

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



Zhodnocení sesuvného rizika v oblasti Prackovic po povodních 2013

Slope deformation risk assessment in the area of Prackovice after floods in 2013

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jakub Roháč

Vedoucí: Ing. Petr Kycl

Konzultant: Ing. Jan Boháč, CSc

Praha, 2015

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval sám, pod vedením Ing. Petra Kycla. Všetky použité zdroje som riadne uviedol v zozname použitej literatúry. Táto práca ani jej podstatná časť nebola predložená k získaniu iného alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe, 5.8. 2015

Podpis:

## PodĎakovanie

Rád by som sa poĎakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. P. Kyclovi, konzultantovi Ing. J. Boháčovi, CSc. a študentom doktorandského štúdia aplikovanej geológie Mgr. T. Mohylovi a Mgr. J. Jermanovi za trpezlivosť a cenné rady, ktoré mi budú do budúcnosti prínosom. Ďalej Ďakujem Českej geologickej službe (ĎGS) a firme AZ Consult, spol. s.r.o. za poskytnutie všetkých potrebných materiálov a služieb.

V Prahe dňa 5. augusta 2015

Bc. Jakub Roháč

## Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá zostrojením inžinierskogeologickej mapy zosuvného územia Dobkovičky v mierke 1:1000, odberom porušených vzoriek zemín a ich laboratórnym testovaním v triaxiálnom prístroji a následné modelovanie stability stien zosuvu po prípadnom odťažení zosutých hmôt. Mapovanie prebiehalo v jarnom období roku 2014. Výsledkom je ručne kreslená mapa, kde sú zakreslené všetky znaky zosuvu, vrátane 38 dokumentačných bodov. K mape je priložená legenda. Odber porušených vzoriek prebiehal pri vrtnom prieskume, ktorý robila firma AZ Konzult, spol. s.r.o. v lete 2014. Z odobratých vzoriek boli vybraté 3, na ktorých som robil triaxiálne neodvodnené skúšky s meraním pórových tlakov. Výsledkom skúšky je kritický uhol vnútorného trenia, ktorý bol použitý pri modelovaní chovania stien zosuvu po odťažení všetkých zosutých hmôt. Modelovanie bolo realizované programom Plaxis 2D.

## Abstract

This thesis deals with constructing engineering geological 1:1000 map of Dobkovičky landslide, collecting of reconstituted soil samples, their laboratory CIUP triaxial testing and subsequent modeling of wall stability of the landslide after the excavation of collapsed soil material. Mapping was done during spring of 2014. Outcome of this thesis is hand drawn map, plotted on the map are all the elements of the landslide including 38 documentation points. Legend of the maps is attached. Collection of reconstituted soil samples was done during drilling investigation, executed by company AZ Consult, spol.s.r.o., during summer of 2014. Three samples of all that were collected were subjected to laboratory CIUP triaxial testing. The result of the testing is critical friction angle, which was used during modeling of wall stability of the landslide after excavation of all collapsed soil material. For the actual modeling, PC software Plaxis 2D was used.

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Lokalizácia záujmového územia .....	2
3	Geologické a geomorfologické pomery.....	3
3.1	Geomorfologické pomery.....	3
3.2	Geologické pomery širšieho okolia.....	4
3.3	Geologické pomery zosuvu a jeho podložia .....	8
4	Hydrogeologické pomery širšieho okolia .....	9
5	Klimatické pomery širšieho okolia.....	11
6	Zosuvné územie Prackovice.....	12
6.1	Fosilné blokové svahové deformácie .....	12
6.2	Mladšie a recentné svahové deformácie .....	13
6.3	Recentné zosuvy vyvolané stavbou diaľnice D8.....	14
7	Zosuv Dobkovičky .....	16
7.1	Geotechnický prieskum zosuvu.....	17
7.2	Návrh sanačných opatrení.....	19
8	Mapovanie.....	21
8.1	Archívne mapovacie práce .....	21
8.2	Metodika tvorby mapy (príloha č. 1).....	21
8.3	Popis zosuvu .....	22
9	Pevnosť zemín .....	25
9.1	Teoretické základy .....	25
9.2	Laboratórne skúšky .....	28
9.2.1	Triaxiálny prístroj.....	28
9.2.2	Vzorky .....	29
9.2.3	Metodika skúšky.....	31
9.2.4	Zhrnutie výsledkov laboratórnych skúšok.....	36
10	Numerické modelovanie .....	39
10.1	Ideálna plasticita.....	39
10.2	Numerické modelovanie stability.....	43
10.3	Zhrnutie výsledkov numerického modelovania .....	48
11	Diskusia výsledkov .....	50
12	Záver .....	52
13	Literatúra .....	54

# 1 Úvod

Plán diaľnice medzi Prahou a Drážďanmi sa prvýkrát objavil už v roku 1938. Prvý otvorený úsek diaľnice bol v úseku Řehlovice-Trmice v roku 1990. Úseky smerom na Prahu sa udávali do prevádzky od roku 1993. Do roku 2012 sa postupne otvárali nové úseky a dnes je stav taký, že chýba posledný úsek, dlhý cca 14 km medzi obcami Bílinka a Řehlovice. V týchto miestach je teleso diaľnice trasované v regióne neovulkanitov Českého stredohoří mimo iné v oblasti známej ako zosuvné územie Prackovice.

Stavba diaľnice s označením 0805 Lovosice-Řehlovice je časťou diaľničného ťahu Praha-štatná hranica ČR/Nemecko. Je súčasťou IV. Evropského multimodálneho dopravného koridoru Berlín – Drážďany – Praha – Bratislava – Győr – Budapešť – Arad – Craiova – Sofia – Plovdiv – Istanbul. Stavba nadväzuje mimoúrovňovou križovatkou pri Lovosiciach na už vybudovanú stavbu 0804. Z tohto miesta pokračuje smerom na obec Vchynice, okolo vrchu Lovoš smerom k obci Bílinka. Tu sa mimoúrovňovou križovatkou spája s cestou I/8 smerom na Teplice. Z Bílinky pokračuje diaľnica cez Opárenské údolie, kde bol postavený oblúkový železobetónový most dlhý 275 metrov (stavba 0805 C). Ďalej pokračuje cez 455 metrov dlhý most Dobkovičky (stavba 0805 D) smerom cez zosuvné územie Prackovice medzi riekou Labe a kameňolomom Dobkovičky do tunelu Prackovice (stavba 0805 E). Tunel Prackovice (270 m) vedie diaľnicu horou Debus, z nej vystupuje cez údolie do ďalšieho tunelu Radejčín (stavba 0805 F) dlhého 620 m. Za tunelom sa trasa diaľnice dostáva k obci Řehlovice, kde sa napojuje na už vybudovanú a používanú stavbu 0806 Řehlovice-Trmice (ŘSD, 2015).

Práce na poslednom úseku diaľnice museli byť však dňa 7.6. 2013 prerušené. Vo večerných hodinách sa po nadmerných zrážkach aktivoval zemný prúdový zosuv impozantných rozmerov, ktorý zasiahol a poškodil teleso rozostavanej diaľnice, časť vybavenia kameňolomu nad svahom a jednokoľajnú železničnú trať prechádzajúcu v strede svahu.

