkoušky se pohybovala obvykle okolo jednoho týdne i s konsolidační fází, v závislosti na zvoleném normálovém napětí. Najser a Boháč (2005) uvádí, že u zkoušek v rotačním krabicovém přístroji na rekonstituovaném materiálu představuje maximální smykové napětí kritickou pevnost. Z grafu je patrné, že se vzrůstajícím normálovým napětím, vzrůstá také smykové napětí. To se projeví strmějším a jasnějším vrcholem. Dále je z grafu patrné, že maximálního smykového napětí u všech zkoušek bylo dosaženo během posunu 1 až 5 mm.



Obr.4.23 Graf závislosti smykového napětí na posunu.

Pro vyhodnocení kritické pevnosti u provedených zkoušek byl použit vztah, jenž doporučují Najser a Boháč (2005):

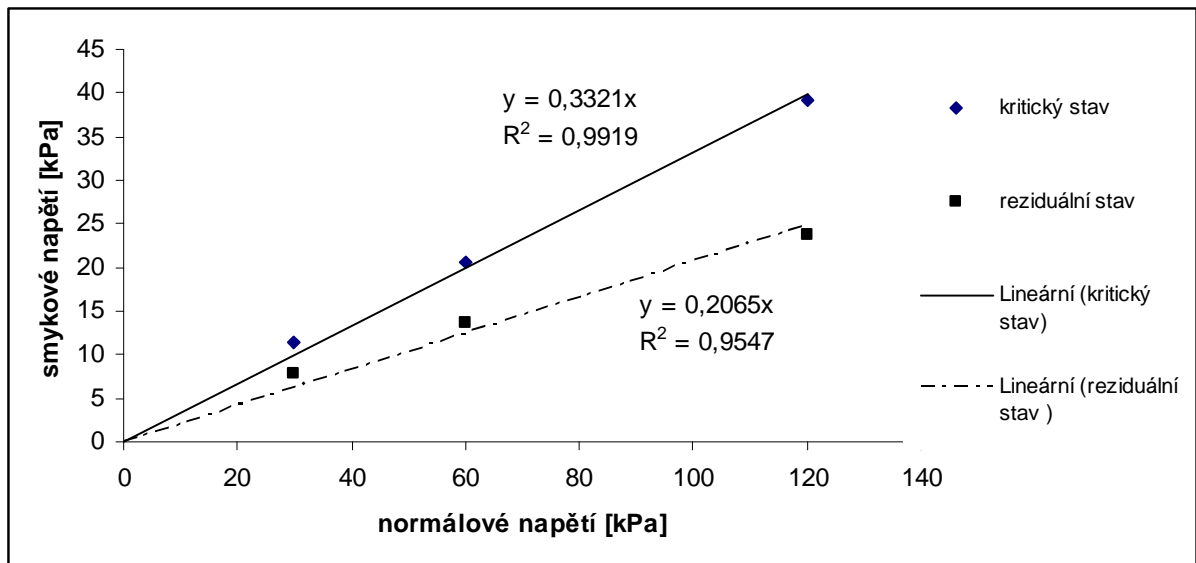
$$\sin \varphi' = \frac{\tau}{\sigma'}$$

tento vztah vyplývá z nulové dilatace za kritického stavu a je přesnější než standardní interpretace, kde se předpokládá, že experimentálními body (τ , σ') lze proložit obálku, tzn. že platí $\tau = \sigma' \sin \varphi'$, ačkoli to neodpovídá skutečnosti u žádného přístroje typu direct shear. Nepřesnost standardní interpretace narůstá se zvyšujícím se úhlem vnitřního tření. Přehled publikovaných interpretací podávají Lings a Dietz (2004).

Výsledky všech smykových zkoušek jsou uvedeny v Tab.4.3, kde σ je normálové napětí, τ je smykové napětí, φ je úhel vnitřního tření, čárka znamená efektivní, indexy cr a rez znamenají kritický stav respektive reziduální stav. Na Obr.4.24 je zobrazena kritická a reziduální obálka pevnosti zkoušeného materiálu. Obálka je charakterizována rovnicí přímky a korelačním koeficientem R. Obálky jsou proloženy počátkem, předpokládá se nulová soudržnost.

| | σ' [kPa] | τ'_{cr} [kPa] | φ_{cr} [°] | τ'_{rez} [kPa] | φ_{rez} [°] |
|---------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| smyk30 | 30 | 11,4 | 19,4 | 7,9 | 11,9 |
| smyk60 | 60 | 20,7 | | 13,7 | |
| smyk120 | 120 | 39,1 | | 23,7 | |

Tab.4.3 Přehled výsledků zkoušek v rotačním smykovém přístroji



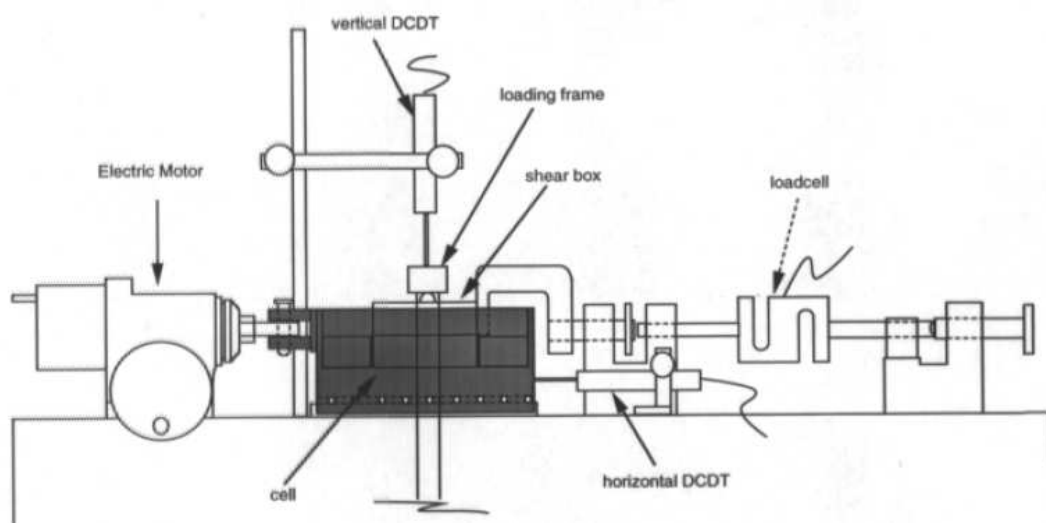
Obr.4.24 Obálka kritické a reziduální pevnosti ze zkoušek na rekonstituovaném materiálu.

4.5 Zkouška v translačním smykovém přístroji

Zkouška v translačním smykovém přístroji byla provedena pouze jedna.

