

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Aplikovaná geologie



**Bc. Josef Mészáros**

Analýza a sanační opatření sesuvného území u obce Svrčinovec  
Analysis and stabilization of landslide area near Svrčinovec

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. David Mašín, Ph.D.

Praha, 2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval sám, pod vedením doc. RNDr. Davida Mašína, Ph.D. Všechny použité zdroje jsem řádně uvedl v seznamu použité literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 12. 5. 2017

Podpis:

## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Davidu Mašínovi, Ph.D. za trpělivost a cenné rady, které mi budou do budoucna velkým přínosem. Také bych rád poděkoval studentovi doktorandského studia Mgr. Jakubovi Roháčovi za pomoc a cenné rady při laboratorních pracích. Rád bych poděkoval také Bc. Lukáši Bartesovi za pomoc při mapovacích pracích a dále firmě Pontex, s.r.o. za poskytnuté materiály. V neposlední řadě bych rád poděkoval také mojí ženě a dceři za trpělivost a podporu.

V Praze, dne 12. 5. 2017

Bc. Josef Mészáros

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce sleduje inženýrskogeologické aspekty sesuvného území u obce Svrčinovec na Slovensku (okres Čadca). V rámci práce bylo na podzim 2016 provedeno zmapování území pro vytvoření inženýrskogeologické mapy. Pro tvorbu mapy bylo na sledovaném území vytvořeno čtyřicet dokumentačních bodů. Vlastní mapa byla vytvořena v programu AutoCAD v měřítku 1:5000. Legenda mapy je přiložena. V létě 2015 bylo na území odebráno osm porušených vzorků zemin z různých míst. Dva z těchto vzorků zemin byly vybrány pro provedení laboratorní analýzy v translačním a rotačním smykovém přístroji. Účelem laboratorních zkoušek bylo zjištění kritického a reziduálního úhlu vnitřního tření daných zemin. Výsledky byly dále využity v matematickém modelu potenciálně sesuvného svahu. Model byl vytvořen v programu GEO5 a byla spočítána stabilita svahu. V závěru práce jsou shrnuté výsledky stability svahu a navržená sanační opatření pro její zvýšení.

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to study the engineer geological aspects in a landslide area near Svrčinovec in Slovakia (Čadca region). The mapping of monitored area was performed in autumn 2016 for constructing the engineer geological map. Forty documental points were made to construct the map. The map was constructed in PC software AutoCAD in the scale 1:5000. The map legend is attached. Eight reconstituted soil samples from different places in the monitored area were collected in the summer 2015. Two of them were selected to perform a laboratory analysis using shear translational and rotational machine. The aim of a laboratory analysis was to find out a critical and residual angle of friction of the soils. Obtained results were used in the mathematical model of the potential landslide slope. The PC software GEO5 was used for mathematical model construction and the stability of the slope was calculated. Summary of the results concerning the slope stability and stabilization arrangements are mentioned at the end of the thesis.

**OBSAH:**

1.	ÚVOD.....	1
2.	SVAHOVÉ POHYBY .....	2
2.1.	Problematika svahových pohybů.....	2
2.2.	Klasifikace svahových pohybů.....	3
2.3.	Průzkum svahových pohybů.....	6
2.4.	Monitoring svahových pohybů .....	6
3.	LOKALIZACE ÚZEMÍ .....	8
4.	GEOLOGICKÉ A GEOMORFOLOGICKÉ POMĚRY .....	9
4.1.	Geomorfologické poměry .....	9
4.2.	Geologické poměry .....	9
5.	HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY .....	10
5.1.	Hydrogeologie paleogénu .....	10
5.2.	Hydrogeologie kvartéru.....	11
6.	KLIMATICKÉ POMĚRY OBLASTI .....	13
7.	POPIS STUDOVANÉHO PROBLÉMU.....	16
8.	SESUVNÉ ÚZEMÍ SVRČINOVEC.....	18
9.	MAPOVÁNÍ .....	20
10.	LABORATORNÍ PRÁCE.....	21
10.1.	Vzorky pro laboratorní práce.....	21
10.2.	Stanovení křivky zrnitosti .....	23
10.3.	Stanovení konzistenčních mezí .....	26
10.4.	Stanovení pevnosti zemin .....	28
11.	POSOUZENÍ STABILITY SVAHU .....	44

<b>11.1.</b>	<b>Vytvoření inženýrskogeologického profilu .....</b>	<b>44</b>
<b>11.2.</b>	<b>Výpočetní metoda.....</b>	<b>46</b>
<b>11.3.</b>	<b>Tvorba modelu .....</b>	<b>46</b>
<b>11.4.</b>	<b>Výsledky posouzení stability svahu .....</b>	<b>47</b>
<b>12.</b>	<b>SANAČNÍ OPATŘENÍ .....</b>	<b>51</b>
<b>13.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
<b>14.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>55</b>

## 1. ÚVOD

Téma této diplomové práce je lokalizováno do oblasti Karpatského flyše. Výstavba v tomto geologickém regionu je často komplikována problémy souvisejícími se svahovými pohyby. Diplomová práce se zaměřuje na konkrétní problém výstavby v území, kde jsou nebezpečím svahové pohyby, zejména sesuvy deluviálních sutí. Jedná se o oblast v blízkosti obce Svrčinovec na Slovensku, v okrese Čadca.

V rámci modernizace a rozvoje slovenské dálniční sítě byla tato lokalita vybrána pro vedení části trasy slovenské dálnice D3. Bylo rozhodnuto, že údolí potoka, které stálo jako první překážka budovaného úseku dálnici v cestě, bude překonáno mostní konstrukcí. Navíc v tomto místě byly naprojektovány další dva mosty, které fungují jako exit dálnice a napojení na stávající komunikaci I/11. Svahy údolí jsou však z geologického hlediska na mnoha místech nestabilní a existují zde sesuvy, ať již aktivní, či potenciální, které ohrožují mostní objekty a mohou případně způsobit jejich nestabilitu neočekávaným zatížením. Rozsáhlé inženýrskogeologické a hydrogeologické průzkumy, které byly provedeny pro účel stavby dálnice, poukázaly na problematiku sesuvů a sloužily jako podklad pro projektanty, kteří museli riziko sesuvů ve svých projektech zohlednit.

Cílem této diplomové práce je zdokumentovat, zmapovat a zanalyzovat tuto sesuvnou oblast. Laboratorními zkouškami zjistit parametry zemin na reprezentativních vzorcích zemin odebraných v místě, kde hrozí sesutí (potenciální sesuv). Poslední činností v rámci diplomové práce bylo provedení matematického modelu vybraného potenciálního sesuvu, ze kterého byly odebrány vzorky pro laboratorní analýzu, a spočítat stabilitu svahu s použitím výsledků z laboratoře.



## 2. SVAHOVÉ POHYBY

### 2.1. Problematika svahových pohybů

Svahové pohyby obecně jsou skutečností, která se dotýká mnoha oborů lidské činnosti. Ve velké míře se jedná o jevy nežádoucí, kterým se snažíme zabránit. Pakliže dojde k nějakému výraznějšímu svahovému pohybu, znamená to komplikace. Vznik svahových pohybů má různý původ a také různý výskyt. V některých oblastech se jedná o zcela výjimečné úkazy, někde dochází ke svahovým pohybům relativně často. Původ může být taktéž rozmanitý. Jsou známé svahové pohyby, které jsou naprosto přirozené a vyplývají z geologických a geomorfologických poměrů. Známe ale také případy svahových sesuvů, mnohdy s katastrofálními důsledky, které byly způsobeny nešetrným a nezodpovědným zásahem člověka do krajiny. Je možné zmínit například sesuv na přehradě Vajont v Itálii v roce 1963, kde do vodní nádrže sesunutá část svahu způsobila vlnu, která zcela zničila městečko Longarone pod přehradou. Stačí však zajít do historie zcela nedávné. V červnu roku 2013 se sesunula část svahu nad stavbou dálnice D8 z Prahy do Ústí nad Labem u obce Dobkovičky a sesuv část rozestavěné dálnice zasypal. Tento problém způsobil rozsáhlé komplikace s postupem stavby a nemalé ekonomické škody.

Jak je zřejmé, ve velké míře se se svahovými pohyby a komplikacemi s nimi spojenými setkáváme v oboru stavebnictví. Hrají zde velkou, mnohdy zásadní roli už v průběhu rozhodování o umístění případné stavby. Svahové pohyby jsou problémem jak z pohledu projektantů, kteří musí řešit technicky jejich zabezpečování a případnou ochranu projektovaných objektů, tak z pohledu ekonomických dopadů. Náklady na sanační opatření svahů jsou značné.

Mnohdy však není na výběr a daná stavba se musí postavit v oblasti, která není pro stavební práce zrovna příznivá. V tomto případě se setkávají všechny možné obory, které spolu musí úzce spolupracovat při vymýšlení optimálního řešení.

Stavby, které jsou nejčastěji dotčeny svahovými pohyby, jsou zejména stavby dopravní – silnice, dálnice, železnice a s nimi spojené konstrukce – mosty a tunely.

Při řešení zabezpečování svahů je třeba být obezřetný a nic nepodceňovat, jelikož důsledky mohou být katastrofické, jak jsme se již mohli v historii mnohokrát přesvědčit.

## 2.2. Klasifikace svahových pohybů

Svahových pohybů existuje celá řada typů, jejichž rozdělení se řídí různými aspekty. Příčinou těchto pohybů je vždy gravitace v kombinaci s dalšími jevy. Svahové pohyby probíhají a propagují se po smykových plochách.

Smykovou plochou se nazývá oblast, která ohraničuje část svahu v pohybu a část svahu, která již v pohybu není. Často se jedná o vrchní hranici skalního podloží, na kterém smyková plocha vznikne. Není to ale pravidlo. Může se jednat i o rozhraní dvou různých zemin, atd.

Velkou roli při sesouvání hraje míra zvodnění prostředí. Mezi hlavní aspekty rozdělení svahových pohybů patří rychlost sesouvání.

Podle rychlosti rozdělujeme svahové pohyby na plouživé pohyby (*creep*), sesouvání (*slide*), stékání (*flow*) a skalní řízení (*fall*) \* (Záruba, Mencl, 1987).

\* V závorce je uveden anglický ekvivalent. Některé se však hojně používají i v češtině – zejména „*creep*“.

### Plouživé pohyby (*creep*)

Charakteristickým rysem *creepu* je pomalý pohyb – narůstání deformace za stálého napětí. Pohyb je zpravidla nezrychlující se a jedná se řádově o mm/rok. U *creepu* nejde jednoznačně rozeznat, která část svahu se pohybuje a která již ne. Smyková plocha tedy není zcela přesně vymezená, resp. rychlost sesouvání je tak malá, že se smyková plocha často nedá zcela přesně vymežit.

Do této skupiny patří (Záruba, Mencl, 1987):

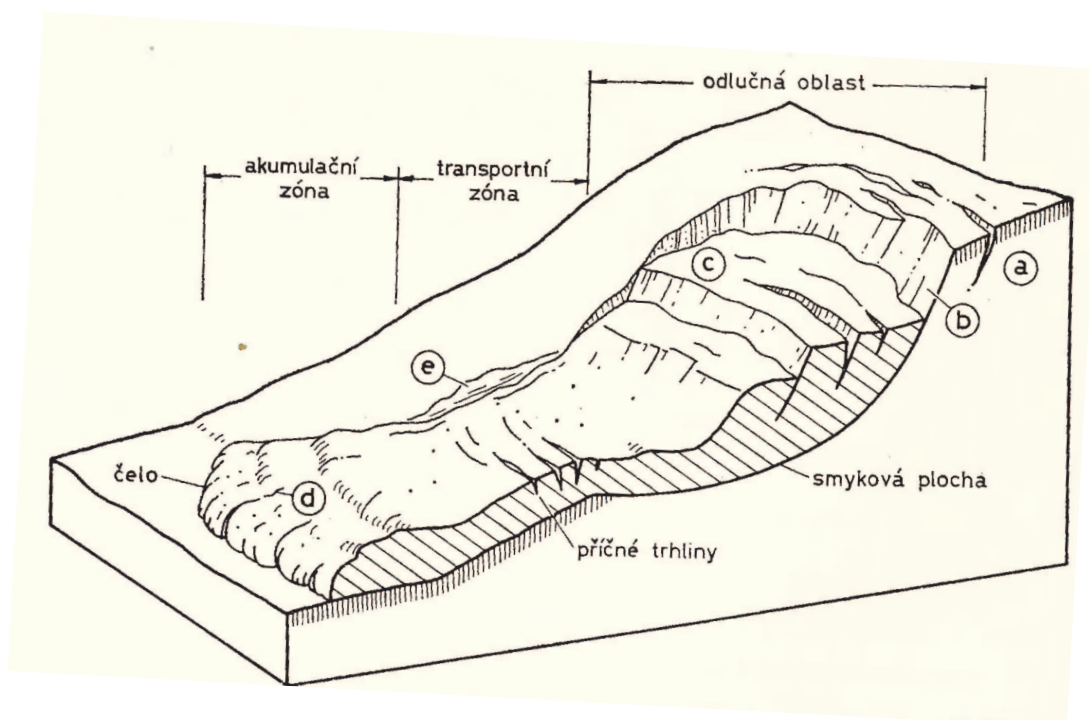
- plouživé pohyby sutí a zvětralin
- soliflukce (pohyb zemin po zmrzlém podloží)
- plouživé pohyby hornin v hloubce
- gravitační vrásnění
- pomalé pohyby bloků na měkkém podloží
- bulging (vytlačování hornin na dně údolí)

## Sesouvání (*slide*)

Sesouváním se označují relativně rychlé krátkodobé klouzavé svahové pohyby podél smykové plochy, nebo více smykových ploch. Výslednou formou pohybu je sesuv.

Sesuv je podle stavby rozdělen na 3 základní části (Záruba, Mencl, 1987):

- Odlučná oblast (v horní části)
- Transportní zóna (středová část)
- Akumulační zóna (spodní část)



Obr. 1: Stavba sesuvu podle kruhové smykové plochy (Záruba, Mencl, 1987)

Dále se sesuvy rozdělují:

Podle tvaru smykové plochy (Záruba, Mencl, 1987):

- Rotační (kruhová smyková plocha)
- Planární (rovinná smyková plocha)
- Rotačně – planární (smyková plocha je složená)
- Translační

Podle plošného tvaru (Záruba, Mencl, 1987):

- Proudový sesuv (délka je mnohokrát větší než šířka)
- Plošný sesuv (přibližně stejná délka a šířka)
- Frontální sesuv (šířka je dominantní nad délkou)

Podle aktivity (Záruba, Mencl, 1987):

- Aktivní (jsou v pohybu)
- Potenciální (v pohybu momentálně nejsou, avšak pohyb může být obnoven)
- Stabilizované (příčina pohybu již zanikla)

### **Stékání (flow)**

Stékáním se rozumí krátkodobý rychlý svahový pohyb, při němž sesouvající se hmoty obsahují tolik vody, že pohyb má charakter tečení. Výslednou formou pohybu je proud.

Proudy dělíme na (Záruba, Mencl, 1987):

- Zemní proudy – většinou mají rozlehlou odlučnou oblast v horní části svahu, z níž materiál odtéká v podobě úzkého proudu k úpatí svahu.
- Kamenité (přivalové) proudy – tvoří se na strmých svazích, kde přivalové vody strhávají materiál vytvořený jako produkt zvětrávání
- Svahové poruchy vznikající vyplavováním písku
- Sesuvy senzitivních jílu
- Subakvatické skluzy

### **Řícení (fall)**

Jedná se o náhlé říťivé pohyby uvolněných bloků horniny ze strmých skalních stěn. Jedná se o pohyb horniny bez kontaktu s terénem.

K těmto pohybům výrazně přispívají činitelé jako zemská tíže, rozpukanost masívu, vítr, voda (led), mráz. Impulsem k řícení může být umělé znestabilnění svahu (podkopání), podemletí vodou nebo i seismické účinky (Záruba, Mencl, 1987).

### **2.3. Průzkum svahových pohybů**

Pokud se v zájmovém území pro nějakou stavbu objeví svahová aktivita, je velmi důležité ji zmapovat a pochopit chování svahových pohybů. Pro účelný a ekonomický návrh zabezpečení svahu je třeba provést podrobný inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum. Ten slouží k bližšímu seznámení s danou lokalitou a usnadní nám pochopení chování svahových pohybů. Průzkum má různé stupně a etapy. Průzkumy se liší samozřejmě také podrobností, dle toho pro jaký účel se provádí. Zcela jiný rozsah průzkumu bude pro rodinný dům na jedné straně a pro např. stavbu dálničního tunelu nebo mostu na straně druhé. Rozsah průzkumu se bude také lišit podle toho, v jakých geologických podmínkách bude budoucí stavba stát. Dobře a podrobně provedený průzkum slouží jako podklad pro projektanta, který se může o data z průzkumu opřít v dimenzování ochranných a sanačních opatření svahových pohybů.

### **2.4. Monitoring svahových pohybů**

Nedílnou součástí inženýrskogeologického průzkumu je také návrh monitoringu důležitých svahových pohybů a délka jeho trvání.

Jestliže chceme dobře porozumět svahovým pohybům, musíme je neustále sledovat. Možností pro jejich monitorování je více. Zde jsou popsány základní principy dvou metod, které jsou často využívány - geodetické metody a inklinometrie.

#### **Geodetické metody:**

Jedna z frekventovaně využívaných metod sledování je geodetické. To je vhodné pro svahové pohyby, jejichž rychlost je větší, než je chyba měření geodetického přístroje. Je nutné vždy vztahovat pohyby k nějakému pevnému bodu, který se nachází mimo sesuvné území. Geodetické měření nám však neposkytne informace o hloubce a průběhu smykové plochy. Její znalost je důležitá zejména pro zvolení vhodného typu a hloubky založení stavebního objektu.