Cieľom tejto diplomovej práce je detailne zmapovať zosuv, nakresliť mapu geomorfologických tvarov reliéfu v mierke 1:1000 a modelovať správanie sa bočných svahov a celkovú stabilitu svahu po prípadnom odťažení všetkých zosutých hmôt. Vzorky zemín boli odobraté pri vrtnom prieskume zosuvu v lete 2014. Na vybraných vzorkách sú robené šmykové skúšky a stanovený ich kritický uhol vnútorného trenia použitý pri modelovaní stability.

## 2 Lokalizácia záujmového územia

Záujmové územie sa nachádza v kraji Ústeckom, okres Litomeřice, 10 km južne od mesta Ústí nad Labem medzi obcami Dobkovičky a Prackovice nad Labem (Obr. 1). Územím prechádza úsek rozostavanej diaľnice D8 v km 56,300 a 56,500, stavba 0805 Lovosice-Řehlovice. Prechádza ním tiež jednokoľajová železničná trať Lovosice-Teplice v Čechách, ktorá je medzi stanicami Dobkovičky a Radejčín ťažko poškodená dôsledkom zosuvu. Nachádza sa tu kameňolom Dobkovičky pod horou Kubačka (543 m n.m.), kde sa približne od roku 1910 ťaží bazalt. Celá oblasť patrí do CHKO České středohoří.



Obr. 1: Prehľadná situácia lokality ([www.mapy.cz](http://www.mapy.cz))



### 3 Geologické a geomorfologické pomery

České středohoří je složitý vulkanický komplex, ktorý sa nachádza v oherskom rifte medzi litoměřickým a krušnohorským zlomom. Dnes je toto územie vulkanických telies pozmenené eróziou. Sú zachované len výplne prívodných dráh, relikty lávových prúdov a obnažené podpovrchové telesá. Celý komplex mal zložitý vývoj. Ako prvé vznikali silno explozívne vulkány popri litoměřickom zlome, potom vznikali výlevy bazanitov a intrúzie bazalityckých hornín, intermediálnich a kyslých subvulkanitov, nakoniec intrúzie olivínom bohatých bazanitov. Za hlavné centrum sopečnej činnosti sa označuje miesto severne od Ústí nad Labem pomenované Roztocká kaldera. Rozmiestnenie vulkánov po českom středohoří má určitú zákonitosť. V centrálnej časti (sem patrí aj moje záujmové územie) sa koncentrujú kyslé horniny, ktoré tvoria lakolity, bazické horniny sa zase vyskytujú v okrajových častiach (Chlupáč, I.,2011).

#### 3.1 Geomorfologické pomery

České středohoří je podľa publikácie Vyšší geomorfologické jednotky České republiky (ČÚZK, 1996) zaradené do týchto geomorfologických jednotiek:

- systém: Hercynský
- subsystém: Hercynská pohoří
- provincia: I Česká vysočina
- subprovincia: I3 Krušnohorská
- oblasť: I3B Podkrušnohorská
- celok: I3B-5 České středohoří

Všeobecne je České středohoří plochá hornatina až členitá vrchovina o rozlohe 1265 km<sup>2</sup>. Delí sa na juhozápadnú časť Milešovské středohoří a severovýchodnú časť Verneřické středohoří.

Záujmová oblasť sa nachádza medzi 543 m vysokým vrchom Kubačka, z ktorého terén klesá vo východnom smere až k hladine rieky Labe vo výške 146 m.n.m. Priemerný sklon medzi týmito dvoma bodmi je cca 11,5°. Morfológia je podmienená hlavne vulkanickou činnosťou a

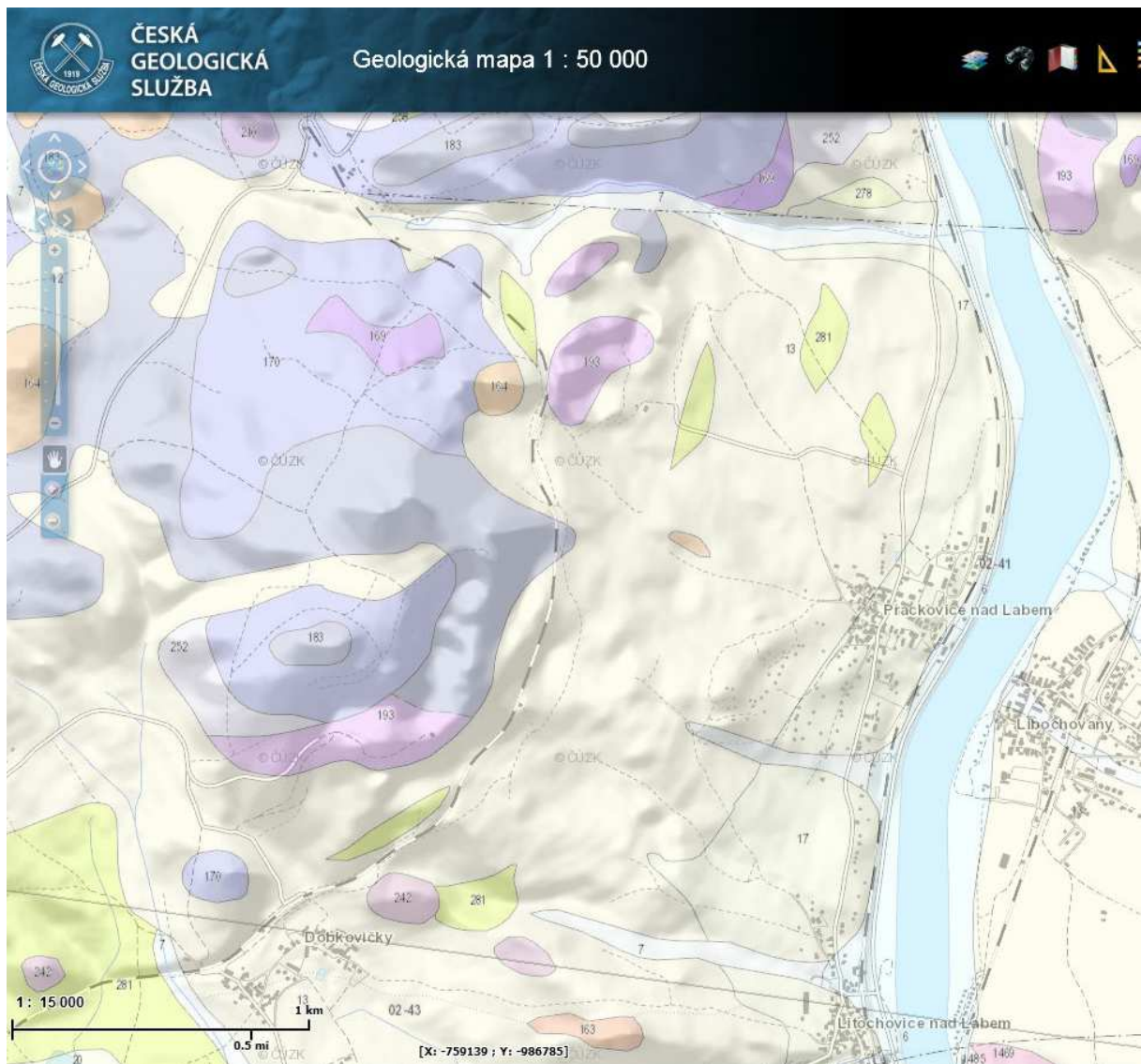
eróznou činnosťou rieky Labe. Najvýraznejšie morfológické línie majú smer SV-JZ (krušnohorský smer) a SZ-JV (sudecký zlomový systém), významné línie sú tiež vo smere V-Z.