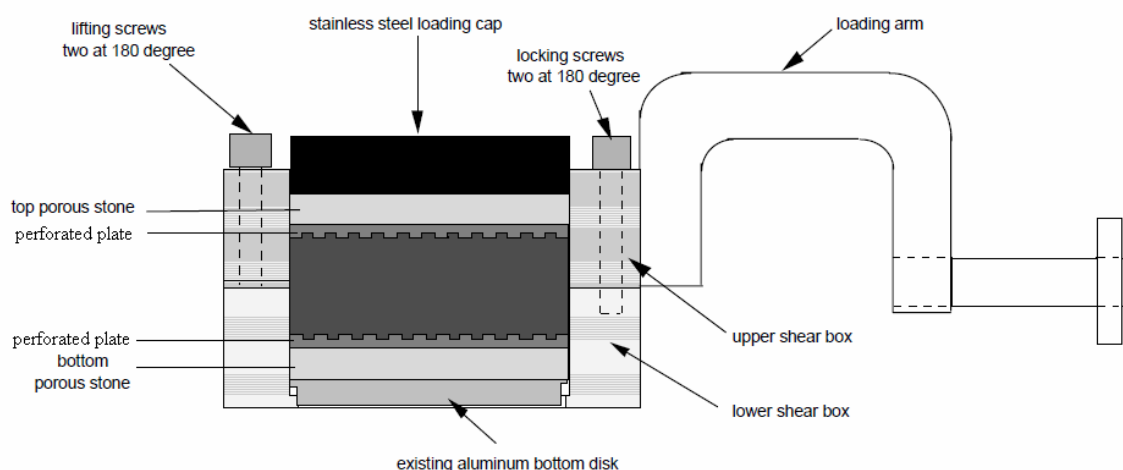
4.5.1 Popis přístroje

Zkouška byla provedena v translačním smykovém přístroji vyrobeném firmou VJ Tech Ltd. Schéma translačního přístroje je zobrazeno na Obr.4.25.



Obr.4.25 Schéma translačního smykového přístroje

Rekonstituovaný materiál se umísťuje do vzorkové krabice, která se skládá ze dvou částí (horní a dolní krabice). Prostor pro vzorek má tvar válce o průměru 60 mm a výšce 50 mm. Odvodnění vzorku je zajišťováno pomocí dvou drenážních destiček, které se osazují do krabice při instalaci vzorku. Mezi drenážní destičkou a vzorkem je umístěna ještě děrovaná zazubená kovová destička a na horní drenážní destičku je umístěna masivní kovová zatěžovací destička. Uspořádání destiček a vzorku je zobrazeno na Obr.4.26. Smyková krabice je uložena v kovové otevřené nádobě obdélníkového tvaru, která je během zkoušky naplněna vodou a zabraňuje tak vysychání vzorku během zkoušky, ke které je dolní část krabice připevněna dvěma šrouby.



Obr.4.26 Uspořádání vzorku ve smykové krabici.

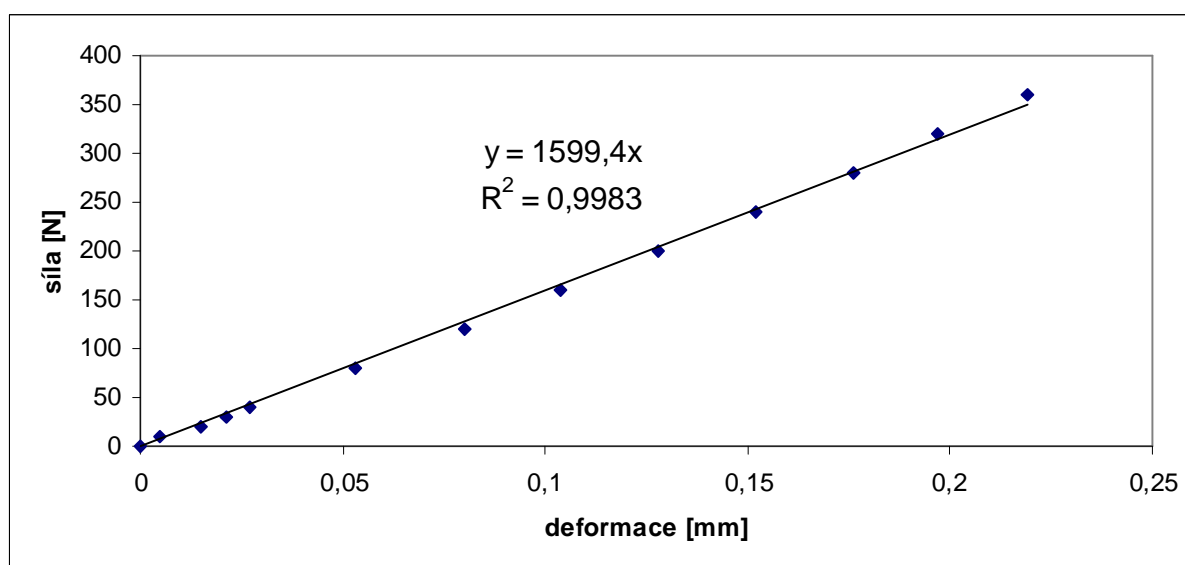
Normálové zatížení je vyvozováno pomocí pákového mechanismu, který pracuje v poměru 1:10. Což vzhledem k ploše vzorku $28,27 \text{ cm}^2$ znamená, že každý kilogram závaží na závěsné tyči vyvozuje 35 kPa normálové zatížení. Smyková síla, která je vyvozována během smykání, je měřena pomocí dynamometru, který je pevně přichycen k horní části smykové krabice a konstrukci přístroje. Kromě smykové síly je v průběhu zkoušky měřena vertikální deformace vzorku a posun krabice pomocí digitálních úchylkoměrů.

Posun krabice zajišťuje elektromotor, který pohybuje kovovou nádobou v níž je smyková krabice umístěna. Rychlost smyku se nastavuje na panelu s LCD displejem a je možné nastavit rychlost v rozmezí 0,00001 až 10 mm/min.

4.5.2 Zdroje chyb a kalibrace měřidel

Stejně jako v případě rotačního přístroje k nejčastějším chybám patří nepřesnosti v měření smykové síly, vznik tření mezi horní a dolní částí krabice a tření mezi spojovací tyčí a konstrukcí přístroje. V případě zkoušky v translačním smykovém přístroji bylo nutné kalibrovat pouze jeden dynamometr, který sloužil k měření smykové síly. Dynamometr byl vybaven digitálním úchylkoměrem s rozlišením 0,001 mm, což odpovídá změně smykového napětí přibližně 0,07 kPa. Dynamometr byl kalibrován pouze před zkouškou.

Kalibrace probíhala, tak že dynamometr byl vyjmut z držáku na přístroji a následně postupně zatěžován tak, že na něj bylo pokládáno závaží. Pro každý přitěžovací krok byla zaznamenávána hodnota deformace dynamometru a při odlehčování byly hodnoty kontrolovány. Ze získaných hodnot byla získána kalibrační křivka, jež je definována rovnicí přímky a její spolehlivost vyjádřena relačním koeficientem. Kalibrační křivka je zobrazena na Obr.4.27.



Obr.4.27 Kalibrační křivka dynamometru translačního přístroje

4.5.3 Průběh zkoušky

Nejdříve se do kovové nádoby umístila spodní část krabice a zajistila pomocí dvou šroubů. Následně se na dolní část připevnila horní část krabice rovněž pomocí dvou fixačních šroubů a horní část byla zároveň spojena s dynamometrem pomocí spojovací tyče.

Stejně jako u zkoušek v rotačním smykovém přístroji se vloží rekonstituovaný materiál přímo do vzorkového prostoru. Nejdříve se do krabice umístí drenážní destička, která byla předtím pročištěna a nasycena v ultrazvukové lázni, a kovová zazubená destička. Následně se do krabice nanese rekonstituovaný materiál po okraj vzorkové krabice, z důvodu zajištění dostatečné výšky vzorku po konsolidační fázi. Poté se na rekonstituovaný materiál umístí kovová zazubená destička, drenážní destička a masivní zatěžovací destička. Uspořádání uvnitř krabice je zobrazeno na Obr.4.26 v kapitole 4.5.1. Aby nedošlo k vychýlení či zaražení horních destiček o okraj horní části krabice, byl zde umístěn kovový prstenec, který slouží k vyřezávání neporušených vzorků.