### **Inklinometrie:**

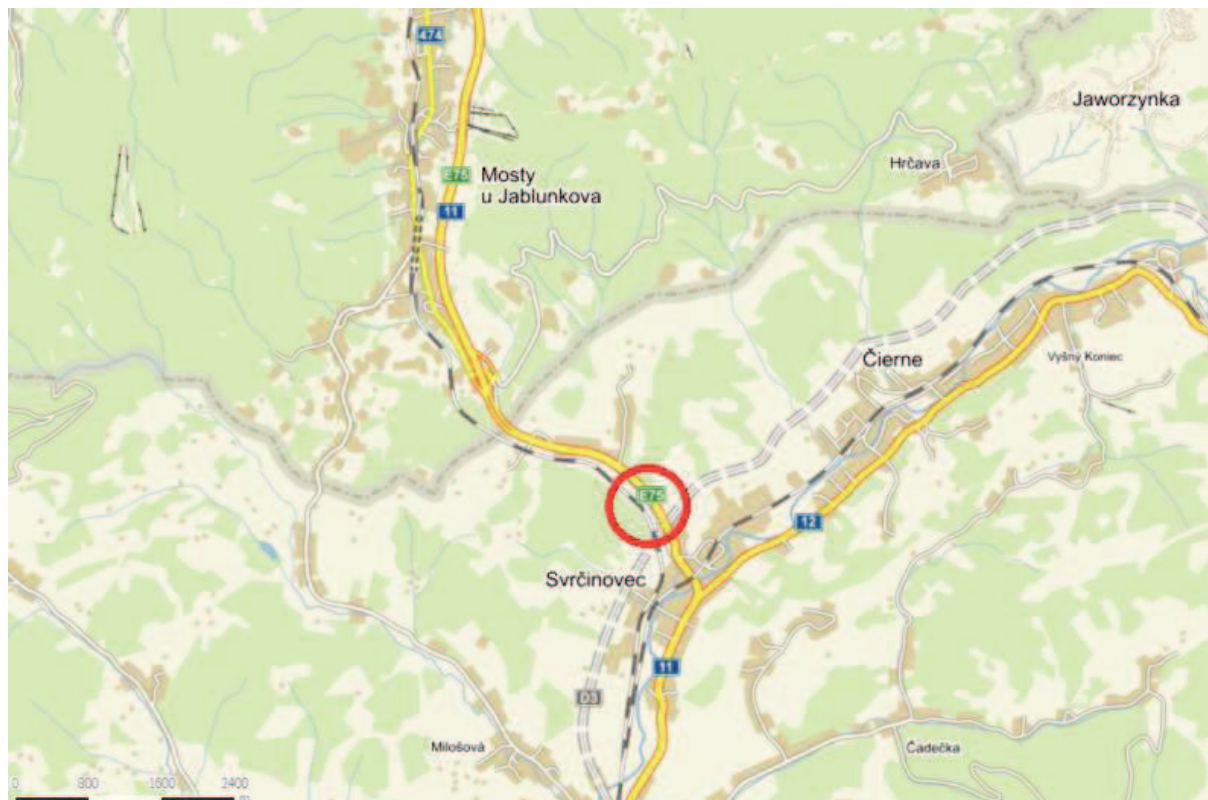
Inklinometrie je metoda, pomocí které dokážeme velmi dobře určit hloubku a průběh smykové plochy aktivního sesuvu. Jedná se o metodu, kdy se provede v místě sesuvu několik vhodně rozmístěných vrtů do hloubky větší, než je předpokládaná hloubka smykové plochy. Vrty se zapaží speciální pažnicí pro inklinometr. Inklinometr je měřicí sonda podlouhlého válcového tvaru, která má kolečka, jež pasují do drážek na vnitřní straně pažnice ve vrtu. Inklinometr je propojen s počítačem. Uvnitř inklinometru jsou náklonoměry. Vlastní inklinometrické měření probíhá tak, že se sonda spustí na dno vrtu a poté se po určené vzdálenosti postupně vytahuje, načež počítač zaznamenává její náklon v daných hloubkách. Po skončení měření se vše vyhodnotí a z grafu se dá celkem přesně určit hloubka smykové plochy a také rychlost pohybu sesuvu v případě, že se proměřuje v určitých časových intervalech. V případě vhodně zvolené orientace pažnice ve vrtu, resp. jejich drážek pro kolečka inklinometru, se dá zjistit i směr sesuvu. Inklinometrie je metoda, která slouží i jako preventivní metoda pro svahy, kde je svahový pohyb nežádoucí, resp. je vyloučen např. opěrnými stěnami a inklinometricky se proměřuje skutečnost, že zde žádný pohyb nevzniká.

Z dalších metod sledování sesuvů je dobré zmínit geofyzikální metody. Spíše se však používají v kombinaci s jinými metodami a slouží jako upřesnění nebo doplnění. Z dalších metod sledování sesuvů lze upozornit na např. letecké snímkování, tzv. LIDAR.

### 3. LOKALIZACE ÚZEMÍ

Zájmové území se nachází na Slovensku v Žilinském kraji, v okrese Čadca, cca 6 km severně od centra města. Lokalita se rozprostírá severozápadně od obce Svrčinovec (obr. 2). Státní hranice s Českou republikou (hraniční přechod Mosty u Jablunkova/Svrčinovec) je od lokality vzdálena necelé 2 km.

Územím prochází trasa rozestavěné slovenské dálnice D3 – úsek Svrčinovec – Skalité v km 0,8. Sesuvné území, na které se zaměřuje tato práce, je tvořeno svahy údolí Šľahorova potoka v délce cca 700 m a šířce cca 350 m. Údolím prochází kromě potoka silnice I/11 (směr ČR) a také železniční trať (Praha – Košice). Rozestavěná dálnice D3 překonává komunikaci, trať i potok stejně jako celé údolí po hlavním dálničním mostě délky 368 m (označení v projektu 237-10). Z hlavního mostu odbočují 2 mosty (237-20 a 237-30) sloužící jako sjezdy z dálnice napojující se na silnici I/11. Šľahorův potok v místě protéká v nadmořské výšce cca 445 - 455 m n. m. Vrchol Košariská s namořskou výškou 618 m n. m. leží cca 1,2 km severně od hlavního dálničního mostu 237 – 10.



Obr. 2: Přehledná situace s vyznačením lokality ([www.mapy.cz](http://www.mapy.cz))

## **4. GEOLOGICKÉ A GEOMORFOLOGICKÉ POMĚRY**

### **4.1. Geomorfologické poměry**

Území náleží do oblasti Západních Karpat podle geomorfologického členění Slovenska (Mazúr, Lukniš, 1980), přičemž sem zasahuje geomorfologický celek – Jablunkovské mezihoří. Reliéf Jablunkovského mezihoří byl vytvořen ve čtvrtohorách periglaciální modelací a říční erozí.

Obecně je charakter území ovlivněný různou odolností jednotlivých litologických typů proti reliéfovým činitelům. Pro oblast, která je tvořena zejména jílovcovým komplexem, jsou charakteristické hladce modelované svahy s táhlými hřebeny. Naopak území, kde se nachází větší podíl pískovcových vrstev, se vyznačuje vyšší energií reliéfu.

Na zájmovém území pro výstavbu daného úseku dálnice je výrazný vliv i eroze říčky Čierňanky a jejích pravostranných přítoků. Z důvodu boční eroze těchto přítoků jsou příčné doliny velmi citlivé na působení svahových faktorů. Jedním z těchto přítoků je i Šľahorův potok, jehož eroze vyformovala údolí, kde je vybudována dálniční křižovatka u obce Svrčinovec.

Svahové deformace různé aktivity jsou patrné v celé trase projektované části dálnice.

### **4.2. Geologické poměry**

Z hlediska geologického členění je zájmové území součástí Vnějších Západních Karpat. Horninové prostředí tvoří magurský tektonický celek. Ten je zde zastoupený račanskou litofaciální tektonickou jednotkou, a to zlínským souvrstvím. Zájmové území je v rámci zlínského souvrství tvořené vsetínskými vrstvami (Potfaj, 2003). Vsetínské vrstvy jsou charakteristické převahou hrubých vrstev lasturnato odlučných jílovců s lavicemi jemno až střednězrnných pískovců s glaukonitem. Převládající směr vrstev je SV – JZ se sklonem 30° – 75° k JV (Pánek a kol., 2001).

Skalní výchozy předkvartérních litologických typů jsou pouze ojedinělé a jsou většinou překryté kvartérním pokryvem. Ten však z hlediska geneze a typologie není moc pestrý. Majoritní jsou deluviální sedimenty, fluviální jemnozrnné a šterkovité zeminy. Ojediněle zde můžeme nalézt proluviální a antropogenní sedimenty.



Horninové prostředí je porušené zlomy SZ – JV a SV – JZ směru se šikmým průběhem ve vztahu k směru hlavních struktur. Z hlediska neotektonických pohybů je území charakterizované zdvihem (Potfaj, 2003).



*Obr. 3: Ilustrační foto: Jílovec ze zájmové oblasti (vlastní dokumentace)*

## **5. HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY**

Litologické složení hornin je hlavním faktorem, který ovlivňuje hydrogeologické poměry v zájmovém území. Dalšími faktory jsou morfologické poměry, tektonika území a klimatické poměry.

Podle hydrogeologické rajonizace Slovenska (Šuba et. Al., 1984) se na území trasy dálnice D3 vyčleňují dva hydrogeologické rajóny. Rajón paleogénu a rajón kvartéru. Oba se od sebe hydrogeologickými podmínkami liší.

### **5.1. HYDROGEOLOGIE PALEOGÉNU**

Z hlediska hydrogeologie je oblast flyše značně anizotropní. To je způsobeno vrstvitým charakterem horninového prostředí, kdy je propustnost kolmo na vrstvy zcela minimální. Výjimku tvoří výrazně pískovcová souvrství bez jílovcových vrstev. Dalším

činitelem způsobujícím anizotropii je způsob uložení vrstev. V některých místech jsou ve zlínském souvrství vrstvy uloženy poměrně horizontálně, tudíž zde lze očekávat nižší propustnost. K lepší propustnosti přispívá tektonické porušení hornin (Hanzel, in Potfaj, 2003).

Flyšové prostředí má velmi malou puklinovou propustnost a nízké zvodnění. V případě, že se souvrství skládá zejména z jílovcových vrstev, pak je toto prostředí prakticky nepropustné a jedná o charakter hydrogeologického izolátoru. Mnohem příznivější hydrogeologické poměry jsou v souvrstvích, kde jsou zastoupeny zejména pískovce. Takové prostředí má značnou puklinovou propustnost a vyznačuje se dobrým zvodněním.

Z výše zmíněných faktů je zřejmé, že flyšové prostředí není ideální pro větší akumulaci a oběh podzemních vod. Výraznější v tomto ohledu je jen přípovrchové pásmo rozvolnění hornin a zvětralinový plášť. Zóna rozvolnění zasahuje obvykle do hloubek 20 – 40 m a probíhá konformně s povrchem terénu. Propustnost se s narůstající hloubkou snižuje.

Průměrné hodnoty hydraulické vodivosti magurského flyše jsou podle literatury odhadnuty na řádově  $10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup> pro vsetínské vrstvy. Vyšší propustnost je však v přípovrchové zóně zvětrávání (cca 35 – 90 m pod povrchem), kde nejvyšší hodnoty dosahují hydraulické vodivosti  $k = 5,6 \cdot 10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup> (Hanzel, in Potfaj, 2003).

## **5.2. HYDROGEOLOGIE KVARTÉRU**

Hlavním faktorem, který určuje hydrogeologický význam kvartérních sedimentů, je jejich porozita. Dobrou pórovou propustností a zvodněním se vyznačují fluviální štěrky údolních niv, pokud nejsou zahliněné. Bývají trvale zvodnělé. Koeficient hydraulické vodivosti zde dosahuje  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup> v závislosti na obsahu jemnozrnných částic. Ve štěrcích hladina podzemní vody koresponduje s hladinou povrchových toků. Malou pórovou propustností, a tedy i malým zvodněním, se vyznačují proluviální sedimenty.

Relativně vysoké zvodnění se projevilo ve fluviálních sedimentech řeky Čierňanky, kde se měrná vydatnost pohybovala v průměru  $1,3 - 2,0$  l.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup> (Hanzel, in Potfaj, 2003).

Na území trasy slovenské dálnice D3 Svrčinovec – Skalité jsou nejvíce rozšířené deluviální jílovité a kamenito – jílovité až jílovito – kamenité sutě. Tyto kvartérní sedimenty

mají velmi malou pórovou propustnost, prakticky jsou nepropustné a z hydrogeologického hlediska jsou tedy nevýznamné.

Významnější jsou v území sedimenty sesuvných deluvií. Podzemní voda, která hraje nemalou roli ve svahových deformacích, je povrchového původu a do horninového prostředí se dostává infiltrací srážkových vod. Často se stává, že polohy, které mají schopnost se zavodnit, jsou směrem po svahu uzavřené nepropustnými vrstvami. Vytváří se tak bezodtoké deprese, které se v případě vydatnějších srážek naplní vodou a významně snižují stabilitu svahů. V případě sesunutí se poté uvolní velké množství vody. V sesuvných deluviích se objevují na různých místech prameny, které mají vlastní režim. Jedná se většinou o vodonosné horizonty se statickými zásobami, které přímo závisí na atmosférických srážkách. Vliv podzemní vody je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících svahové pohyby.

Ustálená hladina podzemní vody se v lokalitě pohybuje v rozmezí 0,3 až 11,5 m. Informace o hladině podzemní vody jsou získané z provedených vrtů v rámci průzkumu pro stavbu dálnice. Hladina podzemní vody je různá v rámci svahu. Blízko potoka je v minimální hloubce, výše ve svahu je zaklesnutá hlouběji.

## 6. KLIMATICKÉ POMĚRY OBLASTI

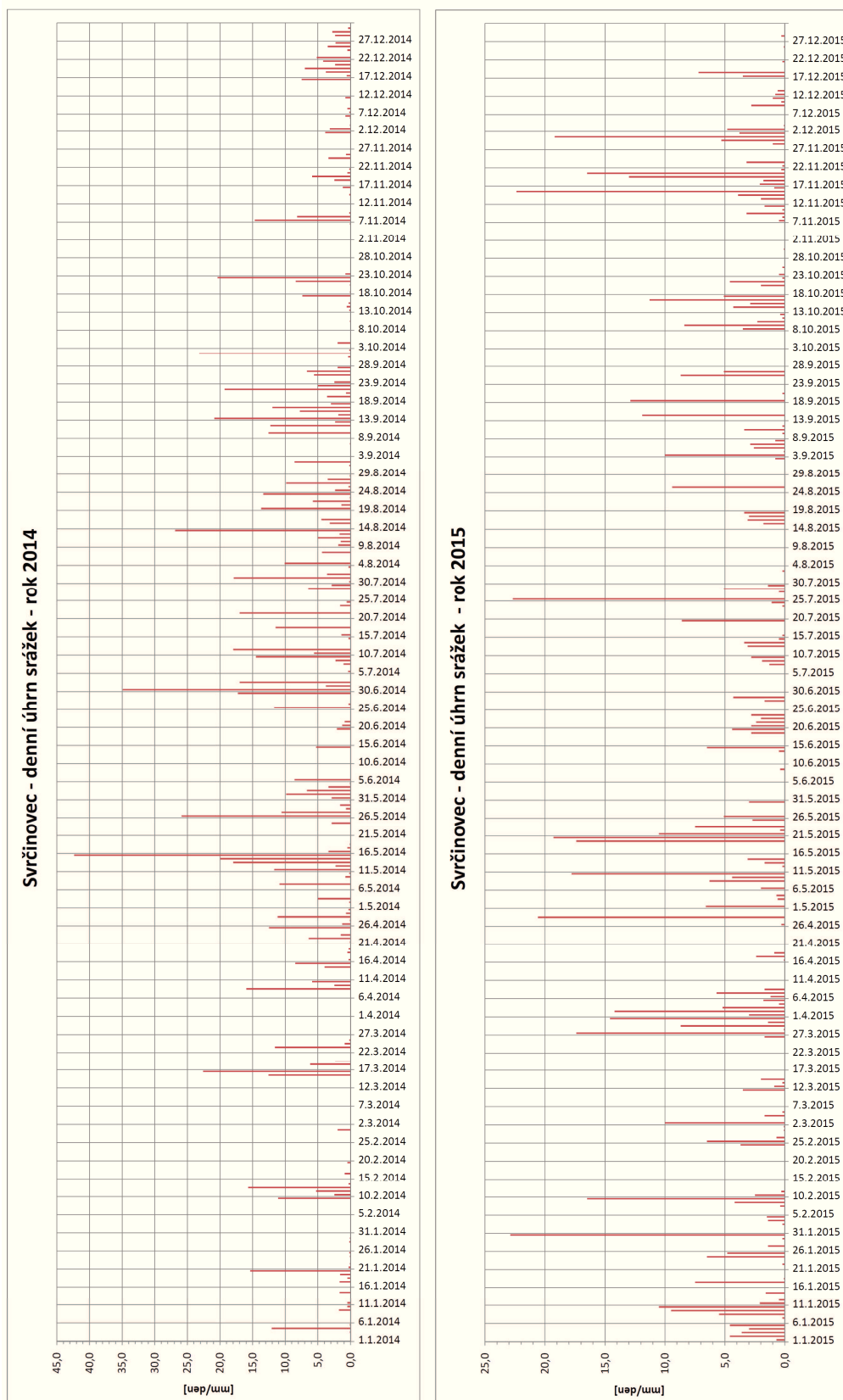
Území v okolí Svrčinovce spadá podle Mapy klimatických oblastí ČSSR (Quitt, 1971) do chladné klimatické oblasti CH 7.

Pro oblast CH 7 je charakteristické krátké léto, které je mírně chladné a vlhké. Jaro a podzim jsou mírné a chladné a trvají dlouhou dobu. Zima je velmi dlouhá, mírná, mírně vlhká s dlouhým obdobím se sněhovou pokrývkou.

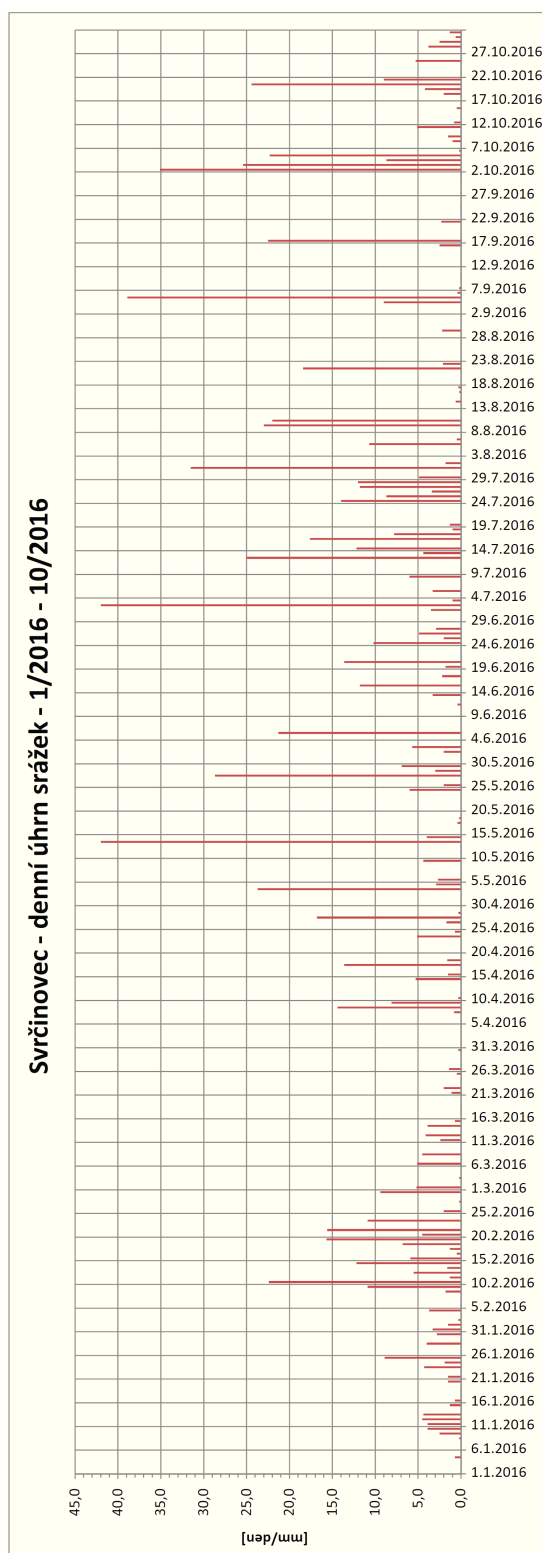
### Klimatické charakteristiky oblasti CH 7

Počet letních dní	10 - 30
Počet dní s teplotou 10°C a víc	120 - 140
Počet mrazových dní	140 - 160
Počet ledových dní	50 - 60
Průměrná teplota v lednu	-3°C až -4°C
Průměrná teplota v červenci	15°C až 16°C
Průměrná teplota v dubnu	4°C až 6°C
Průměrná teplota v září	6°C až 7°C
Průměrný počet dní se srážkami 1 mm a víc	120 - 130
Srážkový úhrn ve vegetačním období [mm]	500 - 600
Srážkový úhrn v zimním období [mm]	350 - 400
Počet dní se sněhovou pokrývkou	100 - 120

*Tab. 1: Klimatické charakteristiky oblasti CH 7*



Obr. č. 4 a 5: Denní úhrn srážek ve Svrčinovci za rok 2014 a 2015 (vlastní zpracování v programu Excel, zdroj dat: [www.shmu.sk](http://www.shmu.sk))



Obr. č. 6: Denní úhrn srážek ve Svrčinovci za rok 2016 (vlastní zpracování v programu Excel, zdroj dat: [www.shmu.sk](http://www.shmu.sk))

## 7. POPIS STUDOVANÉHO PROBLÉMU

Jak již bylo nastíněno v úvodu, diplomová práce se zaměřuje na okolí počáteční části budoucího se úseku slovenské dálnice D3 – Svrčinovec – Skalité (aktuální k době vzniku diplomové práce). Téma diplomové práce je lokalizováno do prostoru začátku tohoto úseku, kde se buduje systém mostů v relativně náročném terénu, který se nazývá „Křižovatka Svrčinovec“.