### 3.2 Geologické pomery širšieho okolia

V paleogéne vznikajúce vulkanické centrá prerážali sedimenty českej kriedovej panvy. Najvyššie partie sú tvorené vulkanickým komplexom, pod ním sú vrchne kriedové horniny a na báze sú horniny kryštalinika. Svahy záujmového územia sú tvorené kriedovými slieňovcami, kvartérnymi akumuláciami svahových pohybov (vysokými až 40 m), sprašovými hlinami a v hornej časti terciérnymi vulkanickými horninami (bazaltoidy). Na Obr. 2 je geologická mapa územia.

#### **Kryštalinikum**

V podloží sedimentárnych a vulkanických hornín oblasti Českého stredohoří sú zastúpené metamorfované a vyvreté horniny vrchneproterozoického až spodnopaleozoického veku. Z veľkej časti sú zaraďované ku krušnohorskému kryštaliniku krušnohorsko-durynskej oblasti. Na povrch vystupuje kryštalinikum len na niekoľkých miestach v okolí Milešova, Bíliny a v Opárenskom údolí. Preto sú zdrojom informácií o zložení kryštalinika hlavne nálezy xenolitov v prírodných dráhach vulkanitov alebo hĺbkové vrty. Vznik kryštalinika je naviazaný na varijské vrásnenie, keď boli horniny postihnuté intenzívnou metamorfózou nasledovanou intrúziami granitoidných telies. Behom kriedy boli tieto horniny postupne celé prekryté sedimentmi, neskôr na niektorých miestach znovu obnažené eróziou. Povrch kryštalinika je veľmi členitý. Svedčí o tom výškový rozdiel medzi najnižším a najvyšším dokumentovaným povrchom až 1700 metrov. Všeobecne je to ale relatívne monotónny komplex muskovito-biotitických ortorul, pararul a migmatitov. V južnej časti Českého stredohoří sú v podloží zastúpené granulity a serpentizované peridotity, v centrálnej časti sú to granity, granodiority a diority a v severnej časti fylitické horniny (Cajz, V. 1996).



Obr. 2: Geologická mapa širšieho okolia zosuvu ([http://mapy.geology.cz/geocr\\_50/](http://mapy.geology.cz/geocr_50/))

Legenda ku geologickej mape širšieho okoloia zosuvu:

- 7 – zmiešaný sediment
- 17 – spraš a sprašová hlina
- 163 – sodalitický trachyt
- 164 – trachyt a sodalitický trachyt
- 170 – silne alterovaný bazaltoid
- 183 – alkalický olivínický bazalt
- 193 – olivínický nefelinit
- 242 – subvulkanické bazaltoidné brekcie
- 252 – pyroklastiká bazaltoidných hornín
- 281 – vápnité ílovce a slieňovce

## **Krieda-Mezozoikum**

Vrchne kriedové sedimenty tvoria až miestami 1000 metrov mocný podklad treťohorného vulkanicko-sedimentárneho komplexu. Pred približne 97 miliónmi rokmi preniklo do českého masívu zo severu aj z juhu plytké more, ktoré tu existovalo 12 miliónov rokov. Záplava morom bola spôsobená dôsledkom celosvetovej morskej transgresii v cenomane. Začala vznikať veľká česká kriedová panva. V tej dobe bola zaplavená aj takmer celá vtedajšia oblasť českého stredohoří. Ešte pred morskou záplavou začiatkom cenomanu došlo v plytkých údoliach k sedimentácii fluviálnych sedimentov, ktoré spolu s morskými pieskami tvoria perucko-korycanské súvrstvie. Je mocné maximálne do 90 m a je nám známe len z vrto, pretože nikde nevybieha na povrch. V turone a coniacu dochádzalo k sedimentácii 400 až 900 m morských uloženín, ktoré sú nám dnes známe ako bělohorské, teplické a březenské súvrstvia. Sú stvorené vápnitými ílovcami a slieňovcami z južnej strany a pieskovcami zo severnej strany. Pieskovce boli do sedimentácie dotované z veľkého Lužického ostrova tvoreného hlavne žulou, čo dokazuje aj veľké množstvo kremenných zŕn v uložených pieskovcoch. Na zložení vápnitých ílovcov a slieňovcov sa podieľajú okrem pevninskej ílovej zložky a kremenného prachu aj vápnité schránky morských organizmov. V mladšom coniacu a santone dochádzalo k splytčovaniu morskej panvy a tým aj k sedimentácii hrubozrnnejších materiálov, hlavne pieskov z pobrežia, ktoré odlivovými alebo búrkovými prúdami sedimentovali na ílované dno panvy. Tieto pieskovité telesá sa zachovali na niektorých miestach v mocnosti do 200 m (Cajz, V. 1996).

**Březenské súvrstvie** – Súvrstvie je tvorené mäkkými, po nasýtení vodou plastickými slieňovcami a vápenatými ílovcami náchylnými na plastické deformácie. Vychádza v miestach okolo Prackovic nad Labem v monotónnej, pelitickej facii. Výchozy sa nachádzajú až nad železničnou traťou Dobkovičky – Radejčín na kóte 380 m. n. m. Vo svahu záujmového územia sa Březenské súvrstvie nachádza v rozsiahlych plochách. Spolu s jeho litologickým vývojom sa predurčuje ako na zosuvy náchylná geologická jednotka.

## **Terciér**

Po skončení kriedovej sedimentácie bol kriedový pokryv rozlámaný podľa zlomov na kry, málo spevnené pieskovce a íovce začali podliehať erózii. Začala vulkanická činnosť. Vulkanity

pri svojom postupe k povrchu vyzdvihli kriedové sedimenty o niekoľko 100 m. Sopečná činnosť začala v Českom stredohoří na prelome druhohôr a treťohôr, pred 60 miliónmi rokov a trval približne 20 miliónov rokov. Vulkanizmus je naviazaný na oherský rift. V prvých etapách vývoja vznikali explozívne vulkány v dôsledku odplyňovania hlboko umiestneného vulkanického krbu. Neskôr sa objavili prvé mohutné výlevy olivinických bazaltoidických hornín. Efuzívna aktivita tak prevažovala explozívne vulkány. V ďalšej etape vývoja prevažuje produkcia tufov nad lávovými výlevmi (Cajz, V. 1996).

Vulkanity – v lome Dobkovičky boli dokumentované pevné, olivinické bazaltoidy, altrované až brekciovité bazaltoidy a intruzívne bazaltické brekcie. Na bázy vulkanitov boli dokumentované málo mocné polohy tufov, a pod nimi plastické slieňovce.