Po osazení vzorku do krabice se na zatěžovací destičku umístí pákový mechanismus a digitální úchylkoměr pro měření vertikální deformace. Po umístění závaží na pákový mechanismus začala konsolidační fáze. Zatěžování probíhalo po malých stupních a před každým přitížením byla umožněna úplná konsolidace vzorku. Za ukončení konsolidace bylo považováno ustálení vertikální deformace na konstantní hodnotě.

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 cca 0,5 mm, což odpovídalo polovině otočky všech čtyř šroubů

Zkonsolidovaný vzorek byl smykán konstantní rychlostí, jejíž hodnota byla 0,0001 mm/min. Rychlost smyku byla zvolena tak, aby ve vzorku nevznikaly pórové tlaky. Délka smyku závisela na vývoji napětíodeformačního diagramu. Po ukončení smyku byla změřena výška vzorku a vzorek byl zvážen a vysušen pro určení vlhkosti.

4.5.4 Vyhodnocení zkoušky

V průběhu zkoušky byly v pravidelném intervalu zaznamenávány hodnoty z digitálních úchylkoměrů, které sloužily k měření deformace dynamometru, změny výšky vzorku během zkoušky a posunu dolní části krabice. Výpočet smykové síly z deformace dynamometru byl proveden pomocí kalibrační křivky v kapitole 4.5.3. Výsledné smykové napětí se vypočítá podle vzorce:

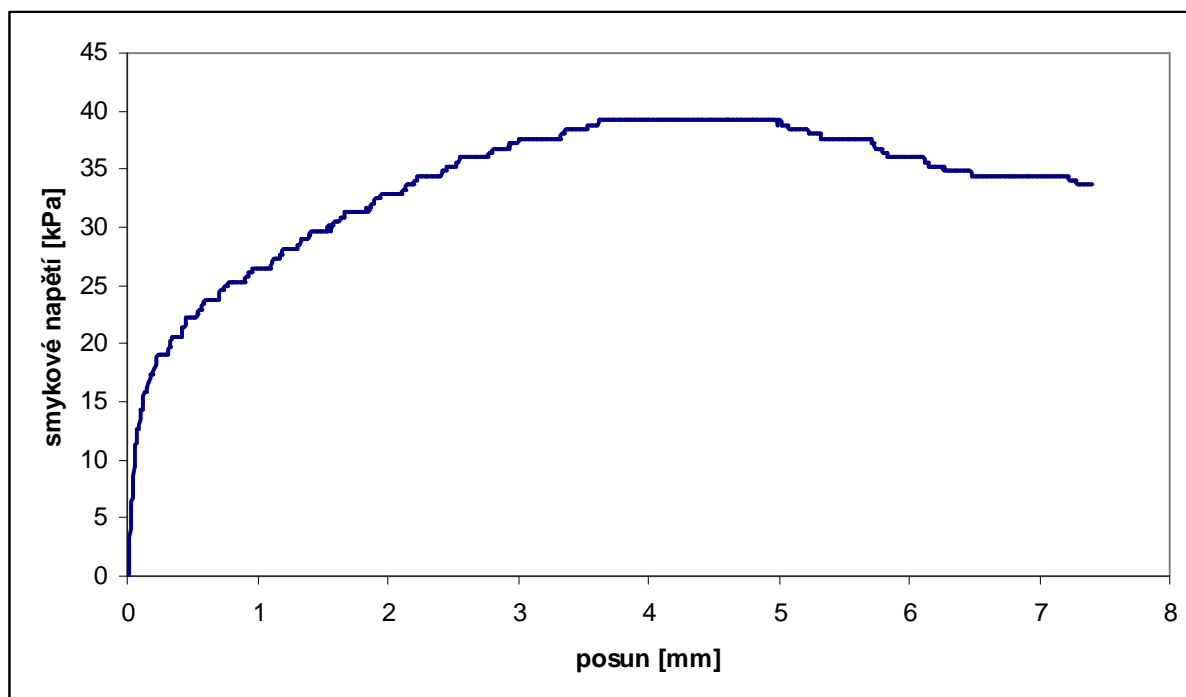
$$\tau = \frac{F}{\pi R^2}$$

kde F je síla působící na dynamometr a R je poloměr vzorkového prostoru. Normálové napětí se vypočítá podle vzorce:

$$\sigma = \frac{P}{\pi R^2}$$

tedy jako síla P působící na plochu vzorku. Z výsledné závislosti smykového napětí τ na normálovém napětí σ se určí pevnostní parametry zkoušené zeminy.

Výsledek zkoušky je vyneseno v pracovním diagramu závislosti smykového napětí na posunu (Obr.4.28). Zkouška byla ukončena po kritické pevnosti. Doba trvání jedné zkoušky se pohybovala obvykle okolo jednoho týdne i s konsolidační fází, v závislosti na zvoleném normálovém napětí. Doba trvání jedné zkoušky se pohybovala okolo dvou až tří týdnů i s konsolidační fází, v závislosti na zvoleném normálovém napětí.



Obr.4.28 Graf závislosti smykového napětí na posunutí.

Zkoušky v translačním smykovém přístroji jsou ovlivněny nerovnoměrnou distribucí smykového a normálového napětí. Ačkoli nelze mechanismus pohybu částic jednoznačně popsat byl pro vyhodnocení opět použit vztah:

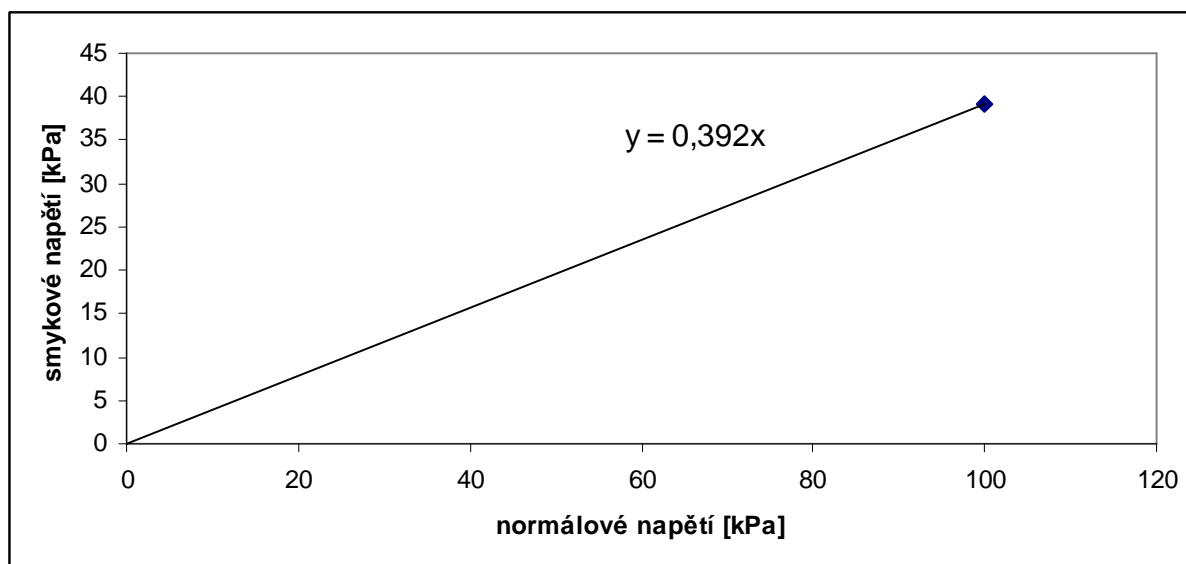
$$\sin \varphi' = \frac{\tau'}{\sigma'}$$

Pevnost je tak možné porovnat s výsledky zkoušek v rotačním smykovém přístroji.