Celá trasa dálnice je vedena po pravém břehu říčky Čierňanky, která je levostranným přítokem řeky Kysuce. Čierňanka protéká údolím, oba její břehy jsou tedy svažité. Rozmanitost území, avšak i komplikace pro stavbu dálnice představují další údolí tvořená pravostrannými přítoky Čierňanky. Jedním z takovýchto údolí je i údolí Šľahorova potoka a stává se tak hned první relativně komplikovanou překážkou pro vedení dálnice.

Jelikož údolí Šľahorova potoka naskýtá jednu z mála možností v kopcovité až hornaté oblasti, kudy vést komunikace ze Slovenska do České republiky, nachází se v údolí kromě koryta Šľahorova potoka i silnice I/11 z Čadci (SK) do Jablunkova (ČR), která je vedena po levém břehu potoka. Po pravém břehu je pak veden mezinárodní železniční koridor Praha - Košice.

Bylo rozhodnuto, že přes údolí bude vybudován dálniční most. V rámci propojení stávající komunikace I/11 a nové dálnice jsou v místě vystavěny ještě další dva mostní objekty sloužící jako sjezd, resp. nájezd na dálnici. Pro potřeby diplomové práce jsou mosty označeny jako „hlavní dálniční most“, „jižní“ a „severní most“ (viz obrázek č. 7)

Podle archivních dokumentů a inženýrskogeologického průzkumu bylo zjištěno, že svahy údolí Šľahorova potoka jsou na mnoha místech nestabilní. V oblasti jsou evidentní jevy provázející svahové pohyby jako je typická zvlňenost terénu, někde jsou znatelné odlučné hrany a v celé oblasti lze pozorovat tzv. „opilý les“. Tato skutečnost silně ovlivnila projekční práce a přístup k problému.

Mosty jsou navrženy jako vícepolové konstrukce uložené na pilíře. Založení pilířů je hlubinné na pilotách, jež jsou vetknuty do skalního podkladu. Základy některých pilířů jsou z boku přítěžovány mimo přirozený zemní tlak navíc tlakem, který je generován sesuvnými hmotami. Intenzita těchto sil je různá.

Před zahájením stavby byl proveden důkladný inženýrskogeologický průzkum, který sloužil jako podklad pro projektanta mostních objektů, resp. geotechnických ochranných konstrukcí.

Tato diplomová práce se zabývá inženýrskogeologickými poměry širšího okolí a stabilitní analýzou sesuvných zemin, které zasahují do výstavby dálnice, případně mohou ohrozit stávající železniční koridor.



Obr. 7: Přehledná situace s vyznačenými dálničními mosty ([www.maps.google.com](http://www.maps.google.com))



## 8. SESUVNÉ ÚZEMÍ SVRČINOVEC

Geologická stavba území v okolí obce Svrčinovec (údolí Šľahorova potoka i říčky Čierňanky) je velmi příznivá pro svahové pohyby. Jedná se zejména o svahové pohyby sesuvných deluvií. Ty se sesouvají po smykových plochách, které vznikají na rozhraní předkvartérního podkladu a kvartérního pokryvu. Četné svahové pohyby přinášejí komplikace pro stavbu dálnice ve velké části její trasy. V diplomové práci jsem se zaměřil na chování části svahu údolí Šľahorova potoka, která je bezprostředně dotčena stavbou dálničních mostů a jejího nejbližšího okolí.

Již při základní rekognoskaci terénu je patrné, že svahy obou břehů potoka vykazují pohyby. Na svazích jsou typické projevy svahových pohybů jako je zvlněnost terénu, „opilý les“, nebo i odlučné hrany, případně akumulční oblasti.

V rámci diplomové práce byly laboratorně analyzovány 2 vzorky, které byly odebrány v sesuvných deluviálních sutích svahu nad železniční tratí, nad „severním mostem“. Tento svah byl v rámci inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu dálnice vymapován jako potenciální sesuv. Podle typických jevů, které doprovází svahové pohyby, je zřejmé, že svah je v pohybu. Tento pohyb má pravděpodobně creepový charakter. Při mapování území pro sestavení inženýrskogeologické mapy, nebyla nad svahem nalezena žádná odlučná hrana. Vše tedy nasvědčuje skutečnosti, že doposud nedošlo k sesunutí svahu ve smyslu rychlého sesuvného pohybu, při kterém by byla mobilizována kritická pevnost zemin svahu.

V „sousedství“ svahu na severozápadě však byly v rámci mapovacích prací nalezeny dvě odlučné hrany sesuvů. Vzhledem k přítomnosti těchto starších sesuvů v těsné blízkosti analyzovaného svahu a velmi podobnému sklonu i morfologii celého svahu lze predikovat reálné riziko aktivace sesuvného potenciálu této části svahu. Případným sesunutím je ohrožena zejména železniční trať, která vede v patě svahu. Dálniční most, který vede pod tratí a následně jí křížuje, je založen na velkopřůměrových pilotách do skalního podkladu. Základy mostních pilířů jsou obestavěny pilotovými stěnami, které absorbují tlak a případné deformace generované tlakem sesuvných hmot.

Svah je orientován na severovýchod. Generelní sklon je 14 - 17°. Začíná se zvedat od pravého břehu Šľahorova potoka z nadmořské výšky 455 m až na elevaci, která je v nadmořské výšce 580 m. Spodní část svahu prošla značnými antropogenními úpravami (zářezy pro mostní pilíře, pilotové stěny okolo pilířů, těleso železnice, celkové terénní úpravy

atd.). Ve svahu nad mostem je planina, která dále přechází ve vzrostlý les. Les začíná v nadmořské výšce cca 490 m a zájmová část svahu je jím porostlá až na elevaci. Les pokračuje i dále na sever. Směrem na jih se pak rozprostírají louky, které zasahují až k obci Svrčinovec.



*Obr. 8 (vlevo): Spodní část zájmového svahu (mezi železnicí a potokem) před započítáním stavby mostu (Pontex, s.r.o.)*

*Obr. 9 (vpravo): Vyznačená zájmová část svahu (www.maps.google.com)*

## 9. MAPOVÁNÍ

Pro účely diplomové práce bylo provedeno zmapování inženýrskogeologických poměrů v území, které náleží prostoru, kde se buduje křižovatka Svrčinovec a nejbližšího okolí. Z geografického hlediska se jedná o území od severozápadní hranice obce Svrčinovec směrem ke státní hranici s Českou republikou – údolí Šlahorova potoka a přilehlé svahy. Celá zmapovaná oblast má výměru cca 0,7 km<sup>2</sup>.

Mapu inženýrskogeologických poměrů jsem vytvářel v rámci osobních návštěv lokality. Celkem jsem lokalitu navštívil třikrát v letech 2015 a 2016. V rámci první návštěvy jsem se zaměřil na všeobecné seznámení s terénem, jeho geologií a morfologií. V rámci této návštěvy jsem také provedl odběr vzorků zemin, z nichž byly později dva použity pro laboratorní analýzu.

Druhou a třetí návštěvu jsem věnoval inženýrskogeologickému mapování. Kdy jsem kladl pozornost pokryvným útvarům a případným výchozům předkvartérního podkladu. Pozornost byla také věnována prameništím a jejich vymapování a zakreslení do mapy.

Samotná mapa byla sestavena na základě vlastních dokumentačních bodů, kterých je 40 (DB1 – 40). Velkým přínosem pro zpřesnění mapy byly průzkumné vrty, které byly součástí inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu dálnice. Na základě vrtů byl určen zejména předkvartérní pokryv daného území a dále mocnosti kvartérních sedimentů.

Mapování bylo prováděno do topografického podkladu státní odvozené mapy. Území se nachází na rozhraní listů Čadca 4–1 a 5–1. Výsledná mapa inženýrskogeologických poměrů byla zpracována v programu AutoCad 2016 a je uložena jako příloha této práce. Nedílnou součástí mapy je legenda a mapa dokumentačních bodů včetně archivních vrtů provedených v rámci průzkumu pro stavbu dálnice. U těchto vrtů bylo ponecháno původní označení převzaté z průzkumu. Vlastní dokumentační body (DB1 – 40) byly popsány a spolu s jejich fotodokumentací jsou uloženy taktéž v přílohách.

Při mapování jsem se v terénu zaměřoval zejména na skalní výchozy, zářezy, antropogenní navážky. Zmapována byla také všechna prameniště. Zvláštní pozornost jsem věnoval jevům spojeným se svahovými pohyby. K dispozici jsem měl mapu s vyznačenými sesuvy, která byla součástí průzkumu pro stavbu dálnice. V souladu s touto mapou jsem ověřoval přítomnost odlučných hran a dalších sesuvných jevů.

## 10. LABORATORNÍ PRÁCE

Cílem laboratorních prací bylo zjistit základní mechanické vlastnosti vybraných vzorků zemin. Laboratorním zkouškám byly podrobeny 2 vzorky zemin odebrané v zájmové lokalitě.

Veškeré laboratorní práce byly prováděny v laboratoři mechaniky zemin na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Při provádění prací bylo postupováno v souladu s platnými normami.

V první fázi zkoušek bylo potřebné zatřídit a pojmenovat dané zeminy. Byly proto provedeny zkoušky na určení zrnitostní křivky a zkoušky na určení konzistenčních mezí. Následně byly zeminy pojmenovány a zatříděny.

Druhá fáze laboratorních zkoušek byla zaměřena na určení pevnosti zemin. Cílem bylo zjistit kritickou a reziduální pevnost na daných vzorcích zemin. K tomuto účelu byl použit translační a rotační smykový přístroj. Smykové zkoušky byly následně vyhodnoceny.

### 10.1. VZORKY PRO LABORATORNÍ PRÁCE

V rámci první návštěvy zájmové oblasti dne 20. 7. 2015 jsem se zaměřil na odběr vzorků zemin v místech, která byla v rámci inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu dálnice vymapována jako nestabilní. Celkově jsem odebral na osmi místech po jednom vzorku zeminy. Odběr byl proveden pomocí vojenské lopaty. Zeminy byly uloženy do igelitových pytlů. Každý vzorek vážil cca 4 – 6 kg.

Po následné konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem se rozhodl, že pro laboratorní analýzu zjišťování smykových pevností zemin použiji dva vzorky. Tyto vzorky byly odebrány z části svahu, která byla v rámci průzkumu pro stavbu dálnice označena jako potenciálně sesuvná. V případě aktivního sesunutí by ohrozila železniční trať pod svahem a také „severní most“ dálniční křižovatky.



Obr. č. 10 a 11: Místo odběru vzorku č. 1 (vlevo) a vzorku č. 2 (vpravo) (vlastní dokumentace)



Obr. č. 12: Vyznačená zájmová část svahu s místy odběru vzorků (www.maps.google.com)

## **10.2. STANOVENÍ KŘIVKY ZRNITOSTI**

Jako první laboratorní práce jsem provedl zrnitostní zkoušku s cílem určit křivku zrnitosti obou vzorků zemin. Zkouška byla prováděna podle ČSN CEN ISO/TS 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin. V souladu s touto normou musí být zrnitostní rozbor proveden kombinací prosévání a sedimentace v případě, že je více než 10 % zrn zeminy menšího průměru než 0,063 mm. Norma dále předepisuje, že je nutné pracovat s reprezentativním vzorkem o hmotnosti přibližně 30 g.

Hmotnost vzorku byla zjišťována nepřímo na základě vlhkosti. Každý vzorek určený pro zrnitostní rozbor jsem rozdělil na část vzorku o předepsané hmotnosti cca 30 g a menší část o hmotnosti cca 10 g. Obě části byly zváženy ve stejném okamžiku. Jejich vlhkost byla v tomto okamžiku totožná. Vlhkost byla následně vypočítána z menší části vzorku, který byl vysušen a následně zvážen. Poté byla dopočítána hmotnost suché frakce ve vzorku pro rozbor zrnitosti. Kdyby byl vysušován přímo vzorek určený k zrnitostní analýze, mohlo by dojít ke zkreslení křivky zrnitosti v oblastech malých částic. Ty mohou vlivem působení vysokých teplot v sušičce projít změnami.

Křivka zrnitosti byla pro každý zkušební vzorek vytvořena na základě naměřených dat v programu Excel a obě křivky jsou přiloženy na konci této kapitoly (obr. 14).

### **Příprava vzorku**

Při přípravě vzorku pro určení křivky zrnitosti byl vzorek nejdříve rozdružen v misce. Následně byla přidána destilovaná voda a dispergační činidlo (vodní sklo). V dispergačním činidle byl vzorek ponechán 24 hodin. Vzorek byl následně s pomocí destilované vody proceděn přes síto o velikosti ok 0,063 mm a tím byl rozdělen na 2 části – frakce o velikosti zrn větší než 0,063 mm a frakce o velikosti zrn menší než 0,063 mm. První zmíněná frakce byla vysušena v sušárně a následně na ní byla provedena prosévací zkouška. Druhá frakce byla podrobena hustoměrné zkoušce.

### **Prosévací zkouška**

Při prosévací zkoušce byl vzorek o velikosti zrn větších než 0,063 mm proséván přes kolonu normovaných sít o velikosti ok 2, 1, 0,5, 0,2 a 0,125 mm. Síta byla na sebe naskládána

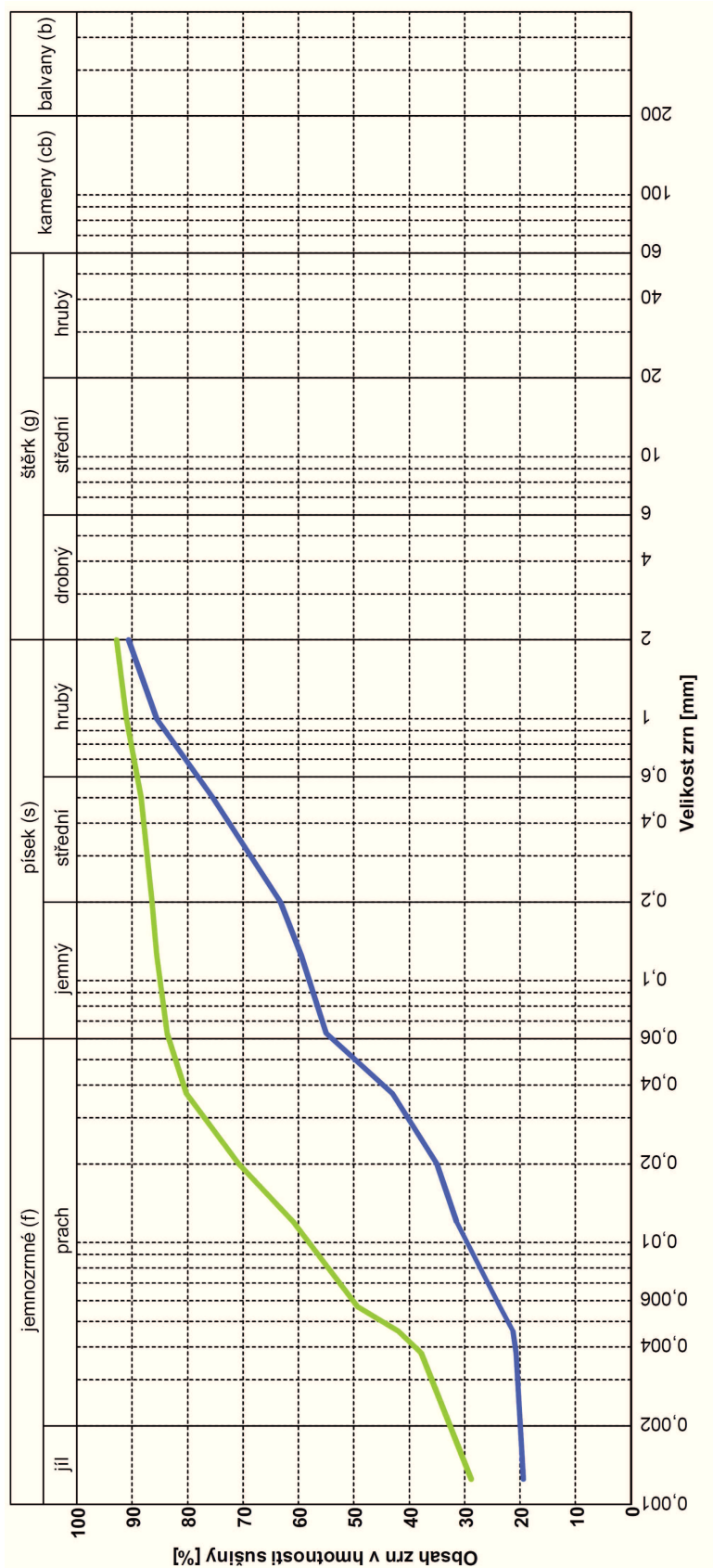
tak, že síto s největším průměrem ok bylo nejvýše. Jak byl materiál postupně proséván odshora dolů, na každém síti se usadilo určité množství materiálu, které bylo následně zváženo. Následně byl vyčíslen procentuální podíl každého zůstatku na síti (dané frakce) z celkové hmotnosti vzorku, tj. celého vzorku připraveného pro prosévací i hustoměrnou zkoušku. Takto byla určena křivka zrnitosti nad hranicí 0,063 mm.