### **Kvartér**

V štvrtohorách menili vzhľad krajiny Českého stredohoří klimatické zmeny vyvolané striedaním glaciálov a interglaciálov. Obdobia, keď nastávala zmena z glaciálu na interglaciál, mali veľký vplyv činnosti riek. Málo zastúpená vegetácia nezadržiavala zrážkovú vodu a prietoky riek sa rapídne zvyšovali. Rieky s väčším spádom a s vyššiu unášacou schopnosťou transportovali piesky až balvany vulkanických hornín, ktoré boli v plytších oblastiach ukladané v podobe výplavových vejárov nazývaných prolúviá. Hlavnú osu Českého stredohoří tvorí rieka Labe. V jej údolí sa v rôznych výškach zachovali rôzne veľké pozostatky riečnych terás. Ich plošný rozsah väčšinou nie je veľký vďaka prevládajúcej erózii a zahĺbovaniu sa toku. V najchladnejších obdobiach štvrtohôr prevládalo usadzovanie vetrom prenášaných prachových častíc zvetraných hornín v rôznych terénnych nerovnostiach. Týmto spôsobom vznikali spraše a sprašové hliny s mocnosťami až 20 metrov. V Českom stredohoří sa eolické sedimenty vyskytujú iba vo východnej časti. V chladných obdobiach taktiež prevládalo intenzívne mrazové zvetrávanie hornín. Horniny sa rozpadali vplyvom mrazu na blokové a kamenité sute, ktoré sa po strmých svahoch posúvali a na úpätiach svahov tvorili akumulácie mocnosti do 20 metrov (Cajz, V. 1996).

### 3.3 Geologické pomery zosuvu a jeho podložia

Teleso zosuvu a jeho podložie je tvorené slieňovcami, rôzne alterovanými bazaltami, tufami a antropogénnym materiálom, ktorý sa nachádza v hornej časti zosuvu v podobe kameniva z výsypky z lomu a v strednej časti v podobe železničného násypu.

#### **Slieňovce**

Zvetrané kriedové slieňovce březenského súvrstvia prevažujú vo veľkej časti podložia zosuvu, od spodnej časti až nad železničnú trať. Boli dokumentované v bočnej stene zosuvu, v strednej časti, v blízkosti pôvodného železničného násypu (DB 9). Patria do triedy R6, majú mäkkú konzistenciu. Zdravé slieňovce v podloží zvetraných môžu dosahovať až triedu R4.

#### **Bazalty**

Bazalty sa nachádzajú v hornej časti zosuvu, sú triedy R4 až R2. Hranicou medzi slieňovcami a bazaltami pravdepodobne prebieha priečny zlom labského smeru, na ktorom boli odlamované bloky bazaltu, ktoré podliehali svahovým pohybom kerného typu po plastickom podloží až k eróznej bázi, ktorú predstavuje rieka Labe. Vrtmi z lomu boli potvrdené mocnosti týchto bazaltov približne 35 až 50m.

#### **Tufy**

Neogénne tufy majú charakter uholných ílov, piesočnatých ílov až ílovitých pieskov. Vo vrte IND-109 boli čierne uholné tufy dokumentované ako 10 cm mocná poloha, zatiaľ čo o necelých 100 m západne vzdialenom vrte IND 111 bola už zachytená poloha žltých piesočnatých tufov až 2 m mocná. To svedčí o zložitosti stavby celej oblasti. Tufy sú často zavodnené, často môžu tvoriť funkciu klznej plochy pre svahové pohyby. Nemajú celoplošnú koreláciu ale vyskytujú sa skôr v prstovitom usporiadaní.

Celé územie je známe fosilnými svahovými deformáciami blokového charakteru ale aj dočasne ukľudnenými a aktívnymi zosuvami. Preto je dôležité vedieť, že nie všetky horniny v podloží nemusia byť v polohe in situ, aj keď sa tak zdajú (Kycl, P., 2014)

## 4 Hydrogeologické pomery širšieho okolia

Záujmové územie je na podzemnú vodu chudobné. Voda sa viaže na bázu kvartérnych sutí a povrch prechodovej zóny zvetraných a zdravých slieňovcov.

### **Kvartérne sute**

V záujmovom území majú mocnosti približne do 5 m. Sú tu hlavným zdrojom podzemnej vody. Majú prielinovú priepustnosť. Výdatnosť sutí je priamo úmerná veľkosti infiltračnej plochy a množstvu zrážok. Infiltračná plocha v tomto území zahrňuje veľkú plochu zalesnených svahov vrchu Kubačka. Pre orientáciu uvádzam výdatnosti zistené prieskumom firmy Arcadis Geotechnika (Záruba, J., 2011), v týchto polohách je cca  $1 \cdot 10^{-3}$  l/s.

### **Zvetrané slieňovce**

Táto poloha sa považuje za daných podmienok ako izolátor. Priepustnosť je zväčša puklinová. Môže tu vznikať zavesená zvodeň vplyvom kapilárneho vzliňania vody. Výdatnosť v týchto polohách sa pohybuje cca  $5 \cdot 10^{-4}$  l/s.

### **Zdravé slieňovce**

Priepustnosť je puklinová viazaná na vrstevnatosť slieňovcov a ich puklinový systém. Platí, že vrstvy, ktoré sú pevnejšie a kompaktnějšíe, sú spravidla priepustnejšie, ako viac zvetrané plastickejšie slieňovce. Výdatnosť je cca  $7 \cdot 10^{-8}$  l/s. Hoci sú polohy slieňovcov považované za hydrogeologické izolátory, v určitých prípadoch nie sú ich výdatnosti malé. Závisia na mocnosti a rozpukaní pevnejších polôh slieňovcov. Hlavný smer prúdenia podzemnej vody je severovýchodný až východný, podľa spádnice svahu (Záruba, J., 2011).