Výsledné hodnoty z provedené smykové zkoušky jsou uvedeny v Tab.4.4 , kde σ je normálové napětí, τ je smykové napětí, φ je úhel vnitřního tření, čárka znamená efektivní, index cr znamená kritický stav. Na Obr.4.29 je zobrazena kritická obálka pevnosti zkoušeného materiálu. Obálka je charakterizována rovnicí přímky. Obálka je proložena počátkem, předpokládá se nulová soudržnost, která odpovídá kritickému stavu.

| | σ [kPa] | τ_{cr} [kPa] | φ_{cr} [°] |
|---------|----------------|-------------------|--------------------|
| smyk100 | 100 | 39,2 | 23,1 |

Tab.4.4 Přehled výsledků zkoušky translačním přístroji.



Obr.4.29 Obálka kritické pevnosti ze zkoušky v translačním přístroji.

Z důvodů poruchy translačního smykového přístroje byla provedena pouze jedna zkouška. Tato získaná hodnota kritické pevnosti je pouze orientační.

5. Zkoušky provedené Boháčem a Hájkem

Hlavní impulz pro tuto diplomovou práci byly výsledky zkoušek provedené Boháčem a Hájkem (2012), které byly součástí kombinovaného geotechnického průzkumu vnitřní výsypky lomu Jiří v sokolovské pánvi.

Boháč a Hájek (2012) provedli drénované (CID) a nedrénované (CIUP) trojosé zkoušky na zkušebních vzorcích připravených z neporušených vzorků z vrtů OZ 2geo, OZ 2A geo, ZA 12geo. Ze dvou vzorků z vrtu OZ 2geo z hloubky 13,0 – 14,0 m byly připraveny tři neporušené zkušební trojosé vzorky z hloubky a tři zkušební trojosé vzorky rekonstituované pro zkoušky CIUP. Ze vzorku z vrtu OZ 2A geo z hloubky 17,3 – 17,5 m byly připraveny tři neporušené zkušební trojosé vzorky pro zkoušky CIUP. Ze vzorků z vrtu ZA12geo byly připraveny tři neporušené zkušební trojosé vzorky pro zkoušky CIUP z hloubky 15,5 – 16,0 m a tři neporušené zkušební trojosé vzorky pro zkoušky CID z hloubky 20,5 – 21,0 m. Příslušné základní klasifikační rozborů jsou uvedeny v příloze č.1.

Neporušené zkušební trojosé vzorky byly připraveny ze středu vrtných jader standardním způsobem ořezáním nožem, na válečky o průměru cca 38 mm a výšce cca 76 mm. Pro přípravu rekonstituovaných vzorků se zemina nejdříve promíchala s vodou a při vlhkosti větší než vlhkost na mezi tekutosti se protlačila přes síto s otvory 1 mm. Vzniklá pasta se nalila do kovových válců průměru 38 mm a vertikálně se zatížila na hodnotu 60 kPa. Po ukončení konsolidace se vzorek vytlačil z kovového válce a ořízl na výšku cca 76 mm.

Výsledky zkoušek provedené Hájkem jsou uvedeny v Tab.5.1; 5.2; 5.3 , kde σ_a a σ_r jsou osové napětí a komorový tlak, $t = \frac{1}{2} (\sigma_a - \sigma_r)$, $s = \frac{1}{2} (\sigma_a + \sigma_r)$, φ je úhel vnitřního tření, c soudržnost, čárka znamená efektivní, indexy p a c_r znamenají vrcholový respektive kritický stav. Obálky pevnosti jsou zobrazeny na Obr.5.1, 5.2, 5.3, 5.4. Obálky pevnosti neporušených vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo v podstatě splývají s čarou kritických stavů CSL stanovené na rekonstituovaném materiálu z vrtu OZ 2geo, což ukazuje, že jejich materiál je silně prohnětený, bez významné struktury. Výsledná obálka (linearizace s nulovou soudržností) neporušeného vzorku z vrtu OZ 2geo leží dokonce pod čarou kritických stavů stanovenou na rekonstituovaném materiálu z tohoto vzorku, což je v rozporu s teorií. Obálky pevnosti neporušených vzorků z vrtů ZA 12geo leží také pod čarou kritických stavů. V tomto

případě to může být způsobeno rozdílnou zrnitostí nebo mineralogií materiálu (vrt ZA 12geo je situován do jiné části výsypky než vrty OZ 2geo a OZ 2Ageo).

| Vzorek | poč. σ_r' [kPa] | s_{cr}' [kPa] | t_{cr}' [kPa] | φ_{cr}' [deg] |
|--|---------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 2011; OZ 2 _{geo} , 13,0– 14,0 m | 150 | 104,9 | 51,6 | 26,0 |
| | 300 | 218,4 | 96,1 | |
| | 450 | 321,1 | 138,3 | |

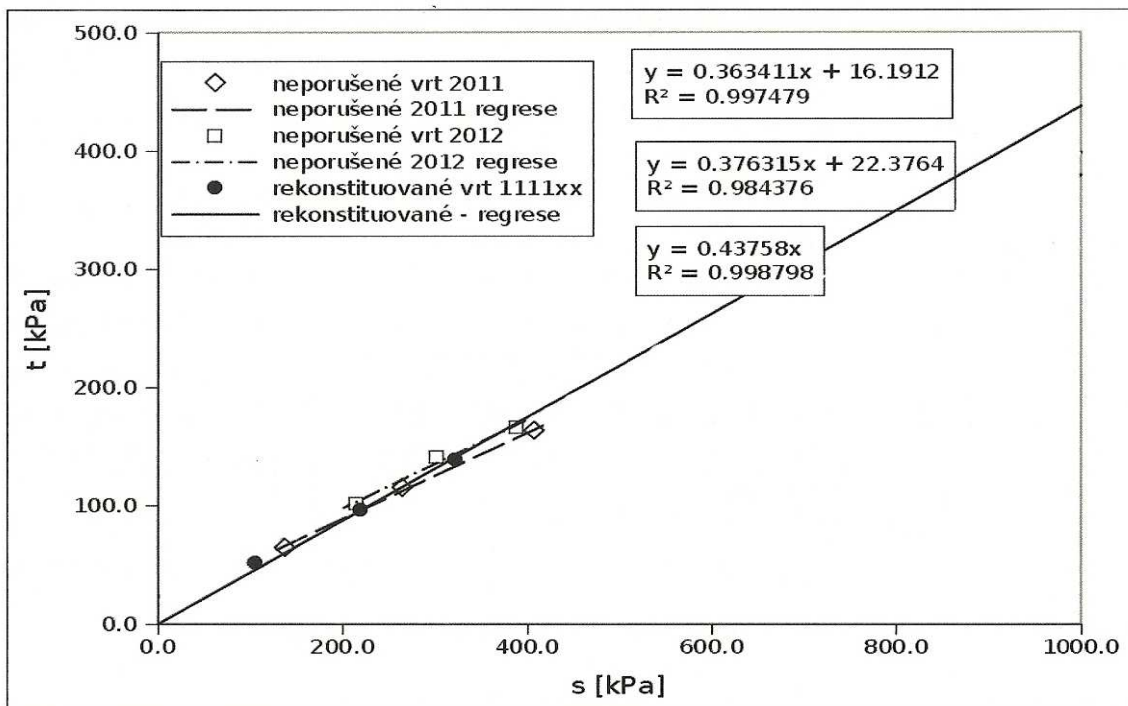
Tab.5.1 Přehled výsledků zkoušek rekonstituovaných vzorků z vrtu OZ 2geo (Boháč a Hájek 2012).