### **Hustoměrná zkouška**

Pro získání křivky zrnitosti pod hranicí 0,063 mm posloužila hustoměrná zkouška. U této zkoušky je zaznamenávána změna hustoty suspenze v čase. Princip je založen na Stokesově zákoně o rozdílné rychlosti sedimentace pevných částic. Druhá část vzorku, která byla určena od prvotního rozdělení pro hustoměrnou zkoušku tím, že „propadla“ sítem o velikosti ok 0,063 mm byla umístěna do odměrného válce o objemu 1 litr. Roztok byl doplněn destilovanou vodou tak, aby celkový objem suspenze byl právě 1 litr. Zkouška byla prováděna v místnosti, kde je udržována stálá teplota 20°C. Po důkladném promíchání suspenze byl do válce vložen hustoměr. Od okamžiku ponoření hustoměru do suspenze byl sledován čas a byly odečítány hodnoty na stupnici hustoměru po 90 s, 5 a 15 min, 1, 2, 4 a 24 hod. Po provedení hustoměrné zkoušky byl k vyhodnocení použit Casagrandeho nomogram. Z něho jsem získal hodnoty průměrů částic, k nimž jsem následně dopočítal procentuální podíl v rámci celého vzorku. Tím jsem získal průběh křivky zrnitosti pod hranicí 0,063 mm.



*Obr. č. 13: Průběh hustoměrné zkoušky (vlastní dokumentace)*



Vzorek	Obsah frakce [%]					
	f	s	g	cb	b	
1	83,7	9,1	7,2	0,0	0,0	0,0
2	55,0	35,6	9,4	0,0	0,0	0,0

Obr. č. 14 a tab. č. 2: Výsledné křivky zrnitost a procentuální zastoupení jednotlivých frakcí



### 10.3. STANOVENÍ KONZISTENČNÍCH MEZÍ

Pro zařídění a pojmenování vzorků zemin bylo dále nutné zjistit jejich konzistenční meze, též zvané Atterbergovy. Zkoušky byly prováděny podle ČSN CEN ISO/TS 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí. Konzistenční meze se určují u jemnozrnných zemin, protože ovlivňují jejich chování. Představují přechod mezi tekutým, plastickým a pevným stavem zeminy.

V rámci této kapitoly laboratorních prací byly určeny tyto vlastnosti zemin:

- **mez tekutosti -  $w_L$**   
– empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického
- **mez plasticity -  $w_P$**   
– empiricky stanovená vlhkost, při které je zemina natolik vysušená, že ztrácí svoji plasticitu
- **index plasticity -  $I_P$**   
– početní rozdíl mezi mezí tekutosti a mezí plasticity zeminy:  $I_P = w_L - w_P$
- **index koloidní aktivity jílu -  $I_A$**   
– poměr indexu plasticity k podílu jílovité frakce zeminy

#### **Stanovení meze tekutosti**

K určení meze tekutosti, tedy takové vlhkosti, při které přechází zemina ze stavu plastického do stavu tekutého, se určuje empiricky pomocí kuželové zkoušky, která je popsána v ČSN CEN ISO/TS 17892-12.

Pro zkoušku bylo připraveno cca 300 g zeminy ze vzorku, která byla proseta přes síto o velikosti ok 0,4 mm. Ke zkoušce byl použit kalibrovaný penetrační kužel o parametrech 60g/60°. Kuželem byla penetrována zemina připravená a zarovnaná v misce tak, aby nebyla promíchána se vzduchem. Po 5ti sekundách bylo provedeno odečtení na stupnici – penetrace musela být v rozsahu 7 – 15 mm. Na každém vzorku byla provedena 4 měření. Při každé penetraci byla odebrána část vzorku, z níž byla zjištěna vlhkost pro daný penetrační pokus. Následně byly výsledky vyneseny do grafu (závislost vlhkosti na penetraci). Byla jimi proložena lineární spojnice trendu, díky které byla zjištěna vlhkost při penetraci 10 mm, což odpovídá právě vlhkosti na mezi tekutosti.

### Stanovení meze plasticity

K určení meze plasticity, tedy takové vlhkosti, kdy je zemina tak vysušená, že ztrácí plasticitu, se zjišťuje empiricky za pomoci vytváření válečků. Postup je popsán v ČSN CEN ISO/TS 17892-12.

Pro provedení zkoušky byl použit vzorek zeminy o hmotnosti cca 20 g. Použita byla stejně upravená zemina jako pro určení meze tekutosti, tedy proseta přes síto o velikosti ok 0,4 mm. Vzorek byl vysušen v pokojové teplotě do takové míry, až z něj bylo možné vytvořit kuličku. Následně se z malých částí vyválely válečky pomocí dlaně a desky za konstantního tlaku a rychlosti do té doby, než dosáhly průměru 3 mm. Pokud se na válečku začaly vytvářet trhliny v rozestupech cca 1 cm, pak vlhkost válečku byla právě na mezi plasticity. V tomto případě se váleček co nejrychleji vložil do uzavíratelné váženky, zvažil a dal vysušit. Postup byl opakován třikrát pro každý vzorek, přičemž pro každý vzorek byl určen průměr z vlhkostí, a tak byla určena mez plasticity pro daný vzorek.

		Atterbergovy meze			
	Vzorek	mez tekutosti $w_L$ (%)	mez plasticity $w_p$ (%)	Index plasticity $I_p$ (-)	index kol. aktivity jílu $I_A$ (-)
	1	49,5	28,4	21,1	0,7
	2	48,8	25,5	23,3	1,2

Tab. č. 3: Výsledné Atterbergovy meze

### Pojmenování a zatřídění zemin

Zatřídění vzorků zemin bylo provedeno podle platných norem ČSN EN ISO 14688 – 1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis a podle normy ČSN 73 6133 .Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací.

Vzorek		Zatřídění dle ČSN 14 688 - 1 (72 0003)	Zatřídění dle ČSN 73 6133	
	1	clSi	Hlína se střední plasticitou	F5 (MI)
	2	clSi	Jíl písčítý	F4 (CS)

Tab. č. 4: Zatřídění zemin

## 10.4. STANOVENÍ PEVNOSTI ZEMIN

### 10.2.1 Teoretické základy

Pevnost zeminy je podle Atkinsona (2007) nejvyšší možné napětí, které zemina dokáže přenést před tím, než dojde k jejímu porušení.

Pro zeminy jsou definována dvě hlavní kritéria porušení. První se nazývá Trescovo kritérium (Tresca criterion) (obr.15), a říká, že materiál zkolabuje pokud se Mohrova kružnice napětí dotkne obálky pevnosti, která je dána vztahem (1)

$$\tau_f = s, \quad (1)$$

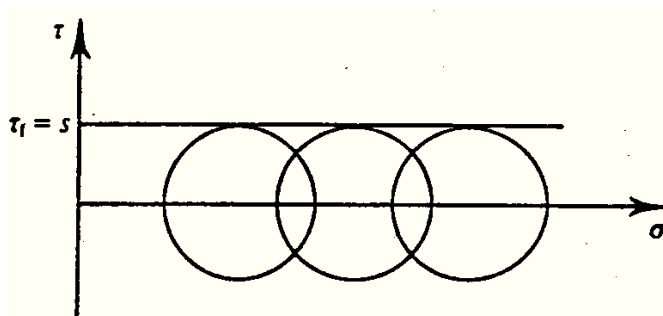
kde je  $s$  definováno jako smyková pevnost materiálu.

Druhé kritérium porušení se nazývá Mohr – Coulombovo (Mohr – Coulomb criterion) (obr. 16). To říká, že pevnost narůstá lineárně s nárůstem normálního efektivního napětí a k porušení materiálu dojde v momentě, kdy se Mohr – Coulombova kružnice dotkne obálky pevnosti, která je dána vztahem (2)

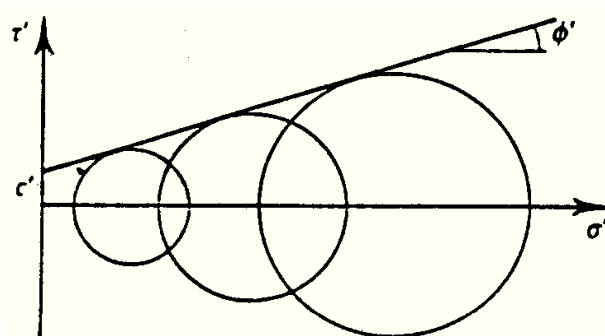
$$\tau_f' = c' + \sigma' \tan \phi', \quad (2)$$

kde  $\phi'$  se nazývá vnitřní úhel tření a  $c'$  je soudržnost. Jedná se o efektivní parametry zemin.

Většina zemin má  $c' = 0$ , tudíž pokud  $\sigma' = 0$  zemina nemá žádnou pevnost.



Obr. 15: Trescovo kritérium porušení  
(Atkinson, 2007)



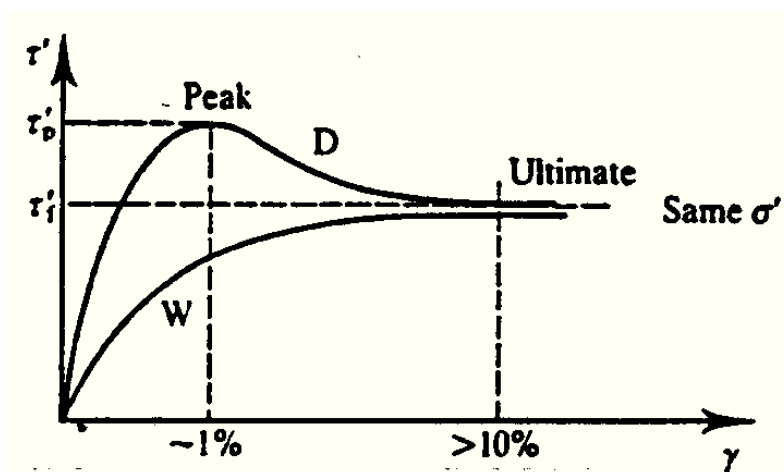
Obr. 16: Mohr - Coulombovo kritérium porušení  
(Atkinson, 2007)

## Vrcholová pevnost

Vrcholovou pevností se rozumí maximální smykové napětí, které může zemina přenést. Není parametrem zeminy, jelikož je závislá na stavových veličinách jako je ulehlost (u hrubozrnných zemin) nebo stupeň překonsolidace u jemnozrnných zemin.

U překonsolidovaných zemin stoupá smykové napětí do úrovně vrcholové pevnosti, kde dosáhne maxima a dále klesá na úroveň, která se nazývá kritická pevnost. Kypřé zeminy nedosáhnou vrcholové pevnosti. Jejich smykové napětí stoupá až na maximum, tedy na kritickou pevnost, bez toho, že by dosáhly nějakého vrcholu.

Toto je dáno tím, že u překonsolidovaných zemin je potřeba navíc energie na tzv. dilatanci, což je zvýšení objemu potřebné k tomu, aby mohlo dojít ke smyku. Překonsolidované zeminy mají zrna uspořádána tak ideálně, že jsou do sebe zaklesnutá. Je tedy nutné, aby se zrna přeskládala tak, že může dojít ke smyku. Naopak kypřé zeminy nedilatují, protože jejich zrna nejsou do sebe zaklesnuta.



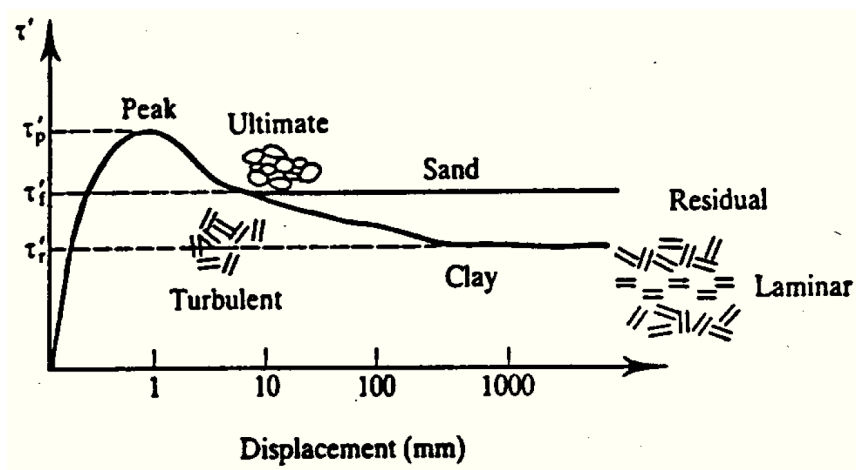
Obr. 17: Průběh smyku kypřé a ulehlé zeminy (Atkinson, 2007)

## Kritická pevnost

Kritická pevnost je parametr daný pro každou zeminu. Nezáleží na ulehlosti, překonsolidaci, či kyprosti zemin. Kritická pevnost je limitní hodnota smykového napětí, do kterého zemina vždy dospěje při dostatečně dlouhém smýkání. Na smykové ploše dojde k turbulentnímu tečení. V tomto stavu má zemina tzv. kritickou pórovitost, což je pórovitost, při které zemina nemění svůj objem, tedy ani nedilatuje, ani nekontrahuje, úhel dilatance je tak rovný nule. Pro dosažení kritické pórovitosti tedy kyprá zemina svoji pórovitost snižuje, naopak ulehlá zemina ji zvětšuje (dilatuje). Kritická pevnost je konečnou pevností jen pro hrubozrnné zeminy.

## Reziduální pevnost

Jak již bylo zmíněno výše, kritická pevnost je konečná pouze pro hrubozrnné zeminy. Jemnozrnné zeminy, které obsahují ploché jílové minerály, se při dostatečně dlouhém smýkání dostávají do stavu, kdy dochází k laminárnímu uspořádání těchto minerálů na potenciální smykové ploše a vzájemně se po sobě smýkají (obr. 18). Reziduální pevnost je nejmenší smyková pevnost, kterou mohou materiály přenést. Pro hrubozrnné zeminy s „kulatými“ zrnky je tedy kritická a reziduální pevnost totožná. V jílech může být reziduální pevnost jen 50 % kritické. Tato skutečnost je důležitá při návrhu staveb v sesuvných územích.

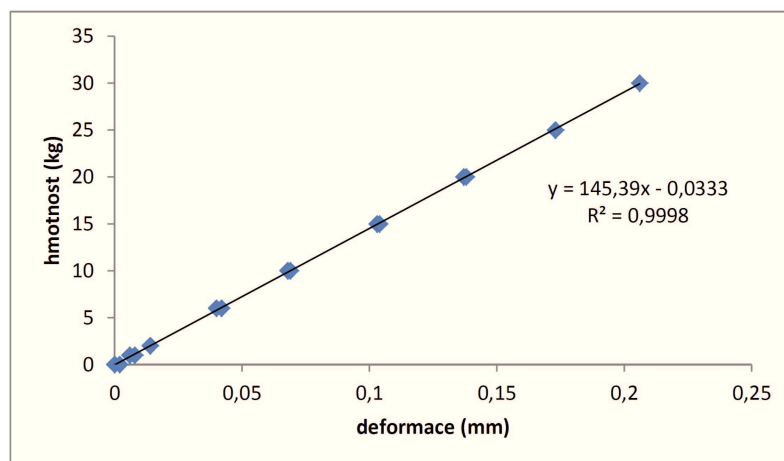


Obr. 18: Kritická a reziduální pevnost zemin (Atkinson, 2007)

### 10.2.2 Příprava vzorků a přístrojů pro smykové zkoušky

Cílem laboratorních zkoušek bylo určit kritickou a reziduální pevnost zemin. Pro tyto zkoušky bylo potřeba vytvořit rekonstituované vzorky. Příprava rekonstituovaného vzorku probíhá tak, že se zemina po prvotním mechanickém rozdužení zaleje přiměřeným množstvím destilované vody a po několika hodinách se rozmíchá. Výsledná kaše se prosévá přes síto o velikosti oka 0,4 mm. Rekonstituovaný vzorek je pro zkoušky vhodný z toho důvodu, že neobsahuje hrubozrnné částice, které by zkreslovaly výsledky zkoušek, a případná cementace mezi částicemi je rozdužena. U rekonstituovaného vzorku je nejvyšší smykové napětí, které zemina přenese, právě kritická pevnost zeminy.

Před každou zkouškou musí proběhnout kalibrace dynamometrů. U translačního přístroje je jeden a u rotačního dva kusy. Jedná se o ocelový třmen, který se deformuje. Kalibrace probíhá tak, že se dynamometr postaví svisle na rovný podklad, osadí se na něj snímač deformace a dynamometr se zatěžuje předem určenými závažími. Na základě závislosti zatížení a deformace se určí tzv. kalibrační křivka, která je určena rovnicí, pomocí které se následně vyhodnocují smykové síly a následně se vypočítávají příslušná smyková napětí.



Obr. č. 19: Příklad určení kalibrační křivky dynamometru

### 10.2.3 Zkoušky v translačním smykovém přístroji

Pro zkoušky vedoucí ke zjištění kritické pevnosti zeminy byl použit přístroj typu ShearPLEX od firmy VJ Tech Ltd. Postup zkoušky popisuje norma ČSN CEN ISO/TS 17892 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 10: Krabicová smyková zkouška.

Translační smykový přístroj je složen z kovové nádoby, ve které je krabice pro vzorek. Krabice je zatěžována silou vyvolanou závažími, které se kladou na pákový systém. Dále se na přístroji nachází elektromotorek, kterým je způsoben translační pohyb části krabice, tak aby byl vzorek usmyknut. Odpor vzorku je přenášen na dynamometr, z jehož deformace se přepočtem získává právě smykové napětí v zemině. Na přístroji jsou osazeny snímače posunu propojené s počítačem. Jeden snímá míru sednutí vzorku (konsolidaci), další vodorovný posun krabice a třetí deformaci dynamometru.