### **Pyroklastické horniny a vyvreliny**

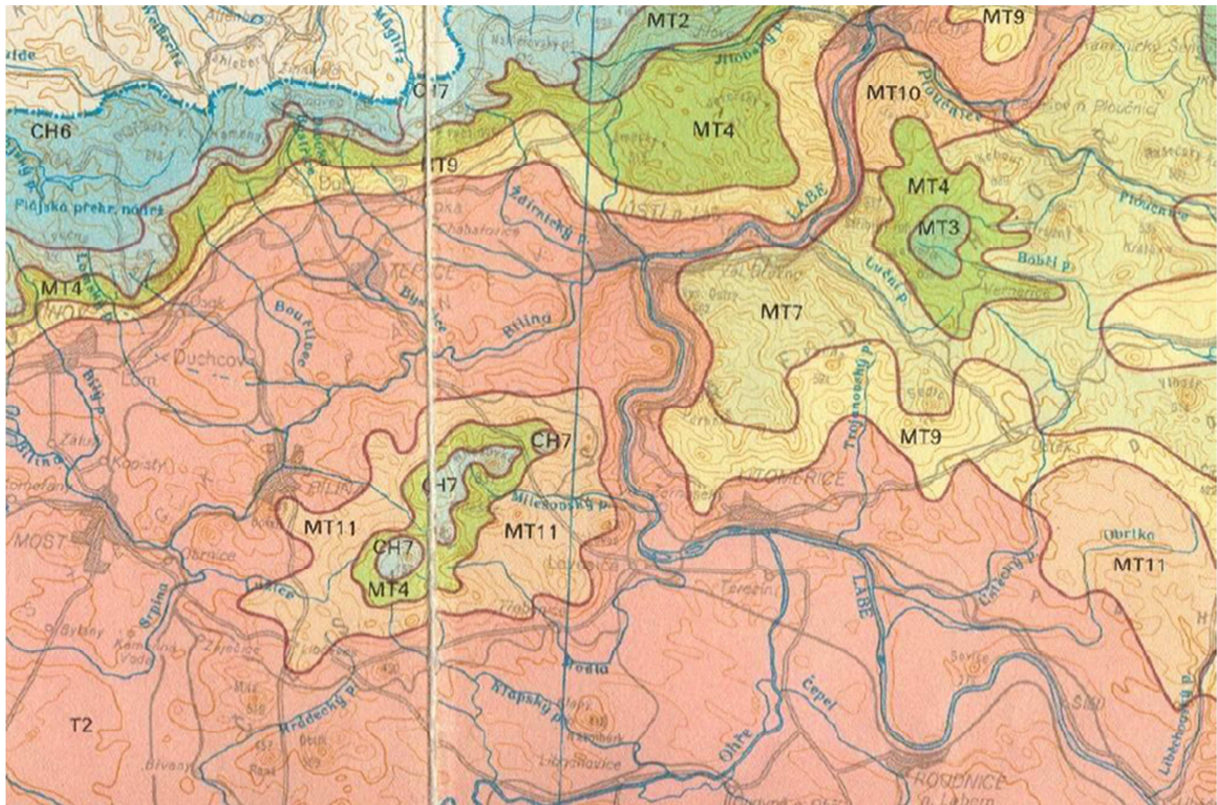
Navzájom sa lýšia druhom aj stupňom priepustnosti. Pyroklastické horniny, v tomto prípade terciérne tufy, majú prielomovú priepustnosť, vyvreliny sú charakteristické puklinovou priepustnosťou. Priepustnosť vulkanitov overená vo vrtoch sa pohybuje v rádoch  $x \cdot 10^{-8}$  l/s až  $x \cdot 10^{-9}$  l/s. Vlastné ložisko Dobkovičky je puklinovo priepustné. Je možné predpokladať, že väčšina infiltrujúcich zrážok je odvedená puklinami na nepriepustnú bázu puklinového

systemu a odvedená ďalej do sutí svahu smerom východne od lomu, čo podľa správy z r. 2005 nie je problém ani pri veľkých zrážkach a netreba robiť žiadne špeciálne práce opatrenia pre odvodnenie lomu (Pechar, 2005).



## 5 Klimatické pomery širšieho okolia

České stredohoří je klimaticky veľmi rozmanité vďaka členitému reliéfu. Klíma je závislá na sklone a orientácii jednotlivých úbočí, na horninovom zložení a rozmiestnení jednotlivých kopcov a dôležitú úlohu tu tiež hrá údolie rieky Labe s teplotnými inverziami. Podľa Quittovej klasifikácii sem parí 8 klimatických oblastí (Obr. 4).



Obr. 4: Mapa klimatických pomerov českého stredohoří (Quitt, 1971 in Suchý, 2014)

Teplá oblasť MT11 prevláda v juhozápadnej časti, je charakterizovaná dlhým, teplým a suchým letom, mierne teplou jarou a jeseňou a mierne teplou, suchou zimou. Miesta s vyššou nadmorskou výškou patria do oblastí MT4 a CH7 a miesta s nižšou nadmorskou výškou do oblasti T2. Priemerné ročné teploty sa pohybujú od 5,1°C do 9°C. Množstvo zrážok je dané nadmorskou výškou, členitosťou terénu a orientáciou voči svetovým stranám. Suchý a teplý juhozápad vykazuje množstvo ročných zrážok okolo 500 mm, zatiaľ čo okolie Českej Kamenice viac ako 800 mm (Suchý, 2014).

## 6 Zosuvné územie Prackovice

Zosuv Dobkovičky vznikol v známom a dobre zmapovanom zosuvnom území Prackovice, ktoré je charakteristické svojimi svahovými deformáciami, ktorých vznik siaha do minulosti až miliónov rokov. Prakticky celý svah od hrany lomu Dobkovičky až po brehy rieky Labe je postihnutý svahovými pohybmi, ktoré sú morfológicky jasne viditeľné.



*Obr. 5: Terénne elevácie fosilných blokových deformácií pod estákádou Prackovice (foto: P. Kycl).*

*Obr. 6: Zárez diaľničného telesa vo fosilnom blokovom zosuve, viditeľná kra bazaltu sivej farby (vpravo) zaborená do podložných slieňovcov hnedozelenej farby (vľavo) (foto: P. Kycl)*

Svahové deformácie v záujmovom území môžeme rozdeliť na fosilné a súčasné. V nasledujúcom texte sú stručne popísané staršie mapovacie práce, ktoré prebehli v rokoch 2009 – 2011.

### 6.1 Fosilné blokové svahové deformácie

Zastupujú fosilné blokové pohyby bazaltoidov po plastickom slieňovcovitom a ílovcovitom podloží. Postupným pohybom smerom po svahu sa bloky zabárali a nakláňali smerom do zadu späť do svahu, boli rozvolňované a rozpadávali sa na menšie časti. Pohyby tohto typu sú dnes považované za už ukludnené, pretože prebiehali za iných klimatologických podmienok. Akumulácie blokových zosuvov sú viditeľné na obr. 6, 7 a 8.



Obr. 7: Zvetraná akumulácia blokových zosuvov (foto: P. Kycl)

Obr. 8: Rozťažovaná akumulácia blokových zosuvov v záreze diaľnice (foto: P. Kycl)

## 6.2 Mladšie a recentné svahové deformácie

Na obr. 9 sú zobrazené dokumentované mladšie zosuvné javy v dosahu 100 m od telesa diaľnice, upravené podľa Suchého (1997).

Zosuv č. 1 a č. 2 – Dva zosuvy zmapované v oblasti kameňolomu Prackovice. Sú to zosuvy s rotačne planárnou šmykovou plochou. V súčasnom stave sú stabilizované železobetónovými stenami.

Zosuv č. 3 – Zosuv v hornej časti lomu pod Debusom. V roku 2009 aktívny zosuv prúdového tvaru, ktorý je vytvorený na staršom zosuve z roku 1969, keď sa zrútila časť lomovej steny pohybom po rotačnej šmykovej ploche. V odlučnej stene sú dokumentované slieňovce, tufitické íly a tufy. Rozmery zosuvu sú 200 m na dĺžku a 100 m na šírku. Pohyby sa opakujú periodicky každú jar, ale už v malom rozsahu, pretože čelo zosuvu sa zastavilo na plochom reliéfe bývalého lomu.