| Vzorek | poč. σ_r' [kPa] | s_p' [kPa] | t_p' [kPa] | linearizace se soudržností | | linearizace bez soudržnosti | |
|---|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | | | | φ_p' [deg] | c_p' [kPa] | φ_p' [deg] | c_p' [kPa] |
| 2011; OZ 2 _{geo} , 13,0– 14,0 m | 150 | 157,2 | 64,6 | 21,3 | 17,4 | 24,5 | 0 |
| | 300 | 264,3 | 115,1 | | | | |
| | 450 | 408,4 | 163,2 | | | | |
| 2012; OZ 2A _{geo} , 17,3– 17,5 m | 200 | 214,3 | 100,7 | 22,1 | 24,2 | 26,5 | 0 |
| | 300 | 301,4 | 140,5 | | | | |
| | 450 | 388,6 | 166,2 | | | | |

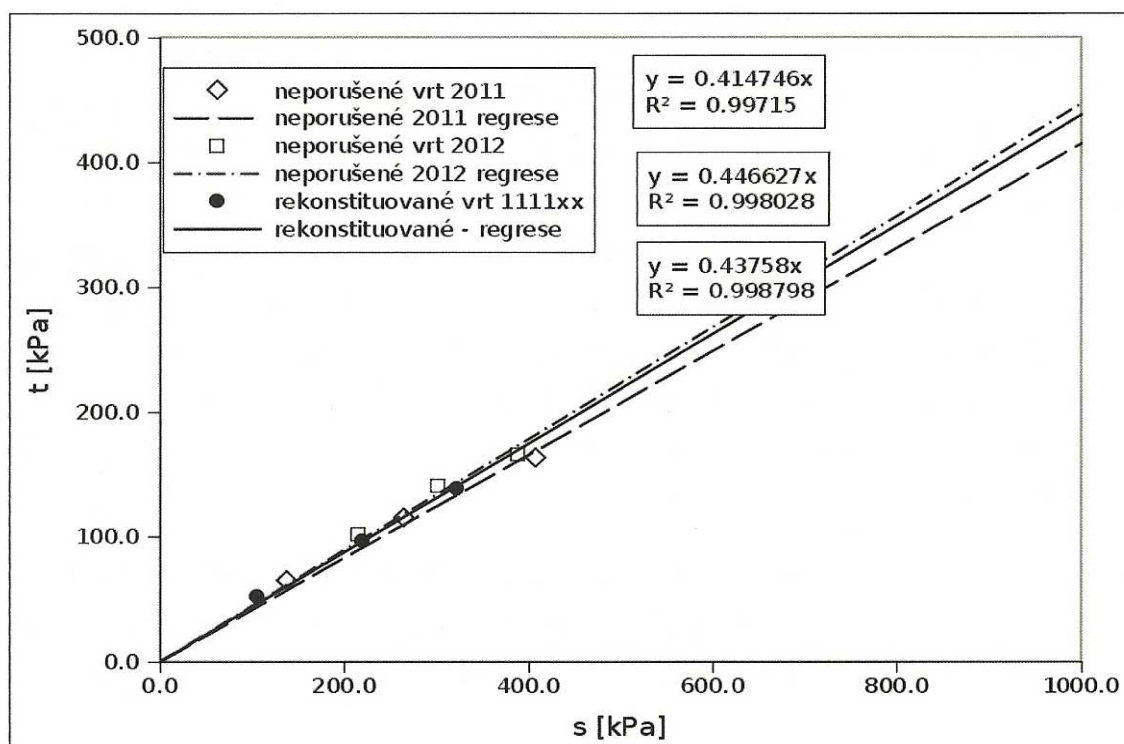
Tab.5.2 Přehled výsledků zkoušek neporušených vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo (Boháč a Hájek 2012).

| Typ zkoušky hloubka | poč. σ_r' [kPa] | s_p' [kPa] | t_p' [kPa] | linearizace se soudržností | | linearizace bez soudržnosti | |
|------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | | | | φ_p' [deg] | c_p' [kPa] | φ_p' [deg] | c_p' [kPa] |
| CID 20,5– 21,0 m | 150 | 255,1 | 102,6 | 19,1 | 23,2 | 24,3 | 0 |
| | 300 | 489,5 | 188,2 | | | | |
| | 450 | 696,6 | 246,9 | | | | |
| CIUP 15,5– 16,0 m | 200 | 157,9 | 67,4 | 22,8 | 7,1 | 21,6 | 0 |
| | 300 | 227,8 | 95,4 | | | | |
| | 450 | 367,8 | 149,0 | | | | |

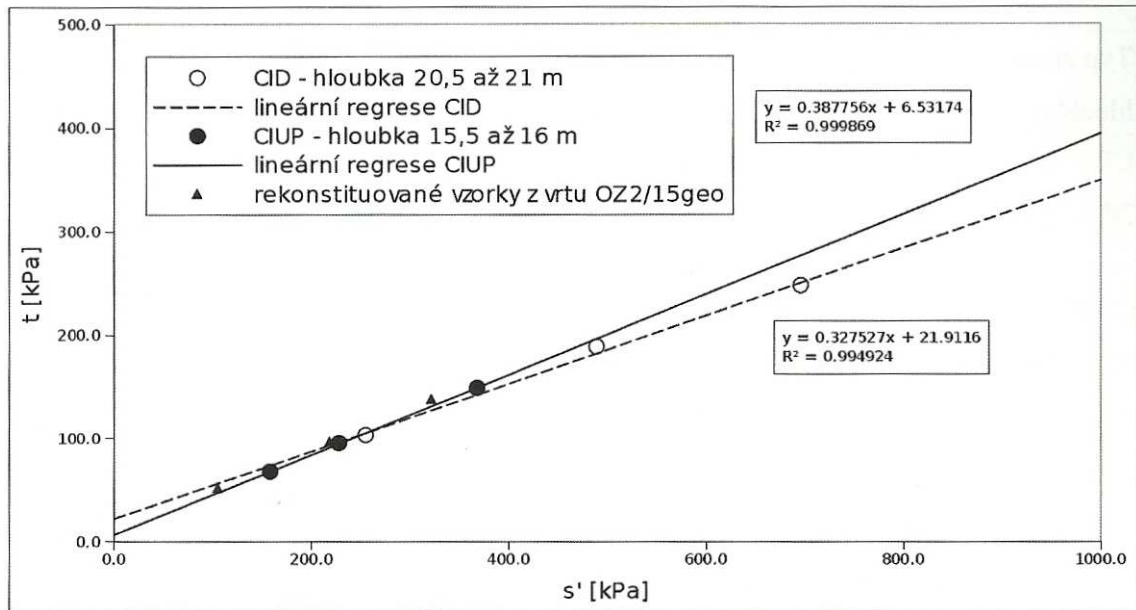
Tab.5.3 Přehled výsledků zkoušek neporušených vzorků z vrtu ZA 12geo (Boháč a Hájek 2012).