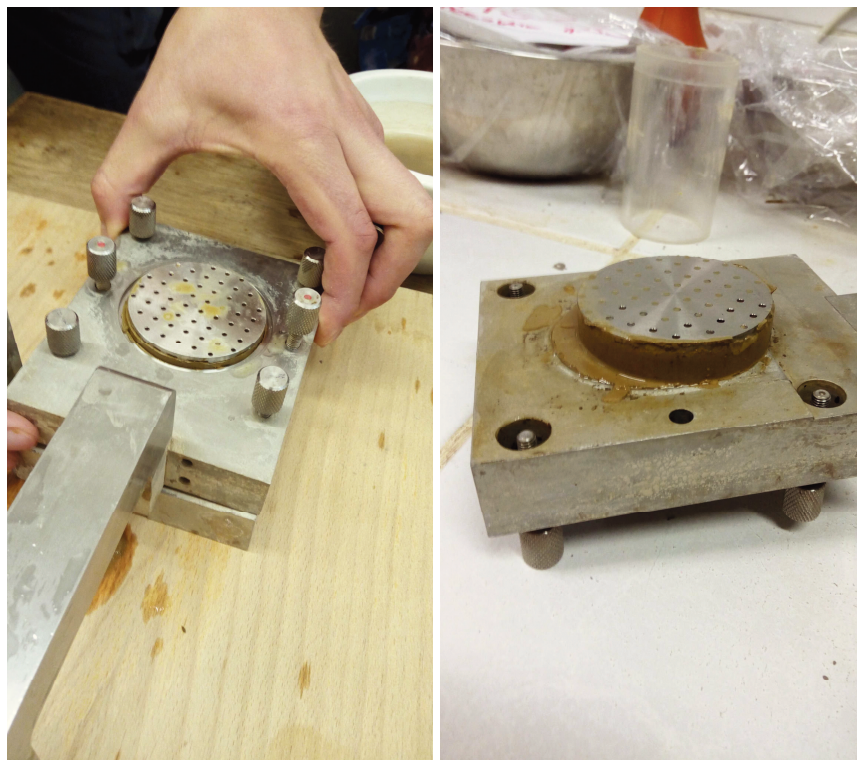
Vlastní zkouška probíhá tak, že se do krabice pro vzorek vloží množství rekonstituovaného vzorku. Vzorek má tvar válce, který má obecně větší průměr než výšku. Je zcela nežádoucí, aby ve vzorku vznikly bubliny. Po osazení krabice do přístroje se kovová nádoba, ve které se krabice nachází, zaleje destilovanou vodou, tak, aby byl vzorek ponořený. Poté začne fáze konsolidace vzorku. Na pákový mechanismus se postupně kladou závaží, kterými je na vzorek vyvozeno normálové (svislé) napětí a vzorek postupně sedá. Takto dochází ke konsolidaci vzorku. Závaží se přidává postupně, a to v momentě, kdy je již deformace od předchozího zatížení ustálená a vzorek již dále neseďá.

V momentě, kdy je na vzorek vyvozeno požadované normálové napětí a konsolidace je ukončena, přichází na řadu druhá fáze zkoušky, a to vlastní smýkání. Rychlost smýkání se určí z křivky konsolidace v souladu s výše zmíněnou normou (ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10). Určenou rychlostí se spustí smýkání. Smýkání končí, pokud je dosaženo vodorovného posunu cca 8 – 10 mm. Po zkoušce se vždy zjišťuje vlhkost vzorku.

Nutno podotknout, že celkově je zkouška relativně zdlouhavá, jelikož obě fáze (konsolidační i smýkací) trvají řádově dny, celá zkouška trvá týden až 10 dní. Z časových důvodů a harmonogramu laboratoře byly provedeny na každém vzorku 2 zkoušky v translačním smykovém přístroji, tzn. dohromady 4 zkoušky (2 vzorky po 2 zkouškách). Při první zkoušce byl vzorek konsolidován v přístroji. Při dalších 3 zkouškách byl v rámci úspory času vzorek předkonsolidován v konsolidačním válci na určitou hodnotu napětí a v přístroji

již byla provedena jen závěrečná fáze konsolidace tak, aby se vzorek v krabici ustanovil a mohlo se tak dříve přikročit ke smýkací fázi.

Každý vzorek měl průměr 7 cm a byl při zkoušce zcela ponořen ve vodě v průběhu konsolidace i v průběhu zkoušky. Po každé zkoušce byla zjišťována vlhkost vzorku.



*Obr. č. 20 (vlevo) Vzorek osazený v krabici připravený k translační smykové zkoušce (vlastní dokumentace)*

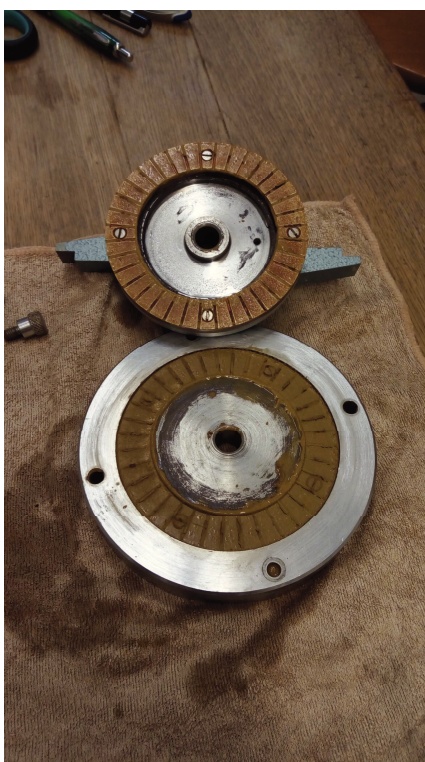
*Obr. č. 21 (vpravo) Vzorek po ukončení zkoušky v translačním přístroji (vlastní dokumentace)*

#### **10.2.4 Zkoušky v rotačním smykovém přístroji**

Pro zkoušky v rotačním smykovém přístroji byl použit přístroj Bromhead. Zkoušky jsou principiálně podobné s translačním přístrojem. Také zde vzorek prochází nejprve fází konsolidace stejně jako u translačního přístroje a následně se nechá smýkat. Rozdíl je v tom, že se vzorek nesmýká posuvným pohybem, nýbrž rotačním. Jak bylo zmíněno v teoretickém úvodu o pevnosti zemin, jílovitý vzorek se při dostatečně dlouhém smýkání dostane do stavu, kdy dosahuje reziduální pevnosti. Cílem zkoušek v rotačním smykovém přístroji bylo právě zjistit velikost reziduální pevnosti.



Na rozdíl od translačního smykového přístroje na rotačním jsou umístěny dva dynamometry, na kterých jsou osazeny snímače, které monitorují jejich deformaci. Třetí snímač stejně jako u translačního přístroje snímá sednutí vzorku v průběhu konsolidace i smýkání. Na základě deformace dynamometrů se opět pomocí kalibrační křivky dopočítá odpor zeminy vůči smyku, tudíž se získá smykové napětí. Na rozdíl od translačního přístroje, zde se vzorek vkládá do krabice, která má tvar mezikruží s průměrem vnějšího kruhu 100 mm a vnitřního 70 mm.

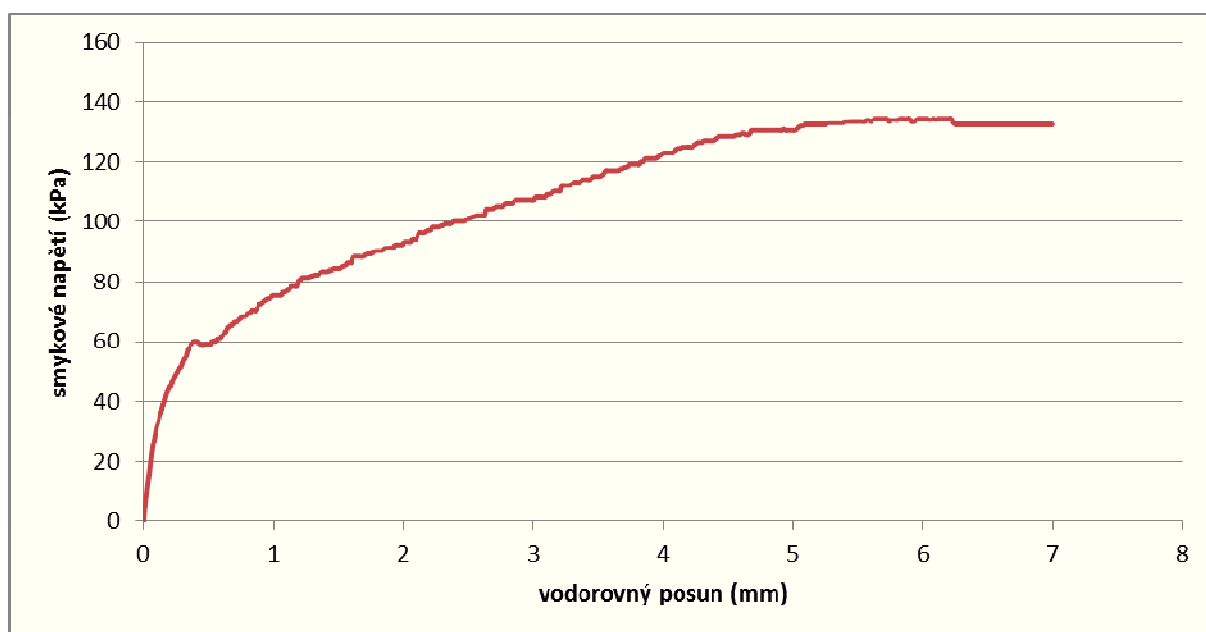


*Obr. č. 22: Vzorek po dokončení zkoušky v rotačním smykovém přístroji (vlastní dokumentace)*

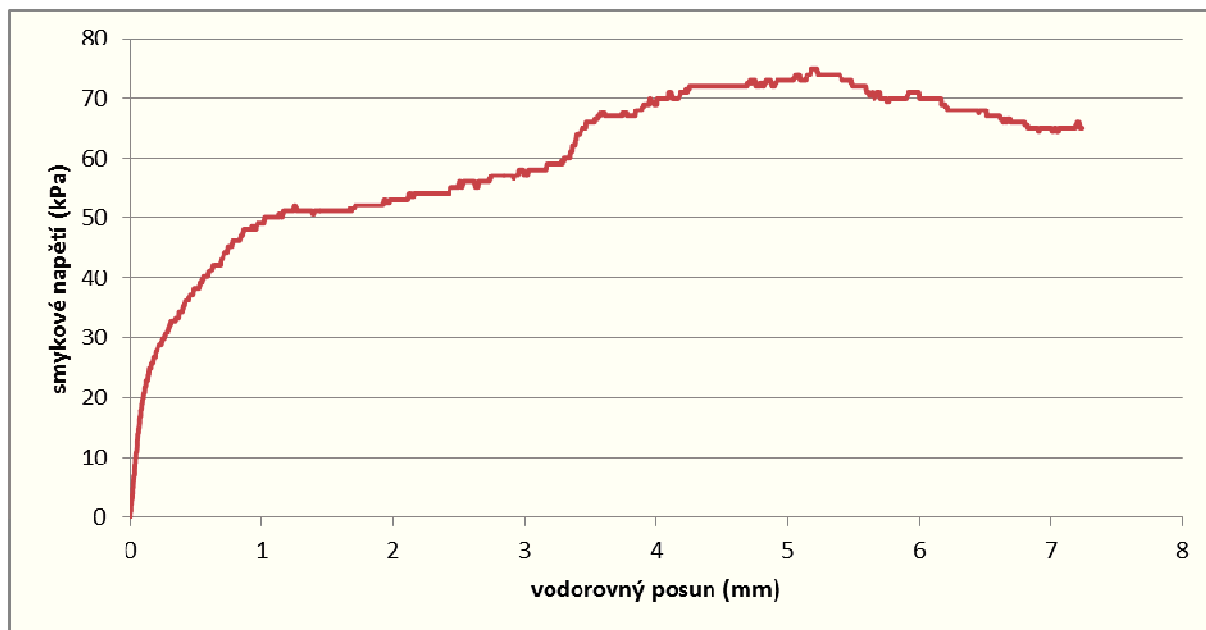
## 10.2.5 Výsledky zkoušek k určení smykové pevnosti

### Výsledky zkoušek z translačního smykového přístroje

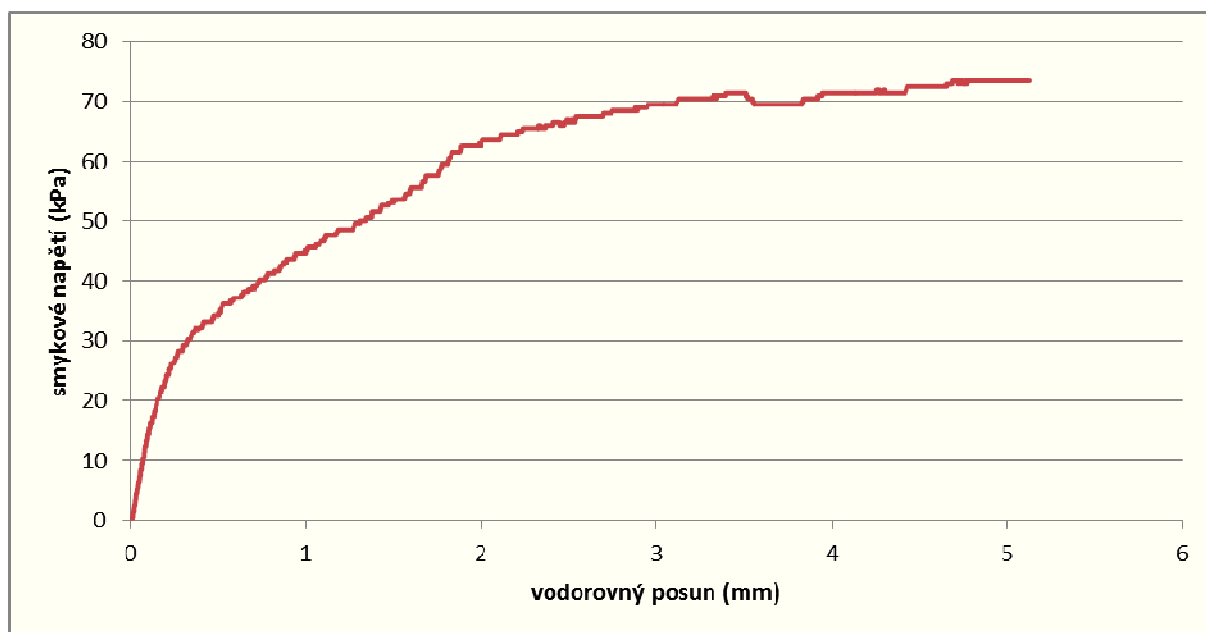
Po ukončení každé zkoušky byla importována data z počítače do osobního počítače, ve kterém bylo provedeno vyhodnocení vzorku pomocí tabulkového procesoru Excel. Pro každou zkoušku byl vytvořen pracovní diagram, kde na vodorovné ose je vynesena vodorovný posun a na svislé ose smykové napětí. Každý vzorek byl smýkán pod jiným normálovým napětím. Právě z normálového napětí a kritického smykového napětí byl pro každou zkoušku následně vypočítán **kritický úhel vnitřního tření**.



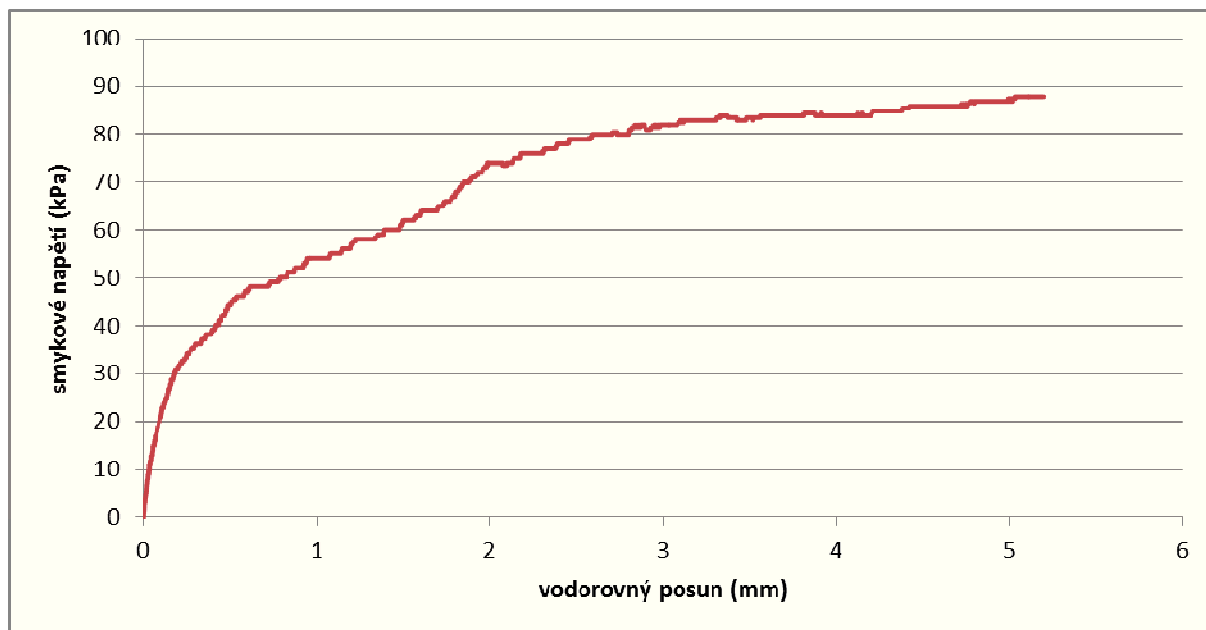
Obr. č. 23: Pracovní diagram vzorku č. 1 – 1. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)



Obr. č. 24: Pracovní diagram vzorku č. 1 – 2. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)



Obr. č. 25: Pracovní diagram vzorku č. 2 – 1. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)

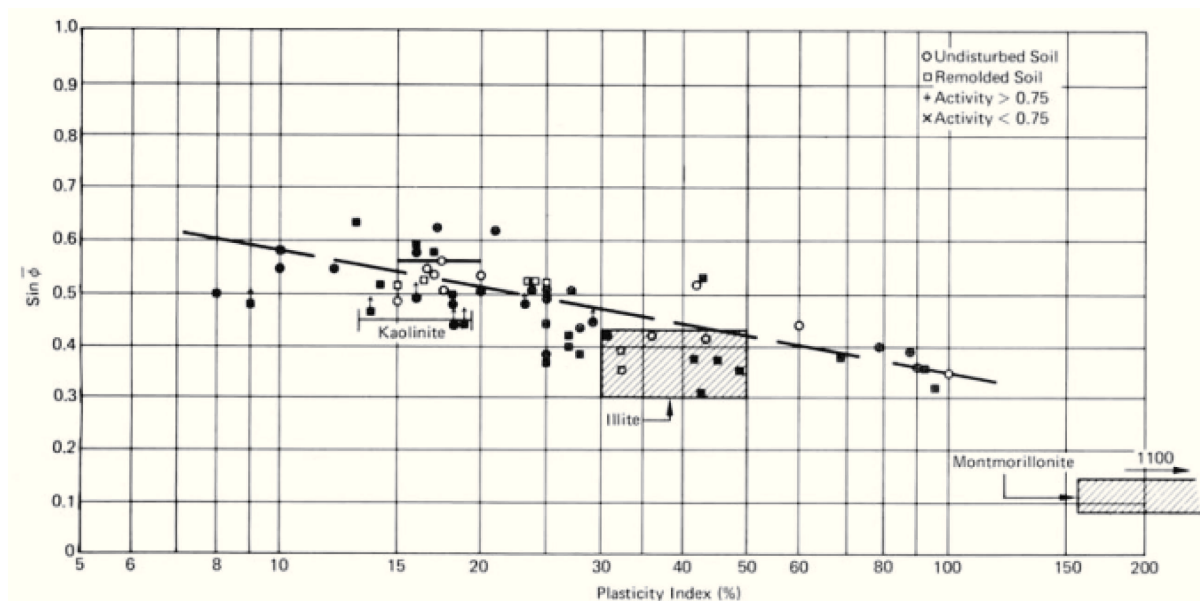


Obr. č. 26: Pracovní diagram vzorku č. 2 – 2. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)