Zosuv č. 4 – Zosuv južne od kameňolomu Prackovice. Šmyková plocha je rotačne planárna vytvorená na zvetraných slieňovcoch, čelo zosuvu je nevýrazné. Dnes je zosuv dočasne ukludnený.

Zosuv č. 5 a č. 6 – Zosuvy v južnej časti mapovaného územia. Oba sú dočasne ukludnené či čiastočne aktívne (Kycl, P. et. al 2009).





Obr. 9. Mapa dokumentovaných mladších zosuvných javov v oblasti okolo trasy diaľnice D8. Čiernou čiarou je vyznačená trasa diaľnice D8. Červenou líniou je vyznačený približný obrys zosuvu Dobkovičky z roku 2013, hnedou farbou sú vyznačené zmapované svahové pohyby, číslami sú označené jednotlivé mladšie zosuvy. Upravené podľa Rybáře a Suchého, 1997.

### 6.3 Recentné zosuvy vyvolané stavbou diaľnice D8

Menšie zosuvy v zárezoch diaľnice prechádzajúcej cez záujmové územie vznikali už skôr. Dochádzalo k nim z dôvodu dočasného odľahčenia nestabilných svahov tvorených zvetranými ílovcami. Jeden z nich z roku 2009 je na obr. 10. Je to frontálny zosuv šírky 15 m a dĺžky 5 m s hĺbkou šmykovej plochy približne 1,5 m. Zosunul sa na km 56,500 (na mieste kde o 4 roky nastal zosuv Dobkovičky).



*Obr.10: Menší zosuv na km 56,500 z r. 2009 (foto: P. Kycl)*



*Obr. 11: Významnejší zosuv na rovnakom mieste z r. 2010 (foto: P. Kycl)*

V roku 2010 vznikali v zárezoch diaľnice v záujmovom území nové aktívne zosuvy, z ktorých bol najväčší opäť na km 56,500 (Obr. 11). Tento zosuv bol pokračovaním zosuvu z roku 2009. Odlučná stena bola v miestach odvodňovacieho žľabu v hornej etáži. Čelo zosuvu bolo dokumentované v dolnej etáži na úrovni budúcej vozovky. Dĺžka zosuvu bola cca 40 m a šírka okolo 20 m, šmyková plocha bola pravdepodobne v hĺbke až 5 m. V zárezoch diaľnice v týchto miestach bolo dokumentované pomerne veľké množstvo malých, v niektorých prípadoch ešte iniciálnych zosuvov (Kycl, P., 2010).

V roku 2011 boli zárezy diaľnice zasanované kamennými stabilizačnými a odvodňovacími rebrami širokými 3 m, s osovou vzdialenosťou 10 m (Obr. 12). V miestach aktívnych zosuvov došlo k výmene zosunutých hmôt za kamenivo. Podľa ŘSD bolo toto riešenie len provizórne a nedostatočné!



*Obr. 12: Pohľad sa upravené svahy zárezov diaľnice D8 (foto: P. Kycl)*



## 7 Zosuv Dobkovičky

Jedná sa o zemný prúdový zosuv po rovinnej šmykovej ploche, dĺžky 470 m a šírky 200 m. Diaľnicu zasiahol a porušil v úseku km 56,300 až 56,500, úplne zničil železničnú trať v úseku Dobkovičky – Radejčín a strhol časť zariadenia a veľkú časť výsyvky drveného kameniva z kameňolomu Dobkovičky. Šmyková plocha bola prieskumom firmy AZ Consult, spol. s.r.o. (2014) identifikovaná v hĺbke 4,0 až 6,5 m pod súčasným povrchom terénu, a v čele zosuvu bolo podložie zosunutých hmôt v hĺbke 9,0 m.

Prvé zátrhy zosuvu sa objavili v oblasti kameňolomu Dobkovičky 3. júna 2013. Predchádzali im silné dažďové zrážky, ktoré trvali už od 29. mája 2013. Zrýchlenie pohybov a aktivácia zosuvu nastala 6. júna 2013 vo večerných hodinách. Do 12:00 hod 9. júna 2013 sa čelo zosuvu posunulo o 30 m. Celkový horizontálny pohyb v strednej časti zosuvu bol 49 m. Pohyby dosiahli rýchlosť až 1 m/h dňa 8. júna 2013 (Kycl, P., 2013).



*Obr. 13: Letecký snímok zosuvu Dobkovičky, jún 2013 (zdroj: interenet).*

## 7.1 Geotechnický prieskum zosuvu

Inžiniersko-geologický prieskum zosuvu Dobkovičky bol spracovaný firmou AZ Consult, spol. s.r.o. k termínu 06/2014. Účelom prieskumu bolo poskytnutie informácií o geotechnických, inžiniersko-geotechnických a hydrogeologických pomeroch priestoru zosuvného územia, ktoré postihuje diaľnicu D8 v úseku km 56,300 - 56,500. Geotechnický prieskum bol robený v tretej geotechnickej kategórii v zmysle TP 76 - Geotechnický prúzkum pro pozemní komunikace s ohledem na specifika sesuvného území.

### Prieskumné práce

**Geologické mapovanie** vrátane leteckého geodetického zamerania v merítku 1:1000 - Mapovanie bolo prevzaté od ČGS (Kycl, Roháč, mapovanie 02/2014).

**Vrtné práce** – Počas prieskumu bolo zrealizovaných 12 inžiniersko - geologických vrtov (IG) vrtaných jadrovo na sucho, priemeru 120 mm, z toho 5 vrtov využitých ako inklinometrické vrty (IND) a 5 vrtov použitých pre hydrogeologické pozorovania (HV). Ostatné dva vrty boli po dokumentácii zlikvidované. Pre meranie pórových tlakov (MPT) bolo navrhnutých 9 vrtov priemeru 56 mm a 2 MPT budú vložené do IG vrtov. Celková metráž vrtných prác bola 439,0 bm a vykonávali sa v období 15.4.2014 až 20.6.2014. K vrtným prácam boli pridané aj dve kopané sondy (KS).

**Geodetické práce** – pomocou geodetických prác sa vytýčili všetky prieskumné diela a geofyzikálne profily. Prebehlo ich polohopisné a výškopisné zameranie.

**Geofyzikálne meranie** – 4 priečne profily a 2 pozdĺžne profily, kde boli použité rôzne metódy. Zhotoviteľ geofyzikálneho prieskumu je firma Geotrend s.r.o.

Plytká refrakčná (MRS) a refrakčno-reflexná seismika (MRRS) umožňuje určiť rýchlosť šírenia P- vln horninami. Podľa rýchlosti šírenia seismických vln je možné rozdeliť horninové prostredie do kvazihomogenných celkov. Umožňuje tiež rozpoznať rozhranie nedávno premiestnených, nakyprených, horninových hmôt od neporušeného podložia.

Elektrická rezistívna tomografia (ERT) je kombinácia profilovacej a sondovacej odporovej metódy využívajúca Schlumbergerovo usporiadanie elektród. Výsledkom je rezistívny rez. Umožňuje vymedziť litologické celky, šmykové plochy a pod.