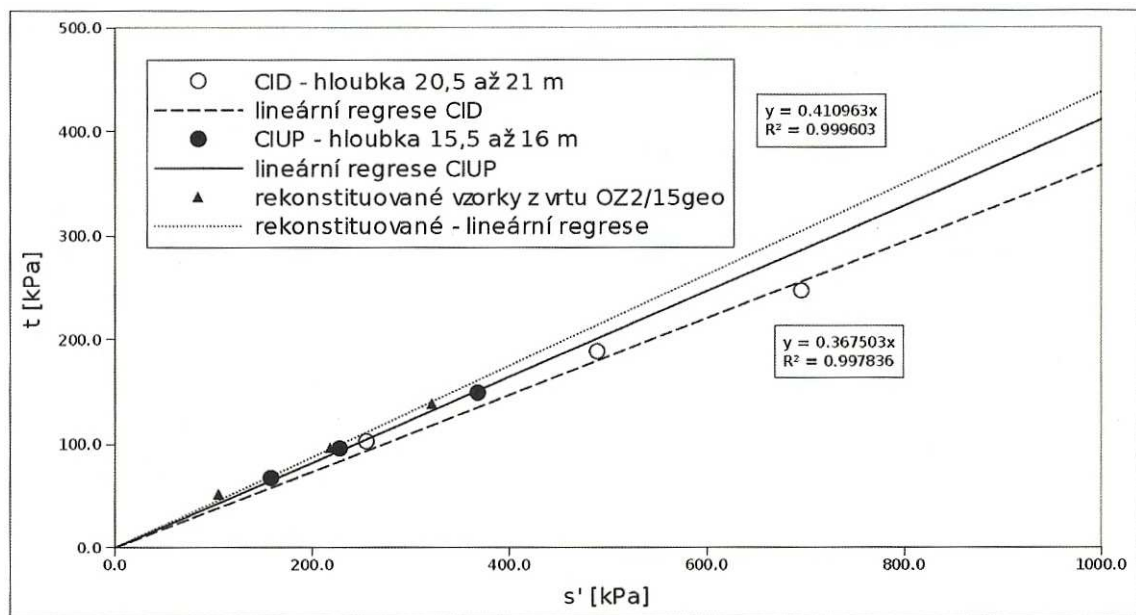
Obr.5.1 Obálky pevnosti vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo – konveční vyjádření (Boháč a Hájek 2012).



Obr.5.2 Obálky pevnosti vzorků z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo – vyjádření s nulovou soudržností (Boháč a Hájek 2012).



Obr.5.3 Obálky pevnosti vzorků z vrtu ZA 12geo – konvenční vyjádření (Boháč a Hájek 2012).



Obr.5.4 Obálky pevnosti vzorků z vrtů ZA 12geo – vyjádření s nulovou soudržností (Boháč a Hájek 2012).

6. Diskuse

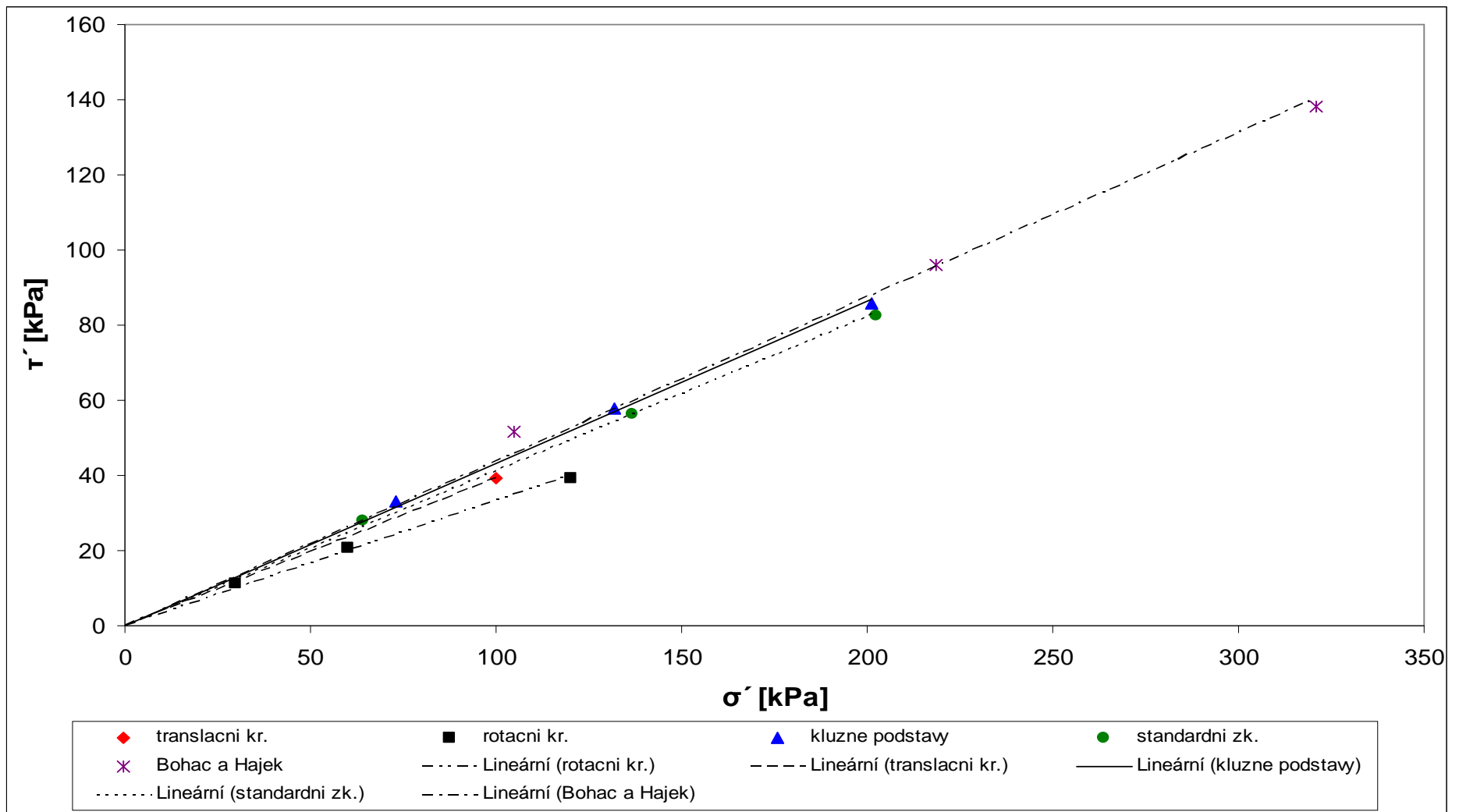
V této kapitole budou výsledky získané z jednotlivých zkoušek diskutovány a porovnány s hodnotami pevnosti zjištěnými během kombinovaného průzkumu sesuvu na vnitřní výsypce lomu Jiří.

6.1 Srovnání výsledků zkoušek na rekonstituovaných vzorcích

V rámci této práce byla zjišťována kritická pevnost výsypkového jílu pomocí čtyř typů laboratorních zkoušek. Výsledné obálky kritické pevnosti jsou zobrazeny na Obr.6.1 společně s obálkou zjištěnou Boháčem a Hájkem (2012) a v Tab.6.1 jsou srovnány výsledné hodnoty kritické pevnosti.

| typ zkoušky | φ_{cr} [°] |
|--|--------------------|
| rotační krabice | 19,4 |
| translační krabice | 23,1 |
| triaxiální zkoušky standardní | 24,3 |
| triaxiální zkoušky s kluznými podstavami | 25,6 |
| triaxiální zkoušky Boháč a Hájek (2012) | 26,0 |

Tab.6.1 Srovnání kritické pevnosti.



Obr.6.1 Srovnání obálek kritické pevnosti.