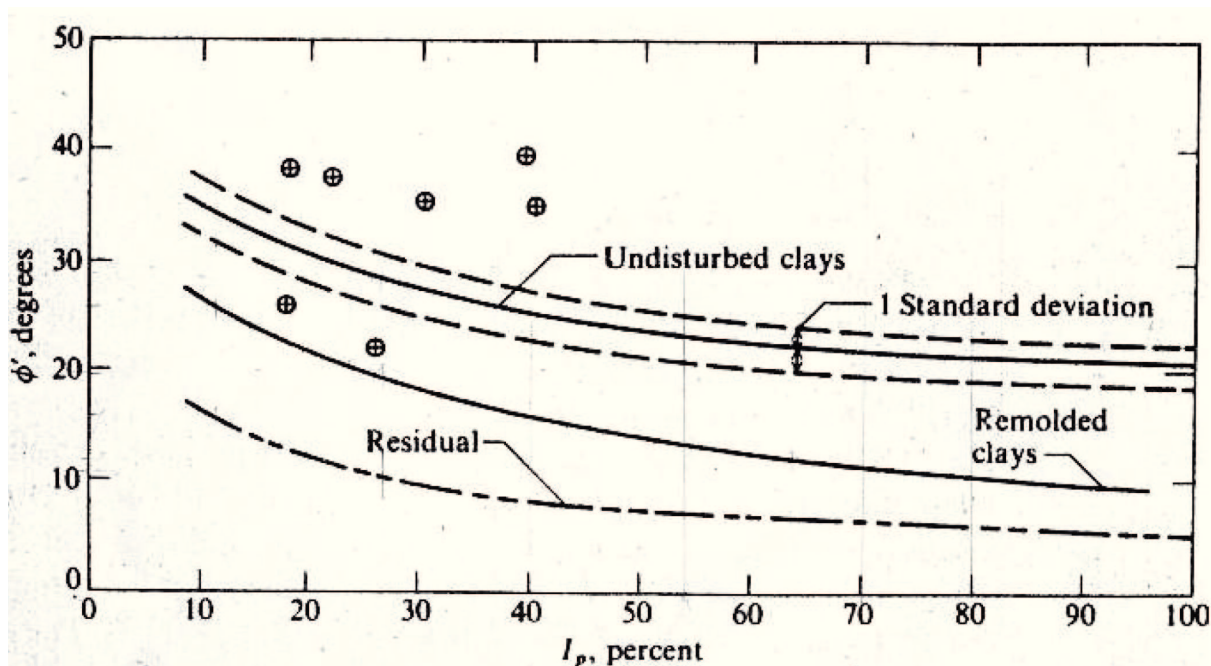
Zkouška	Normálové napětí $\sigma$ [kPa]	Kritické smykové napětí $\tau$ [kPa]	Rychlost smýkání v [mm/min]	Kritický úhel vnitřního tření $\phi_{cr}$ [°]	Vlhkost vzorku po konci zkoušky $w$ [%]
Vzorek č. 1 1. zkouška	200	132,5	0,0015	<b>33,5</b>	33,5
Vzorek č. 1 2. zkouška	100	65,0	0,0012	<b>33,0</b>	34,6
Vzorek č. 2 1. zkouška	120	73,5	0,0012	<b>31,5</b>	32,2
Vzorek č. 2 2. zkouška	150	87,9	0,0012	<b>30,4</b>	30,2

Tab. č. 5: Souhrn výsledků zkoušek v translačním přístroji (vlastní zpracování v programu Excel)

Pro každý vzorek byly tedy zjištěny 2 hodnoty kritického úhlu vnitřního tření ze smykového krabicového přístroje. Výsledné hodnoty byly porovnány s hodnotami vycházejícími z níže uvedených grafů (obr. č. 23 a 24). Z prvního grafu vychází, že odpovídající úhly vnitřního tření jsou pro vzorek 1 v rozmezí cca 30 - 34° a pro vzorek 2 v rozmezí 29 - 33°. Druhý graf je určen pro jíly a lze hodnoty z něj brát jen zcela orientačně vychází interval hodnot úhlu vnitřního tření pro 1. vzorek 28 - 34° a pro 2. vzorek 26 - 32°. Hodnoty zjištěné při laboratorních zkouškách spadají do daných intervalů.



Obr. č. 27: Vztah mezi úhlem vnitřního tření a indexem plasticity (Mitchell, J. K., Soga K., 2005)

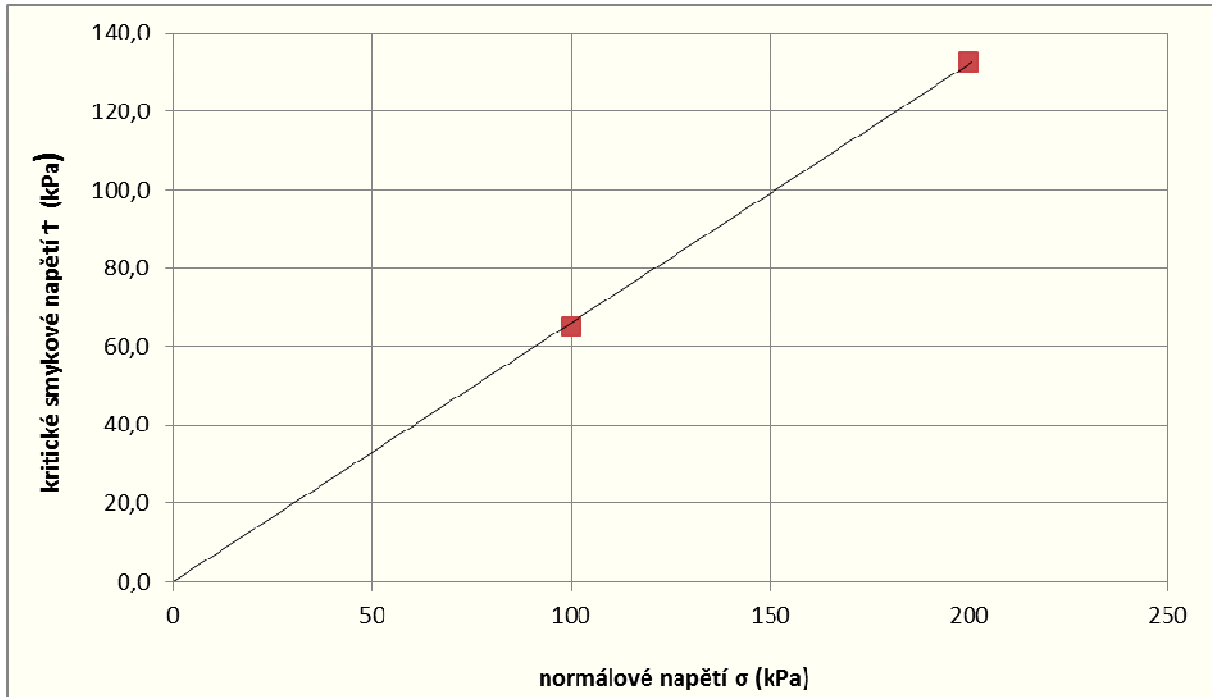


Obr. č. 28: Vztah mezi úhlem vnitřního tření a indexem plasticity (Bjerrum et al., 1960)

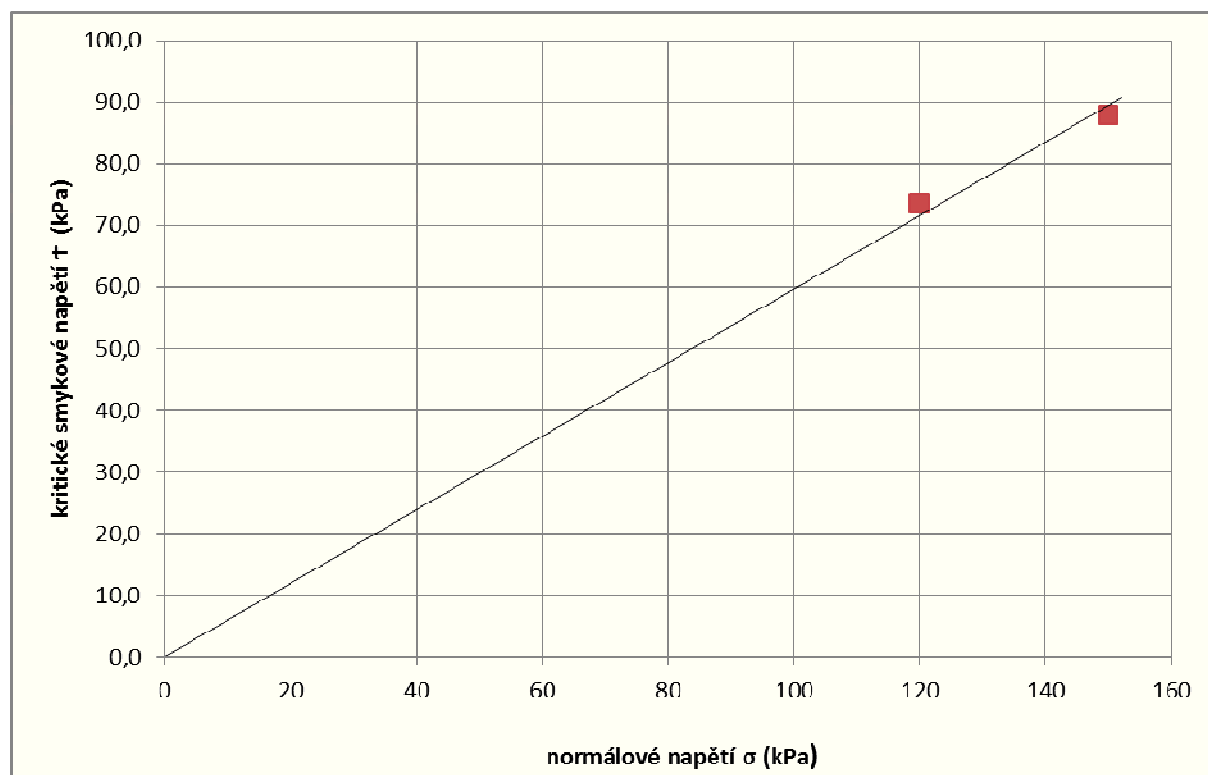
	Vzorek	Kritický úhel vnitřního tření $\phi_{cr}$ [°]			Zatřídění	
		Translační přístroj	Tab. Mitchell, Soga	Tab. Bjerrum	ČSN 14 688 - 1	ČSN 73 6133
<span style="color: green;">█</span>	1	33,3	30 - 34	28 - 34	cISi	F5 (MI)
<span style="color: blue;">█</span>	2	30,9	29 - 33	26 - 32	cISi	F4 (CS)

Tab. č. 5: Porovnání výsledků kritických úhlů vnitřního tření (vlastní zpracování v programu Excel)

Vzhledem k potřebám a časovému rozvrhu laboratoře byly provedeny 2 zkoušky na každém vzorku. Obálky pevnosti obou vzorků, které jsou níže (obr č. 29 a 30), jsou tedy sestrojeny na základě 2 bodů.



Obr. č. 29: Obálka pevnosti vzorku č. 1 (vlastní zpracování v programu Excel)



Obr. č. 30: Obálka pevnosti vzorku č. 2 (vlastní zpracování v programu Excel)

### Výsledky zkoušek z rotačního smykového přístroje

Vyhodnocení zkoušek z rotačního smykového přístroje probíhalo zcela analogicky zkouškám v translačním přístroji.

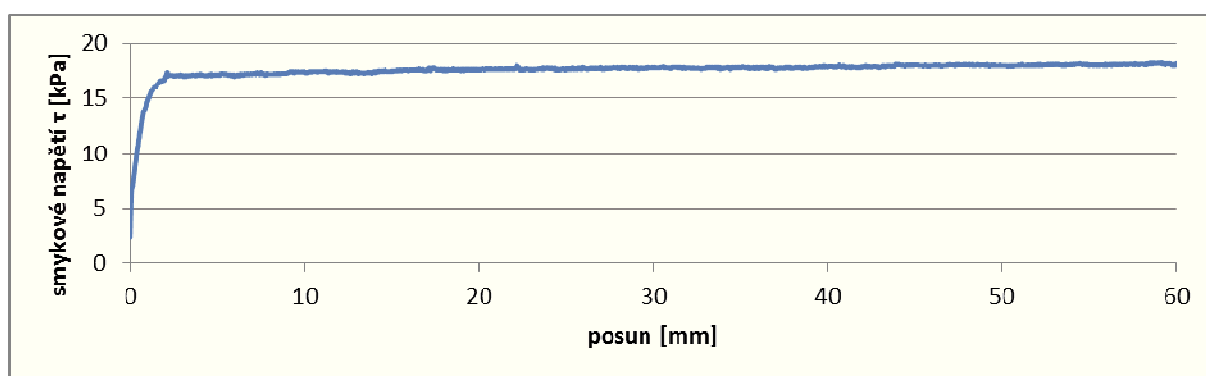
Byl proveden stejný počet zkoušek jako v případě translačního přístroje, tedy 2 zkoušky na každém vzorku. Rychlost smýkání byla opět určena v souladu s příslušnou normou a smýkání bylo dostatečně dlouhé tak, aby bylo dosaženo reziduální pevnosti zeminy. Konsolidace vzorků byla vždy prováděna přímo v přístroji, jelikož „předkonsolidování“ ve válci jako u translačního přístroje v tomto případě nebylo vzhledem k tvaru vzorku (mezikruží) možné a rychlost konsolidace nízkého vzorku v rotačním přístroji je vyšší.

Normálové (konsolidační) napětí bylo vždy voleno 30 kPa a 50 kPa – dvě zkoušky pro jeden vzorek. Z následných dat byl sestrojen pracovní diagram a byl spočítán reziduální úhel vnitřního tření.

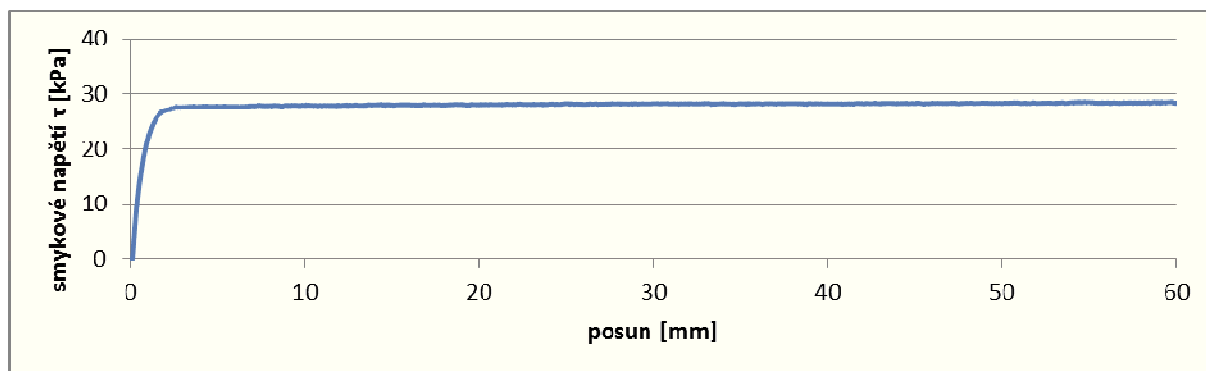
Celkový průběh pracovních diagramů není zcela odpovídající klasickému průběhu při zkouškách v rotačním smykovém přístroji. Tato skutečnost lze přisuzovat faktu, že v rotačním

smykovém přístroji často dochází k tomu, že není měřeno smýkání mezi zrny zeminy, nýbrž smýkání mezi mosaznou deskou a zeminou. To následně vede ke zkreslování výsledků.

Ze získaných výsledků lze však konstatovat, že zkoušené zeminy mají hodnoty reziduální pevnosti podobné pevnosti kritické. Vypočítané reziduální úhly vnitřního tření jsou takřka totožné s kritickými. Nižší hodnota byla dosažena pouze v případě vzorku 2 u druhé zkoušky. Co se týče stavby zemin, znamená to, že vzorky zemin nejsou natolik „jílovité“ aby docházelo k tomu, že se zrnka jílu poskládají při dostatečně dlouhém smýkání do polohy, že dojde k mobilizaci reziduální pevnosti.

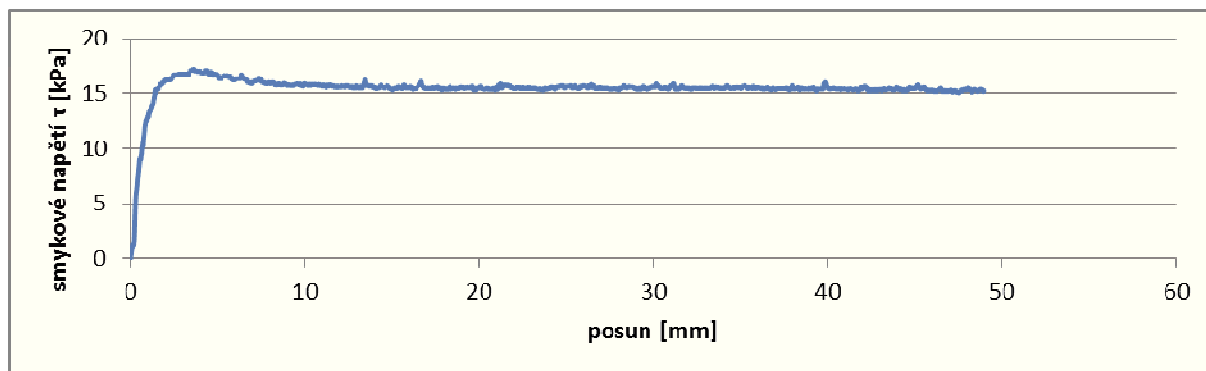


Obr. č. 31: Pracovní diagram vzorku č. 1 – 1. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)

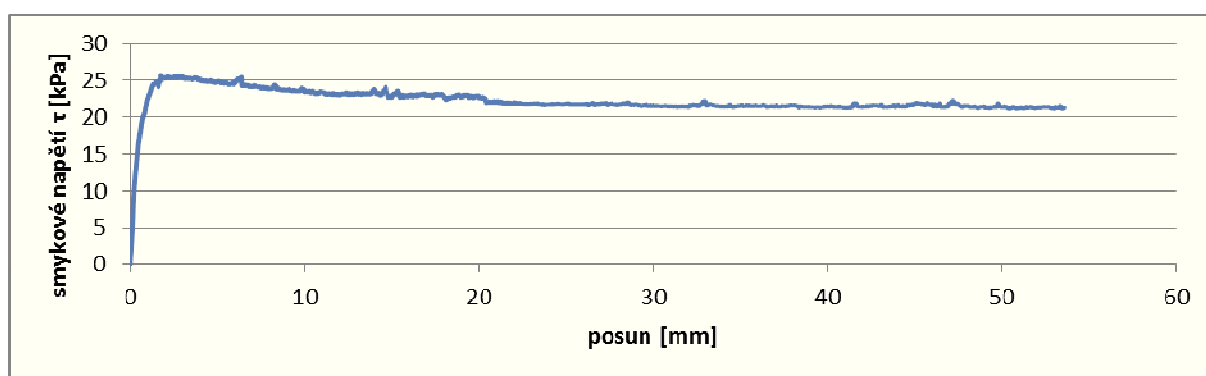


Obr. č. 32: Pracovní diagram vzorku č. 1 – 2. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)