Vertikálne elektrické sondovanie (VES) umožňuje kvantitatívne určiť merné elektrické odpory jednotlivých vrstiev a tým aj rozhrania týchto vrstiev. Výsledky tohto merania umožňujú určiť porušenosť a priepustnosť rôznych horninových vrstiev.

Magnetometria (MM) umožnila určiť a rozlíšiť bazaltoidné telesá na základe merania vektoru magnetického poľa.

Metóda veľmi dlhých vln (VDV). Pomocou tejto metódy je možné zistiť a rozpoznať vodivé anomálie až do hĺbky 70m. Tieto anomálie sa s najväčšou pravdepodobnosťou podieľajú na dotovaní svahu vodou.

Metódy užitej geofyziky sú opreté o výsledky vrtného prieskumu.

**Karotážne vrty** - karotáž bola robená v každom vrte pre určenie prítokov vody do vrtu a určenie koeficientu filtrácie, pre určenie litológie a litologických hraníc, zistenie priepustných a nepriepustných horizontov.

**Monitoring svahovej deformácie** - prvky geotechnického monitoringu boli inklinometrické vrty, vrty s meradlami pórových tlakov a vrty vystrojené pre sledovanie hladín podzemnej vody.

**Inklinometria (IND)** – celkovo bolo inklinometricky vystrojených 7 inžiniersko-geologických vrtov s celkovou metrážou 193 bm. Inklinometrické meranie slúži k identifikácii polohy šmykovej plochy a veľkosti rýchlosti posunu na nej.

**Meranie pórových tlakov (MPT)** – meranie prebiehalo v dňoch 9.5. – 15.5.2014. Celkovo bolo použitých 11 meračov pórových tlakov v 7 vrtoch v rôznych hĺbkach 4,5m – 14,5m. Čidlá (typ 4500S Geokon) boli uložené v textilnom vaku vyplnenom pieskom, spustené do vrtu a zazátkované bentonitovou vrstvou a vrty boli zainjektované alebo zasypané.



**Hydrogeologický prieskum** – jedná sa o samostatne spracovaný podrobný hydrogeologický prieskum zisťujúci úroveň hladín podzemnej vody, hydraulické a hydrodchemické vlastnosti jednotlivých zvodní. Na to bolo určených 6 vystrojených hydrogeologických vrtov a 3 nevystrojené inžiniersko-geologické vrty. Účelom prieskumu bolo zistiť úrovne narazených a ustálených hladín podzemnej vody, merania vzostupu hladiny vody, hodnoty priepustnosti zemín, odber vzorkov vody k stanoveniu agresivity vody a interpretácia zistených dát vzhľadom na zosuv.

**Laboratórne skúšky** - Boli vykonané indexové skúšky, edometrické skúšky stlačiteľnosti, krabicové šmykové skúšky, skúšky pevnosti a 4 CIUP skúšky na vzorkách z 2 sond. Bolo odobraných 94 ks vzoriek zemín a 13 ks vzoriek podzemnej vody. Skúšky boli vykonané a vyhodnotené v laboratóriách Gematest, spol. s.r.o., Arcadis CZ, a.s. a ALS Czech Republic, s.r.o.

## 7.2 Návrh sanačných opatrení

Hlavným cieľom sanačných opatrení zosuvu je znovuoobnovenie stavby diaľnice v pôvodnej línii a zvýšenie stupňa stability porušeného svahu nad ňou. Za hlavnú príčinu zosuvu sa považuje podzemná voda, ktorá zvýšením pórových tlakov znížila šmykové napätie v zemine a nepriaznivo ovplyvnila celkovú stabilitu svahu. Primárnym cieľom je teda hĺbkové odvodnenie svahu a tým zníženie pórových tlakov v oblasti šmykovej plochy. Pre obnovenie pôvodnej trasy diaľnice sú potrebné terénne úpravy, zahŕňajúce odťaženie časti akumulácie v hornej tretine zosuvu. Konečná stabilizácia telesa diaľnice bude zaistená statickou konštrukciou.

### **Odvodnenie**

Povrchovú vodu bude zachytávať zberná otvorená priekopa, ktorá odvedie vodu mimo zosuvné teleso. Cieľom hĺbkového odvodnenia je zníženie pórových tlakov v zemine odvodnením svahu pomocou hĺbkových odvodňovacích rebier.

## **Terénne úpravy**

Výsledkom terénnych úprav je dosiahnutie rovnováhy medzi aktívnymi a pasívnymi silami v zosuve. Terénne práce zahŕňujú úpravu povrchu zosuvu, zarovnanie depresí dotujúcich svah povrchovou vodou.

## **Statické konštrukcie**

Statická konštrukcia je navrhnutá v hornej línii nad diaľnicou. O jej detailoch sa vedú v súčasnej dobe odborné rokovania a finálny návrh neból v dobe zpracovania diplomovej práce známy.

## 8 Mapovanie

### 8.1 Archívne mapovacie práce

Zosuvné územie Prackovice bolo do dnešnej doby v súvislosti k stavbe diaľnici D8 už niekoľkokrát zmapované (Pašek, 1972, Pašek, Kudrna, 1996, Suchý, 1997, Valečka, 2003). Zmapované územie popri diaľnici je postihnuté svahovými pohybmi rôzneho typu a veku. Svahové pohyby blokového typu postihujú okraje vulkanického príkrovu Kubačky. Rieka Labe postupne erodovala sliene z pod báze bazaltového príkrovu. Týmto postupným erodovaním sa neustále porušovala rovnováha a jednotlivé kry sa posúvali po svahu smerom dolu. Kry sa posunom lámali na menšie kusy a pôvodné blokové pohyby sa menili na zosúvanie sutí po ílovom podloží. Bazaltové kry sa v teréne morfológicky výrazne prejavujú (Obr. 5). Vytvárajú stupňovité elevácie, postupne sa zmenšujúce po svahu dolu.

Ďalším zmapovaným typom svahových pohybov boli fosilné zosuvy s rotačnou alebo kombinovanou šmykovou plochou v deluviálnych horninách a v povrchových zvetraných partiách slieňovcov. Tieto zosuvy postihujú svahy viac ako 15 m hlboko, čo bolo potvrdené vrtnými priezkumnými prácami (napr. Plšková, Záruba 2014).

Recentné svahové pohyby dosahujú menších mocností okolo 5 až 7 m. Recentné zosuvy boli zistené na viacerých miestach po celom zosuvnom svahu nad Prackovicami. Niektoré z nich dosahovali rozmerov až 400 m na dĺžku a 100 m na šírku (Pašek, 1973).