Při porovnání všech typů zkoušek je patrné, že výsledné hodnoty kritické pevnosti zjištěných ze zkoušek v krabicových přístrojích jsou nižší než hodnoty z triaxiálních zkoušek a nepotvrdilo se tvrzení Najsera a Boháče (2005), že rotační smykový přístroj poskytuje rychlý a dobrý odhad úhlu vnitřního tření v kritickém stavu. Tento rozdíl může být způsoben mechanismem vzniku smykové plochy v krabicových přístrojích. V krabicových přístrojích se může průběžná smyková plocha vyvinout pouze v horizontální rovině mezi horní a dolní částí krabice. V okamžiku mobilizování kritické pevnosti však ještě není průběžná smyková plocha vyvinuta. Proces vzniku smykové ploch detailně popisují Morgenstern a Tchalenko (1967). Při porovnání hodnot kritické pevnosti z rotačního a translačního krabicového přístroje lze předpokládat, že hodnota z krabicového přístroje je věrohodnější navzdory tomu, že rotační smykový přístroj odpovídá více prostému smyku. Ale vzhledem k tomu, že byla provedena pouze jedna zkouška, nelze jí považovat za dostatečně reprezentativní.

Rozdíl v hodnotách kritické pevnosti zjištěné z mnou provedených triaxiálních zkoušek se standardním uspořádáním a s kluznými podstavami je pravděpodobně způsoben podhodnocením kritické pevnosti u zkoušek se standardním uspořádáním vlivem vznikajících lokálních smykových ploch. Dalším faktorem ovlivňujícím výslednou smykovou pevnost při triaxiálních zkouškách se standardním uspořádáním je nabírání soudkovitého tvaru, což způsobuje změnu plochy, na kterou působí axiální napětí. Což by odpovídalo tomu, že skutečná kritická pevnost zkoušeného materiálu odpovídá hodnotě zjištěné z triaxiálních zkoušek s kluznými podstavami. Z triaxiálních zkoušek s kluznými podstavami byl zjištěn úhel vnitřního tření v kritickém stavu $\varphi_{cr} = 25,6^\circ$. Tato hodnota je velmi blízká kritické pevnosti stanovené Boháčem a Hájkem (2012) na stejném materiálu $\varphi_{cr} = 26,0^\circ$.

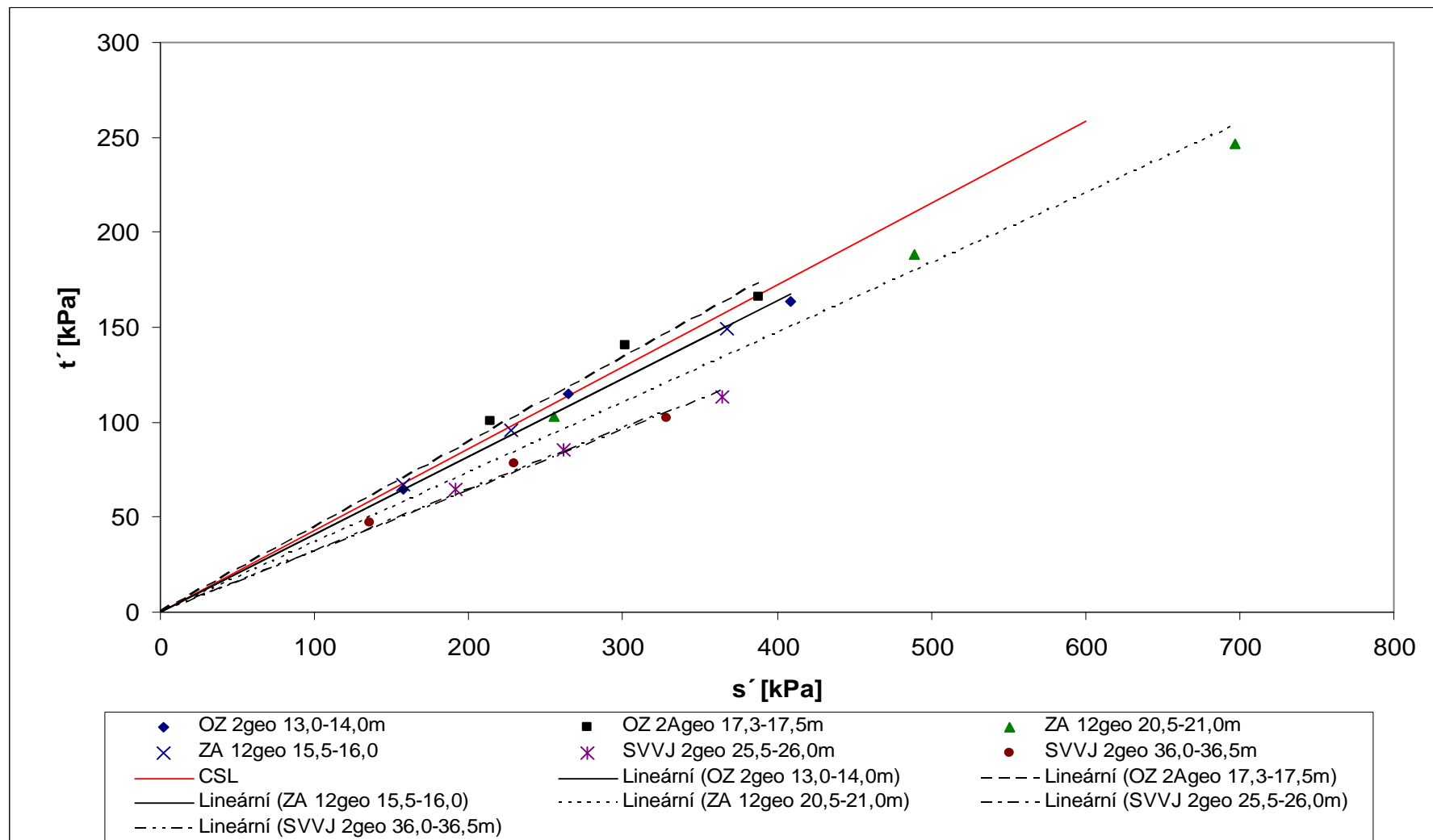
6.2 Srovnání výsledků zkoušek na neporušených vzorcích

V Tab.6.2 jsou uvedeny výsledné hodnoty vrcholové pevnosti stanovené triaxiálními zkouškami. Pro vyjádření vrcholové pevnosti byla zvolena přímková obálka pevnosti s nulovou vrcholovou soudržností (obálka procházející počátkem). Hodnoty vrcholového úhlu vnitřního tření jsou v rozmezí 8° od $18,6^\circ$ až $26,5^\circ$. Tento rozptyl lze vysvětlit rozdílnou zrnitostí jednotlivých vzorků (viz Příloha č.1). Vzorky z vrtů OZ 2geo a OZ 2Ageo mají výrazně vyšší podíl hrubozrné frakce než vzorky z vrtu SVVJ 2geo, kde dominuje jemnozrná frakce.

| vzorek | $\varphi_p [^\circ]$ | c_p [kPa] |
|-------------------------|----------------------|-------------|
| OZ 2geo 13,0-14,0m | 24,5 | 0 |
| OZ 2Ageo 17,3-17,5m | 26,5 | 0 |
| ZA 12geo 20,5-21,0m | 24,3 | 0 |
| ZA 12geo 15,5-16,0 | 21,6 | 0 |
| SVVJ 2geo 25,5-26,0m | 18,6 | 0 |
| SVVJ 2geo 36,0-36,5m | 18,9 | 0 |

Tab.6.2 Srovnání vrcholové pevnosti.