Obr. č. 33: Pracovní diagram vzorku č. 2 – 1. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)

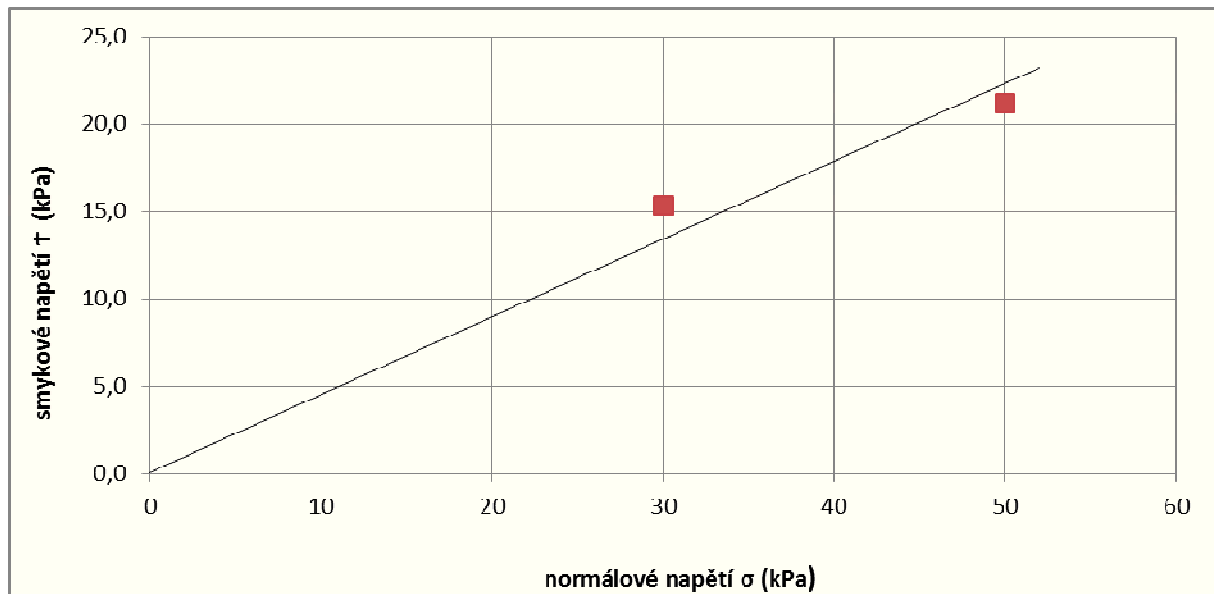


Obr. č. 34: Pracovní diagram vzorku č. 2 – 2. zkouška (vlastní zpracování v programu Excel)

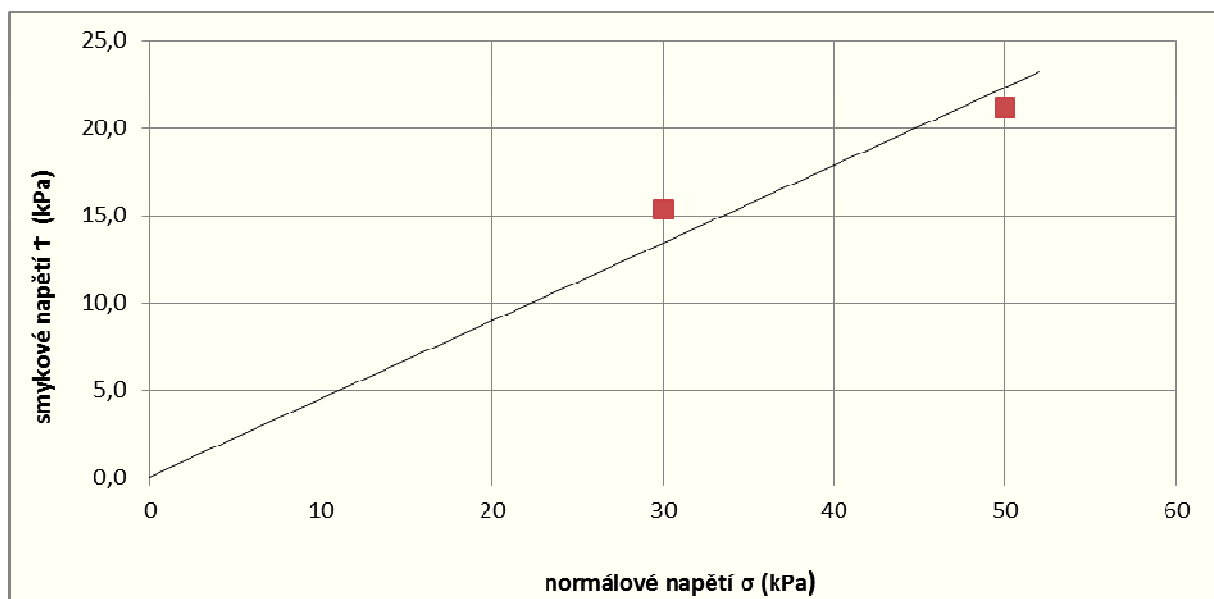
Zkouška	Normálové napětí $\sigma$ [kPa]	Smykové napětí $\tau$ [kPa]	Rychlost smýkání $v$ [mm/min]	Reziduální úhel vnitřního tření $\phi_{rez}$ [°]	Vlhkost vzorku po konci zkoušky $w$ [%]
Vzorek č. 1 1. zkouška	30	17,4	0,0178	<b>35,5</b>	35,5
Vzorek č. 1 2. zkouška	50	27,9	0,0178	<b>33,9</b>	34,4
Vzorek č. 2 1. zkouška	30	15,3	0,0178	<b>29,5</b>	35,6
Vzorek č. 2 2. zkouška	50	21,2	0,0178	<b>24,5</b>	31,3

Tab. č. 6: Souhrn výsledků zkoušek v rotačním přístroji (vlastní zpracování v programu Excel)

Vzhledem k potřebám a časovému rozvrhu laboratoře byly provedeny 2 zkoušky na každém vzorku. Obálky pevnosti obou vzorků, které jsou níže (obr. č. 35 a 36), jsou tedy sestrojeny na základě 2 bodů.



Obr. č. 35: Obálka pevnosti vzorku č. 1 (vlastní zpracování v programu Excel)



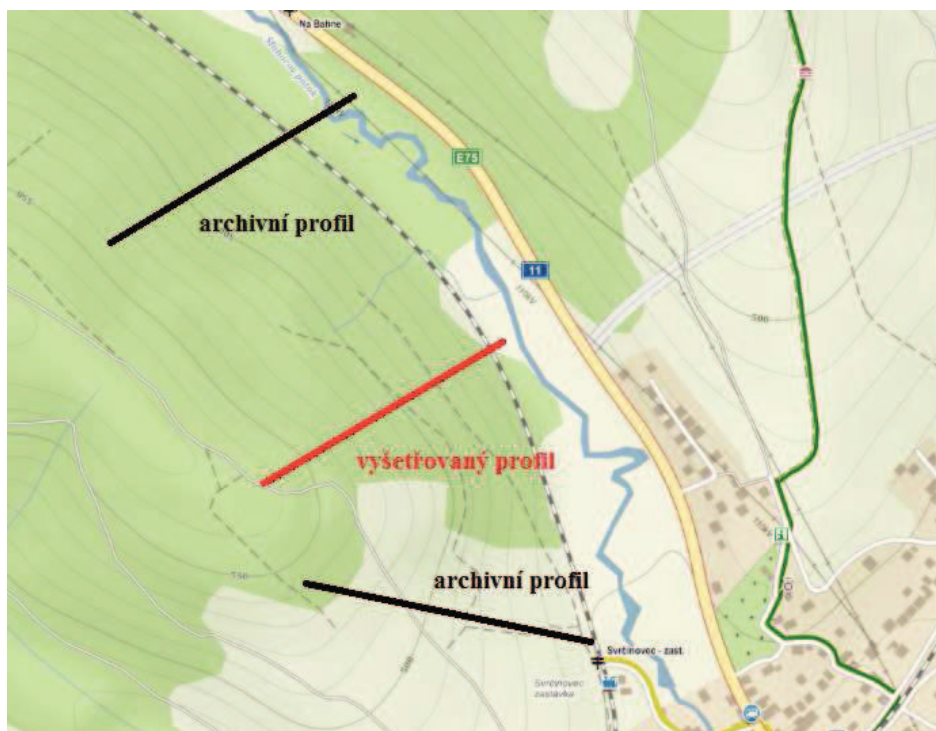
Obr. č. 36: Obálka pevnosti vzorku č. 2 (vlastní zpracování v programu Excel)

## 11. POSOUZENÍ STABILITY SVAHU

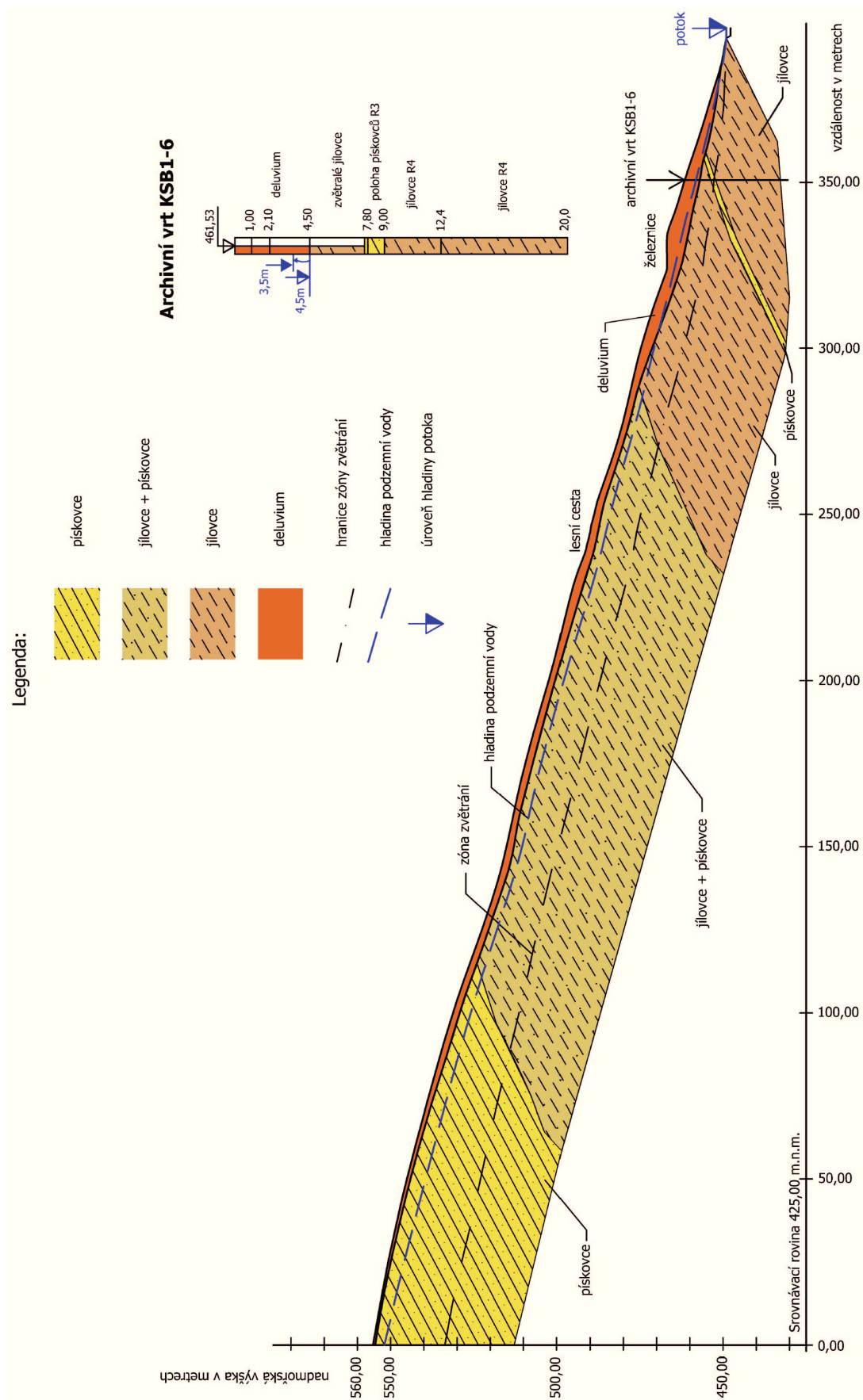
### 11.1. VYTVOŘENÍ INŽENÝRSKOGEOLOGICKÉHO PROFILU

Posledním krokem při zpracovávání tématu diplomové práce bylo vytvoření matematického modelu a posouzení stability potenciálního sesuvu.

Pro tento účel bylo nutné vytvořit příčný inženýrskogeologický profil daným svahem (řez). Pro sestavení profilu byla využita již známá fakta z archivních inženýrskogeologických průzkumů, tak i fakta zjištěná při mapování území pro účely zhotovení inženýrskogeologické mapy. Z archivních inženýrskogeologických prací jsem čerpal zejména z profilu, který je známý na základě průzkumu pro stavbu dálnice a nachází se na stejném svahu jako vyšetřovaný profil v této práci. Dále velmi důležitým faktorem pro sestavení co nejpřesnějšího profilu byly zhotovené průzkumné vrty v patě svahu. Dalším zpřesňujícím faktorem byl profil sestavený v rámci archivní dokumentace sesuvu nad železniční tratí. Na základě zmíněných informací a reliéfu terénu, který se jen málo liší v rámci celého svahu, byl sestaven inženýrskogeologický profil potenciálně sesuvným svahem. Profil byl sestaven v programu AutoCAD. Situace archivních a profilů spolu s vyšetřovaným příčným profilem je na obrázku č. 37. Na obrázku č. 38 je uveden sestrojený inženýrskogeologický profil včetně legendy a archivního vrtu.



Obr. č. 37: Situace inženýrskogeologických profilů ([www.mapy.cz](http://www.mapy.cz))



Obr. č. 38: Schéma inženýrskogeologického profilu

## **11.2. VÝPOČETNÍ METODA**

Po zhotovení inženýrskogeologického profilu bylo nutné přistoupit k vytvoření matematického modelu v některém z geotechnických software pro výpočet stability svahu. V rámci této práce byl použit program GEO5 2017.

Pro výpočet stability svahu byla zvolena metoda mezní rovnováhy. Jedná se o metodu, která nepracuje s přetvárnými charakteristikami materiálů. Základem metody je silová, popř. momentová rovnováha části svahu nad smykovou plochou. Smyková plocha je v této metodě předem určena. Síly vstupující do výpočtu jsou dvojího druhu - pasivní a aktivní. Pasivní síly přispívají k vyšší stabilitě svahu, aktivní naopak působí destabilizačně. Výsledkem výpočtu je stupeň stability, což je poměr pasivních sil k silám aktivním. Stupeň stability se značí „FS“. Pokud  $FS = <1$ , svah je nestabilní, pokud  $FS = >1$ , svah je stabilní.

Na principu metody mezní rovnováhy je založena tzv. proužková metoda. Princip je takový, že svah je rozdělen na svislé proužky. Výsledný stupeň stability se rovná poměru součtu všech pasivních sil působících v jednotlivých proužcích ku součtu všech aktivních sil působících v jednotlivých proužcích.

Mezi jednotlivými proužky působí interaktivní síly. Na základě různých uvažování těchto sil mezi jednotlivými proužky bylo vyvinuto několik metod, které jsou pojmenovány většinou podle osoby, která metodu vyvinula. Nejjednodušší je metoda, která síly mezi proužky zanedbává, tzv. švédská nebo také Fellaniova metoda. Další metody, které již interaktivní síly mezi proužky uvažují, jsou Janbu, Spencer, Morgenstern – Price, nebo Sarma. Protože výpočetní program GEO5 nabízí výběr z více metod výpočtu stupně stability svahu, byla stabilita svahu v rámci této práce spočítána také více metodami. Výsledky byly však prakticky stejné. V této práci jsou prezentované výsledky spočítané metodou Morgenstern – Price. Tato metoda uvažuje, že smykové meziproužkové síly jsou funkcí sil normálových.

## **11.3. TVORBA MODELU**

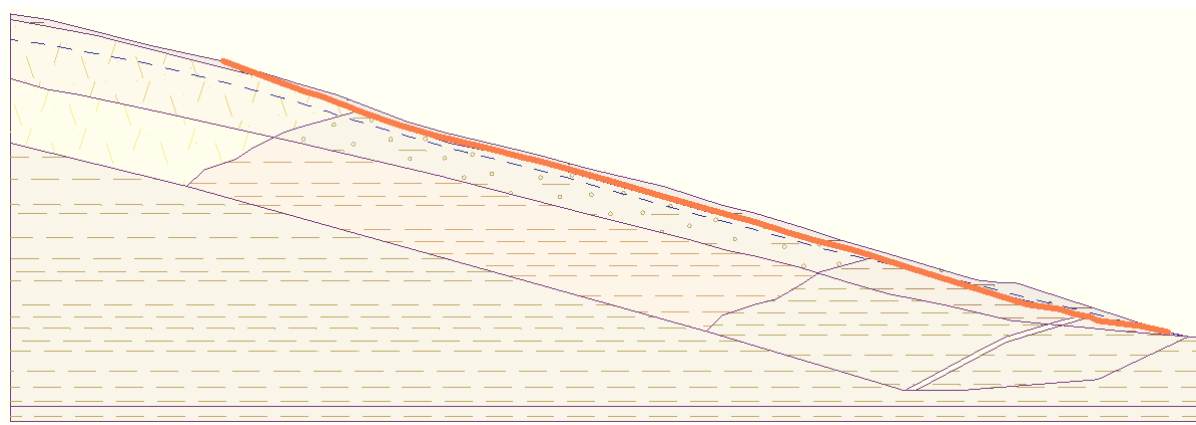
Příčný profil svahu byl importován z programu AutoCAD do programu GEO5 2017. V tomto programu pak byla vytvořena rozhraní jednotlivých geotypů s příslušnými parametry. Následně byly jednotlivé geotypy přiřazeny do oblastí v profilu.

Hladina podzemní vody byla modelována ve dvou úrovních. Nejdříve v úrovni, ve které se nachází za normálních okolností. Tato hladina byla určena na základě archivní dokumentace. Ve druhém případě byla hladina podzemní vody namodelována těsně pod povrchem terénu. Tato situace je extrémní případ, který by mohl nastat při extrémním nasycení horninového prostředí zejména pískovců v horní části svahu.