Stanovené vrcholové obálky pevnosti neporušených vzorků jsou zobrazeny na Obr.6.2 společně s čarou kritických stavů CSL z triaxiálních zkoušek s kluznými podstavami. Z tohoto obrázku je patrné, že stanovené vrcholové obálky pevnosti jsou zakřivené. Vrcholové obálky pevnosti vzorků OZ 2geo a OZ 2Ageo jsou blízké CSL stanovené na rekonstituovaných vzorcích, což ukazuje na to, že jejich materiál je silně prohnětený (bez významné struktury) a jejich chování odpovídá chování normálně konsolidovaného jílu. Hodnoty vrcholové pevnosti ostatních vzorků jsou nižší než zjištěné hodnoty kritické pevnosti, ale vzhledem k tomu, že tyto vzorky jsou z jiné části výsypky a mají odlišnou zrnitost než rekonstituovaný materiál, tak je nelze spolehlivě porovnat. Jednotlivé vzorky také mohou mít rozdílné mineralogické složení, v závislosti na tom z jaké části cyprisového souvrství byl materiál sypán.



Obr.6.2 Srovnání vrcholových obálek pevnosti s CSL.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo stanovení kritické pevnosti výsypkového jílu z vnitřní výsypky lomu Jiří a ověření hodnot kritické pevnosti zjištěné Boháčem a Hájkem (2012). Výsledné hodnoty kritické pevnosti z mnou provedených trojosých smykových zkoušek byly v dobré shodě s hodnotou kritické pevnosti, kterou naměřili Boháč a Hájek (2012). Rozdíl v hodnotách kritické pevnosti zjištěné z mnou provedených triaxiálních zkoušek se standardním uspořádáním a s kluznými podstavami je pravděpodobně způsoben podhodnocením kritické pevnosti u zkoušek se standardním uspořádáním vlivem vznikajících lokálních smykových ploch. Což by odpovídalo tomu, že skutečná kritická pevnost zkoušeného materiálu odpovídá hodnotě zjištěné z triaxiálních zkoušek s kluznými podstavami $\varphi_{cr} = 25,6^\circ$. Rozdíl v hodnotách kritické pevnosti zjištěné z mnou provedených triaxiálních zkoušek a hodnotou kritické pevnosti zjištěnou Boháčem a Hájkem (2012) je pravděpodobně způsoben nedostatečnou homogenizací rekonstituované pasty a analytickou přesností stanovení úhlu vnitřního tření. Oproti tomu je výsledná hodnota kritické pevnosti z rotačního smykového přístroje výrazně nižší než předpokládaná skutečná kritická pevnost a nepotvrdilo se tak tvrzení Najsera a Boháče (2005), že rotační smykový přístroj poskytuje rychlý a dobrý odhad úhlu vnitřního tření v kritickém stavu. Při porovnání kritické pevnosti s vrcholovou pevností stanovenou na vzorcích ze stejné části výsypky se ukazuje, že tyto hodnoty jsou v podstatě shodné, což naznačuje, že jejich materiál je silně prohnětený (bez významné struktury) a jejich chování odpovídá chování normálně konsolidovaného jílu.

8. Seznam literatury

Atkinson, J. H.(1993), An introduction to the mechanics of soils and foundations: through critical state soil mechanics. McGraw-Hill Book Company, Berkshire.

Boháč, J. a Hájek, V. (2012), Trojosé zkoušky výsypkového jílu z lomu Jiří. PŘF UK, Praha, září 2012.

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

Bromhead, E. N. (1979), A simple ring shear apparatus. Ground Engineering 12, 40-44.

Burland, J. B. (1990), On the compressibility and shear strength of natural clays. Geotechnique 40, No.3, 329-378.

Burland, J. B., Rampello, S., Georgiannou, V. N. and Calabresi, G. (1996), A laboratory study of the strength of stiff clays. Geotechnique 46, No. 3, 491-514.

Boháč, J. (1991), Trojosé zkoušky vzorků písku s kluznými podstavami, výzkumná zpráva,ústav teoretické a aplikované mechaniky, Praha 1991.

Bolton, M. (1979), A quide to soil mechanics. MacMillan Press, London.

Dykast, I. (1993), Vlastnosti výsypek v SHR z hlediska jejich zástavby, kandidátská práce, ČVUT, Praha 1993

Feda, J. (1977), Základy mechaniky partikulárních látek. Academia, Praha.

Feda, J. (1983) Plouživost zemin, Academia, Praha.

Feda, J. (1998), Fragmentary clay – a difficult waste material. *Engineering Geology*, 51, 77–88

Head, K. H. (1998), *Manual of soil laboratory testing*. John Wiley & Sons Inc., Chichester.

Herbstová, V. and Herle, I. (2009), Structure transitions of clay fills in North-Western Bohemia. *Engineering geology* 104, 157-166.

Herštus, J. Kurka J., Zavoral J. (1991) *Vlastnosti sypaniny skrývkových zemin a jejich směsí s elektrárenským popelem*, SÚ RVT, Stavební geologie, Praha 1991

Charles, J.A. and Watts, K.S. (2001) *Building on fill: geotechnical aspects*. 2nd edition. Construction Research Communications, London.

Jewell, R. A. (1989), Direct shear tests on sand. *Geotechnique* 39, No.2, 309-322.

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.

Kostkanová, V. (2011), *Mechanical behavior of variably saturated clay fills*. Disertační práce PŘF UK, Praha 2011.

Lehane, B. M. and Sardine, R.J. (1992), Residual strength characteristics of Bothkennar clay. *Geotechnique* 42, No.2, 363-367.

Lemos, L. J. L. and Vaughan, P. R. (2000), Clay – interface shear resistance. *Geotechnique* 50, No.1, 55-64.

Lings, M.L. and Dietz, M.S. (2004), An improved direct shear apparatus for sand. *Geotechnique* 54, No.4, 245-256.

Mitchell, J. K. (1993), Fundamentals of soil behavior, 2nd edition. John Wiley & Sons Inc., New York.

Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S. (1967), Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. *Geotechnique* 17, No.3, 309-328.

Najser J. (2004). Použití rotačního smykového přístroje a reziduální pevnost zemin. Diplomová práce, PřF UK, Praha 2004.

Najser, J. (2010), Modelling of lumpy clay fills, Disertační práce PřF UK, Praha 2010.

Najser J. a 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.

Pešek et. al. (2010), Terciární pánve a ložiska hnědého uhlí České republiky. Česká geologická služba, Praha.

Robinson, R.G., Tan, T.S., Dasari, G.R., Leung, C.F. and Vijayakumar, A. (2005), Experimental study of the behavior of a lumpy fill of soft clay. *International Journal of Geomechanics ASCE* 5, No. 2, 125–137.

Rowe, P. (1969), The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear. *Géotechnique* 19, No. 1, 75-86.

Santamarina, J. C. and Cho, G.C. (2001), Determination of critical state parameters in sandy soils – simple procedure. *Geotechnical testing journal* 24, No.2, 185-192.

Skempton, A.W. (1954), The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique* 4, No 4, 143-147.

Skempton, A.W. (1985), Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, No. 1, 3-18.

Sosna, K. (2003), Pevnostní charakteristiky směsí písku. Diplomová práce, PřF UK, Praha 2003,

Stark, T. D. and Vettel, J.J. (1992), Bromhead ring shear test procedure. Geotechnical testing journal 15, No. 1, 150-157.

ShearPLEX User Manual, (2004), ShearPLEX User Manual. VJT 2700. VJ Tech Ltd,

Vaníček, I. and Vaníček, M. (2008), Earth structures in transport, water and environmental engineering. Springer.

Wykeham Tatrance Engineering Ltd. (1988), WF25850 Bromhead ring shear. Slough, England, Engineering Ltd.

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.