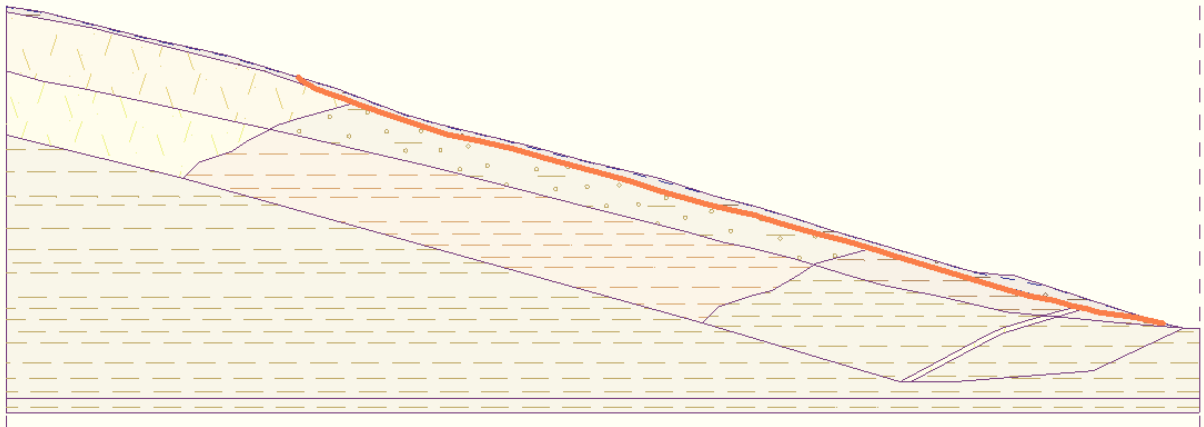
Smyková plocha byla zadána jako polygonální a byla zadána graficky. Následně bylo provedeno několik výpočtů pro oba případy hladiny podzemní vody. Výpočty byly prováděny s neměnnou smykovou plochou a také se smykovou plochou, která byla výpočetním programem optimalizována. Výsledkem daného výpočtu byl stupeň stability pro daný případ.

#### 11.4. VÝSLEDKY POSOUZENÍ STABILITY SVAHU

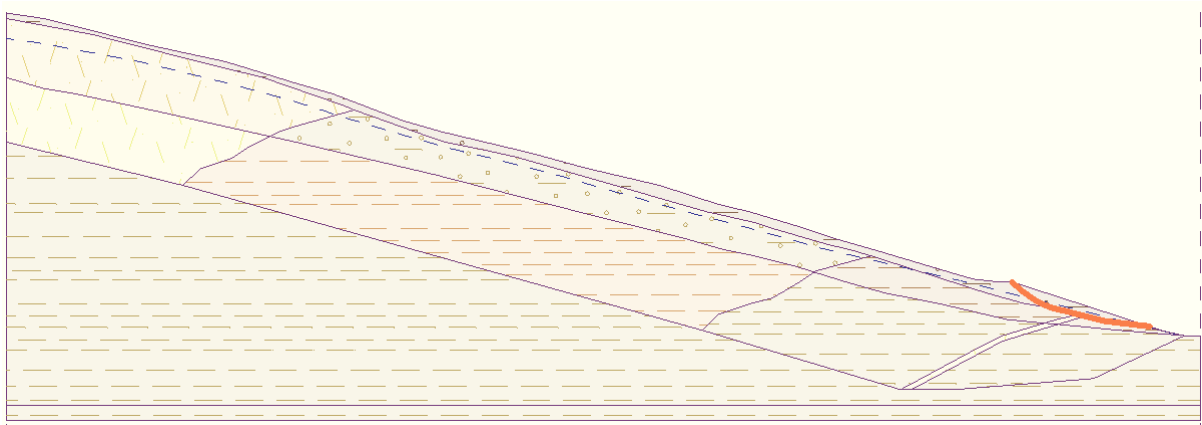
Pro obě polohy hladiny podzemní vody byly vybrány dva případy s nejnižším stupněm bezpečnosti (FS). Obrázky 39 a 41 představují případy s nejnižším stupněm bezpečnosti s hlubší hladinou podzemní vody a na obrázcích 40 a 42 jsou případy s nejnižším stupněm stability, kdy hladina podzemní vody je v těsné blízkosti povrchu terénu. Silná oranžová křivka představuje smykovou plochu. Vždy byla vybrána simulace sesunutí celého svahu (obr. 39 a 40) a simulace sesunutí rizikové části svahu pod železničním násypem (obr. 41 a 42).



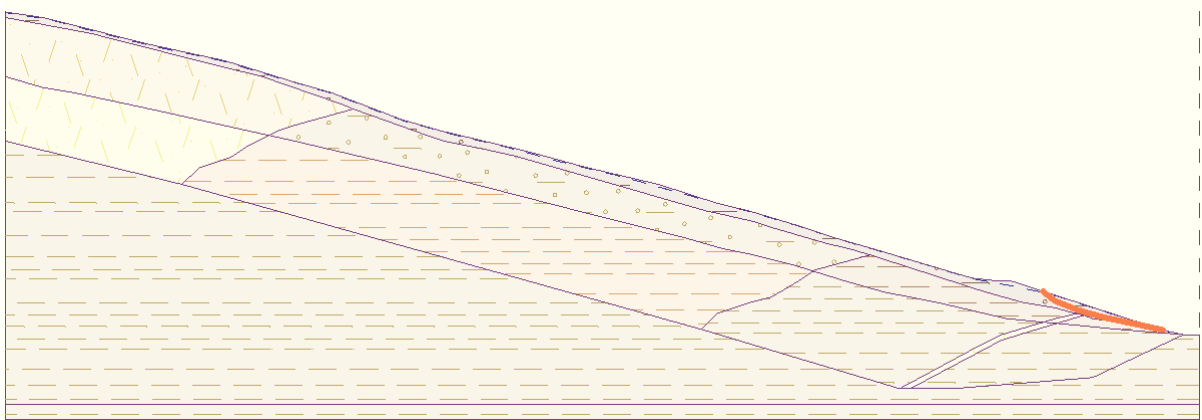
Obr. č. 39: Model sesunutí celého svahu, hladina podzem. vody v normální úrovni:  $FS = 1,95$   
(GEO5 2017)



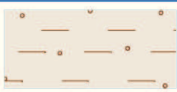

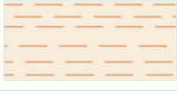

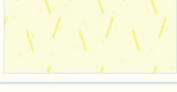
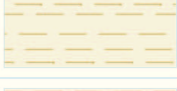

Obr. č. 40: Model sesunutí celého svahu, hladina podzem. vody těsně pod terénem: **FS = 1,21**  
(GEO5 2017)



Obr. č. 41: Model sesunutí části svahu, hladina podzem. vody v normální úrovni: **FS = 1,60**  
(GEO5 2017)



Obr. č. 42: Model sesunutí části svahu, hladina podzem. vody těsně pod úrovní terénu:  
**FS = 1,08** (GEO5 2017)

Číslo	Název	Vzorek	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1	deluvium		30,00	0,00	20,00
2	zvětralý pískovec		35,00	1000,00	24,00
3	zvětralý jílovec		30,00	1000,00	24,00
4	zvětralý jílovec a pískovec		33,00	1000,00	23,00
5	pískovec		35,00	10000,00	25,00
6	jílovec		25,00	10000,00	25,00
7	jílovec a pískovec		30,00	5000,00	25,00

Tab. č. 7: Parametry zemin a hornin použitých v modelu (GEO5 2017)

Při porovnání čtyř situací, které jsou na obrázcích 39 až 42 je patrné, že podle modelu je nejrizikovější část svahu oblast pod železničním násypem v kombinaci s vysokou hladinou podzemní vody. V případě, že by došlo k nasycení zeminy do takové míry, že by byla hladina podzemní vody v blízkosti terénu, stupeň stability (FS) dosahuje hodnoty pouze 1,08. Při modelu sesunutí celého svahu s hladinou podzemní vody těsně pod terénem dosahuje stupeň stability hodnoty 1,21.

Platná norma ČSN 73 6133 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“ předepisuje různé hodnoty stupně stability (v normě nazývaných stupně bezpečnosti) pro dlouhodobou stabilitu svahu podle toho, jaká je ve výpočtu použita pevnost zeminy. A dále také podle toho, zda se jedná o jemnozrnnou, nebo hrubozrnnou zeminu, nebo o skalní horninu.

V rámci diplomové práce jsou relevantní hodnoty stupně bezpečnosti pro jemnozrnnou zeminu. Ty jsou 1,1 při použití reziduální smykové pevnosti, 1,15 při použití kritické pevnosti a 1,5 při použití pevnosti vrcholové.



Při výpočtu stability svahu v této diplomové práci byla použita kritická smyková pevnost. Mezní hodnota stupně bezpečnosti je tedy podle výše zmíněné normy 1,15. Jediný poslední modelový případ – sesunutí části svahu pod železnicí s hladinou podzemní vody těsně pod terénem – má stupeň bezpečnosti 1,08, což neodpovídá normovým požadavkům. Ostatní modelové situace mají stupeň bezpečnosti 1,21; 1,60 a 1,95 a normový limit tedy splňují.

## 12. SANAČNÍ OPATŘENÍ

Jedním z cílů této diplomové práce bylo navrhnout sanační opatření pro zvýšení stability posuzovaného svahu. Svah byl dle archivních materiálů a dle terénní rekognoskace vyhodnocen jako potenciálně sesuvný. Na základě provedené stabilitní analýzy v geotechnickém softwaru a dle zhodnocení situace svahu in situ lze konstatovat, že svah není bezprostředně ohrožen jevy, které by měly charakter rychlých sesuvných pohybů.

Matematický model však poukázal na možnou nestabilitu zejména ve spodní části svahu pod železniční tratí v případě, že by došlo ke zvýšení hladiny podzemní vody ( $FS=1,08$ ). Nutno podotknout, že právě v této části – v patě svahu – jsou založeny pilíře mostu odbočovací větve dálnice. Ani stabilita celého svahu při vysoké hladině podzemní vody není vysoká ( $FS=1,21$ ).

Z matematického modelu je tedy patrné, že zásadní roli ve stabilitě posuzovaného svahu hraje podzemní voda. Pro zvýšení a zajištění dlouhodobé stability je nutné udržovat hladinu podzemní vody nízko tak, aby nedošlo k nasycení sesuvných zemin. Nutné je zajištění této úrovně hladiny i v případě nenadálých okolností jako jsou silné deště, náhlé tání sněhu apod. Pro tento účel byla v rámci výstavby dálničních mostů provedena síť subhorizontálních vrtů, které jsou rovnoměrně rozmístěny v rámci celého svahu na levém břehu Šlahorova potoka. Jejich uspořádání je vějířovité a vždy 4 vrty jsou svedeny do jednoho místa, kde vyústí a voda je z nich odváděna do Šlahorova potoka.

Jednotlivé pilíře mostu, který vede podél paty svahu pod železniční tratí a přechází nad ní, jsou založeny hlubinně na pilotách do skalního podkladu. Založení každého pilíře je však navíc chráněno stěnou z pilot, která absorbuje tlak a případné deformace způsobené tlakem generovaným sesouváním hmot. Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, celý svah se pohybuje, přičemž pohyb má creepový charakter. Případné negativní účinky tohoto pohybu na založení pilířů a případné účinky pohybů rychlejších, pokud by došlo k porušení rovnováhy svahu, by měly pilotové stěny okolo pilířů teoreticky zachytit.

Provedená sanační opatření při stavbě dálničních mostů považují za adekvátní. Stavby mostů by neměly být sesuvnými pohyby ohroženy. Svahovými pohyby je však ohrožena i mezinárodní železniční trať. Při řádném odvodnění a plné funkčnosti subhorizontálních odvodňovacích vrtů by stabilita svahu neměla být bezprostředně ohrožena.

Naskýtá se však otázka, jak by se svah zachoval při náhlých silných deštích v kombinaci např. s táním sněhu. Jelikož subhorizontální odvodňovací vrty by nemusely svah dostatečně rychle odvodňovat, je stabilita svahu zejména v příkřejší části pod železnicí v takovém případě reálně ohrožena.

Na místě je tedy úvaha o vytvoření opatření, které by v takové situaci svah spolehlivě rychle odvodnilo, aby nedošlo k porušení stability. Vhodné opatření je například zřízení odvodňovacích žeber.

Ke zvýšení stability svahu se nabízí další opatření jako stabilizační pilotová stěna (popř. kotvená), podzemní stěna, přitěžovací šterková lavice, apod. V případě, že by došlo k omezení funkčnosti odvodňovacích vrtů (zanesení, částečné zanesení), bylo by nutné vrty vyčistit, případně zřítit nové.



*Obr. č. 43: Pilotová stěna okolo mostního pilíře (vlastní dokumentace)*



*Obr. č. 44: Vyústění subhorizontálních odvodňovacích vrtů (vlastní dokumentace)*

### 13. ZÁVĚR

Název této diplomové práce je „Analýza a sanační opatření sesuvného území u obce Svrčinovec“. Zpracování daného tématu a vlastní provedené práce lze rozdělit do třech hlavních kapitol:

- vymapování území a vytvoření mapy inženýrskogeologických poměrů
- odebrání vzorků v místě potenciálně sesuvného svahu a provedení jejich laboratorní analýzy (zjištění kritické a reziduální smykové pevnosti)
- vytvoření inženýrskogeologického příčného profilu daným svahem, provedení matematického modelu a zjištění stability svahu.

V rámci první části jsem sestrojil inženýrskogeologickou mapu na základě vlastních mapovacích prací, kdy jsem prozkoumal celé území a vytvořil 40 dokumentačních bodů. Pro tvorbu a zpřesnění mapy jsem využil také archivní průzkumné vrty, které byly vytvořeny v rámci inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu dálnice.

Pro laboratorní analýzu jsem odebral dva vzorky zemin z části svahu, která je potenciálně sesuvná. Cílem bylo zjistit pevnostní charakteristiky zemin, které jsem následně plánoval použít do modelu a spočítat stabilitu svahu. Oba vzorky byly nejdříve podrobeny zrnitostní analýze, na jejímž základě byly sestaveny křivky zrnitosti. Následně byly zjišťovány konzistenční meze obou vzorků. V rámci pevnostní analýzy jsem provedl zkoušky zemin ve smykovém translačním přístroji, kde jsem zjišťoval kritickou smykovou pevnost zemin a také byly provedeny zkoušky v rotačním smykovém přístroji, kde jsem zjišťoval reziduální pevnost daných zemin.

Výsledky laboratorních zkoušek korespondují s výsledky zkoušek, které byly prováděny jako součást inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu dálnice.

V poslední části diplomové práce jsem sestavil inženýrskogeologický profil zájmovým potenciálně sesuvným svahem na základě informací z archivních materiálů. Inženýrskogeologický profil byl následně vymodelován v geotechnickém výpočetním softwaru GEO5 2017, kde byla spočítána stabilita svahu metodou mezní rovnováhy s různými úrovněmi hladiny podzemní vody. Bylo zjištěno, že svah je stabilní při nízké hladině podzemní vody. Stabilita svahu, zejména ve spodní části, je reálně ohrožena v případě nenadálých událostí, jako jsou například náhlé silné deště. V takovém případě není jisté, že by

stávající odvodňovací opatření bylo schopné podzemní vodu ze svahu dostatečně rychle odvádět a zda by nedošlo k porušení stability svahu. Pro tento případ lze doporučit stabilizační opatření, např. vytvoření odvodňovacích žeber pro rychlejší odvod vody ze svahu, případně vybudování pilotové stěny.

Na svahu dlouhodobě probíhá pomalý přirozený pohyb sesouvání deluviálních sutí, tzv. creep. Tento pohyb může zatěžovat pilíře mostní konstrukce. Zatížení od creepu však zachycují ochranné pilotové stěny vybudované okolo mostních pilířů a samotná mostní konstrukce tak není creepovým pohybem přitěžována.

## 14. POUŽITÁ LITERATURA

### Publikace a zprávy:

- Atkinson, J., H., 2007: *The mechanics of soils and foundations*. Second edition, Taylor & Francis, New York, 442 s. ISBN 0-07-707713-x
- Bjerrum, L., Simons, N., E., 1960: *Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays*. ASCE conference, Colorado
- Boháč, J., 2013: Přednášky z předmětu: Mechanika zemin 2, Univerzita Karlova v Praze
- Kolektiv autorov, 1980: *Atlas SSR*. Slovenský úrad geodézie a kartografie, Bratislava
- Kujan, O., 2016: *Stabilitní poměry sesuvného svahu v údolí Jiloveckého potoka v Semilech*. Diplomová práce, PřF UK, Praha
- Matula, M., Pašek, J., 1986: *Regionálna inžinierska geológia ČSSR*. Univerzita Komenského, Bratislava
- Mazúr, E., Lukniš, M., 1980: *Geomorfologické členenie SSR*. Geografický ústav SAV, Bratislava
- Mitchell, J., K., Soga, K., 2005: *Foundamentals of soil behavior*. third edition, John Wiley and Sons, inc., ISBN-10:0-471-46302-7
- Pánek, M. a kol., 1998: D18 Kysucké Nové Mesto – Skalité, orientačný inžiniersko-geologický prieskum, Geostatik Žilina
- Pánek, M. a kol., 2001: D18 (D3) Kysucké Nové Mesto - Skalité, II. úsek Svrčinovec – Skalité orientačný inžiniersko-geologický prieskum, GEOstatik Žilina
- Potfaj, M., 2003: *Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Kysuce, M 1: 50 000*, ŠGÚDŠ, Vydavateľstvo D. Štúra Bratislava
- Quitt, E., 1971: *Klimatické oblasti Československa*, Brno
- Roháč, J., 2013: *Zhodnocení sesuvného rizika v oblasti Prackovic po povodních 2013*. Diplomová práce, PřF UK, Praha
- ShearPLEX User Manual, 2004. ShearPLEX User Manual. VJT 2700. VJ Tech Ltd, 17. s
- Šuba, J. a kol., 1984: *Hydrogeologická rajonizácia Slovenska*. SHMÚ, Bratislava
- Wood, D., M., 1990: *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-33782-8
- Záruba, Q., Mencl, V., 1987: *Sesuvy a zabezpečování svahů*. Druhé přepracované a doplněné vydání, Academia, Praha

Záthurecký, A. et al., 2006: *Podrobný inžinierskogeologický prieskum stavby diaľnice D3 Svrčinovec – Skalité*. INGEO – ighp, s.r.o., Žilina

Žabková, E. a kol., 2003: *Závěrečná správa, Povodie Kysuce – svahové deformácie*, INGEO – ighp, s.r.o., Žilina

**Normy:**

ČSN CEN ISO/TS 17892-4 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*.

ČSN CEN ISO/TS 17892-12 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*.

ČSN CEN ISO/TS 17892 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 10: Krabicová smyková zkouška*

ČSN 73 6133 *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*

ČSN 14 688-1 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*

ČSN 14 688-2 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 2: Zásady pro zařídování*

**Web:**

[www.geology.sk](http://www.geology.sk)

[www.geotechnici.cz](http://www.geotechnici.cz)

[www.maps.google.com](http://www.maps.google.com)

[www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)

[www.shmu.sk](http://www.shmu.sk)

**Firmy:**

INGEO, a.s.

Pontex, s.r.o.

**Výpočetní programy:**

AutoCAD 2016 LT

GEO5 2017

Microsoft Excel

Microsoft Word