### 8.2 Metodika tvorby mapy (príloha č. 1)

Mapovanie zosuvu som začal vo februári roku 2014, keď bola ešte dobrá viditeľnosť terénu z dôvodu nezalustenej vegetácie. Ako mapový podklad som použil leteckú fotografiu zosuvu mierky 1:1000 zhotovenú v zimných mesiacoch (ArgusGeoSystém pre ČGS), na ktorej boli dobre viditeľné hranice zosuvu a niektoré morfológické znaky zosuvu. Prvé dva dni som mapoval so školiteľom Ing. Petrom Kyclom, ktorý mi dostatočne vysvetlil zásady mapovania, potom som mapoval sám. Do mapy som zakreslil všetky viditeľné morfológické znaky, hranice zosuvu, odlučné steny, bočné valy, depresie a pod. Geologickým kompasom som zameriaval smery trhlín a hraníc zosuvu, pásmom som meral roztvorenie a hĺbku trhlín,

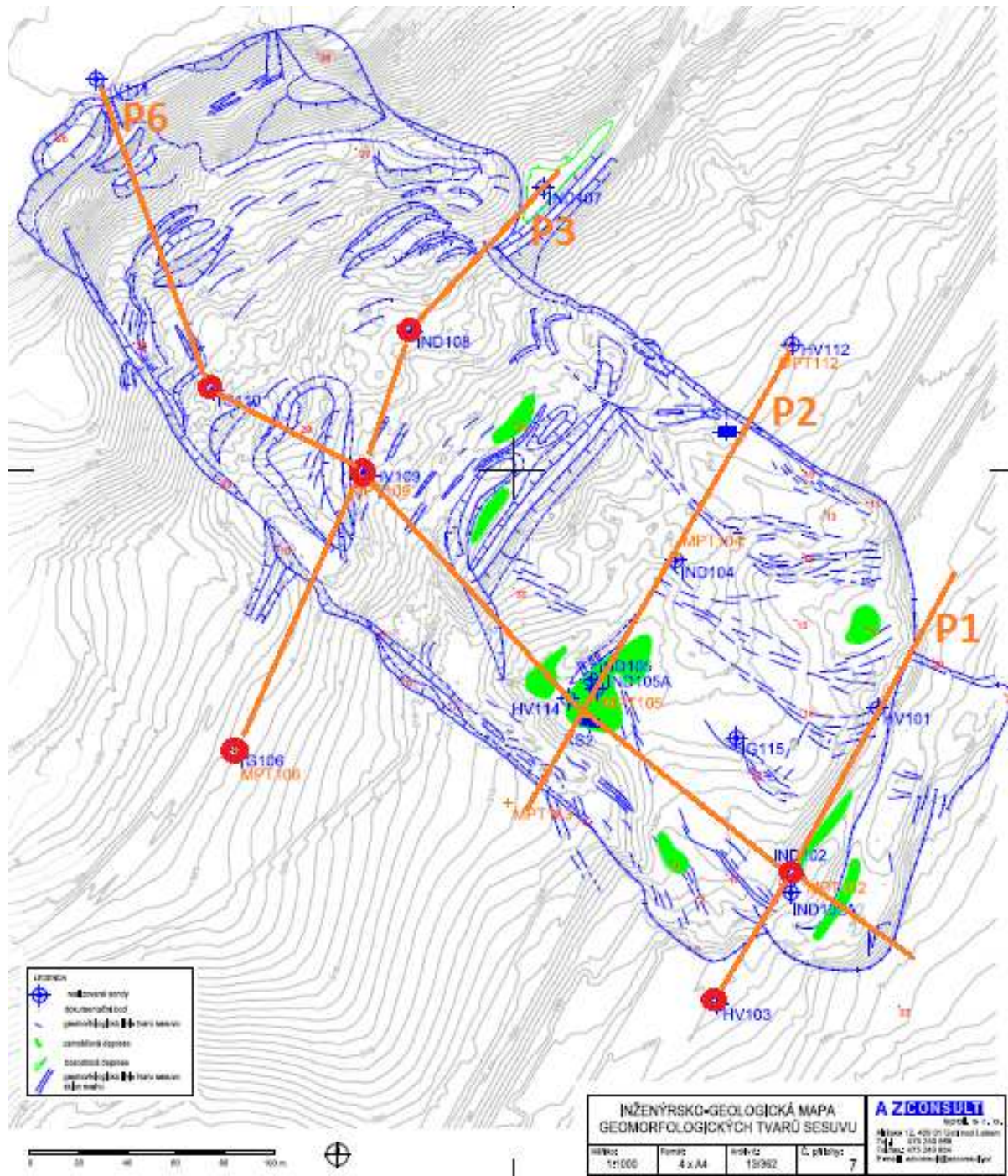
digitálnym diaľkomerom ich dĺžku. Mapovanie v niektorých miestach zosuvu sťažovali potrhane koľajnice a vyvrátené stromy ktoré boli hlavne v strednej časti zosuvu. Celkovo som pri mapovaní zaznamenal 38 vlastných dokumentačných bodov (Príloha 3).

Mapa (Príloha 1) je kreslená ručne, k nej je priložená aj vlastná legenda (Príloha 2). Mapa bola neskôr Českou geologickou službou zdigitalizovaná (Obr. 14).

### 8.3 Popis zosuvu

Odlučná stena zosuvu sa nachádza na hrane kameňolomu Dobkovičky, v miestach pôvodnej depónie drteného kameniva. Odlučná stena (DB25) má výšku 10 až 15 m a tiahne sa na šírku približne 140 m. Z polovice jej výšky je zasutená drteným kamenivom. Drtené kamenivo bolo zosuvom roznesené 60 m po svahu smerom dole. Pod odlučnou stenou je rôzne po svahu rozmiestnené poškodené vybavenie kameňolomu. Váha pre nákladné vozidlá je po svahu zosunutá približne 20 m, pritom nie je naklonená, je stále vo vodorovnej polohe. V strednej časti, 25 m pod odlučnou hranou ústí zo svahu betónová skružová rúra priemeru 1m.

Terén je postupne smerom dole zvlnený, ťažko priestupný z dôvodu popadaných stromov dĺžky až do 20 m. Po stranách zosuvu sa v strednej časti nachádzajú kamenné polia s blokmi bazaltu cca 0,5 m. V mieste pôvodnej železnice je veľká bazaltová kra rozmerov 10 x 20 m (DB29). Pôvodný železničný násyp výšky 5 m a dĺžky 85 m (DB38) je aj spolu s koľajnicami posunutý po svahu o 49 m. Ďalšia časť poškodených koľajníc je aj z podvalmi roznesená po svahu medzi pôvodným a zosutým násypom. V bočnej odlučnej stene na západnej strane zosuvu boli jasne viditeľné striácie, vytvorené pohybom zosutých hmôt. Orientácia striácií bola nameraná geologickým kompasom 115°/15°(DB19).



Obr. 14: Zdigitalizovaná mapa geomorfologických tvarov zosuvu Českou geologickou službou (upravené Suchý, 2014). Červenými značkami sú označené vrty z ktorých boli odobraté vzorky. Oranžovou farbou sú naznačené profily.

Zosuv v spodnej časti poškodil teleso diaľnice, čo sa potvrdilo ako aj vrtným prieskumom, tak aj kamerovou obhliadkou kanalizácie pod vozovkou. Akumulačná časť končí až 50 m pod

osou diaľnice D8. V spodnej časti je na povrchu veľké množstvo jasne viditeľných sústav trhlín (DB12, DB16, DB17, DB18), hĺbky presahujúcej 2 m, s roztvorením cca 0,5 m a dĺžkou až 70 m.

Pod zosuvom približne 20 m od akumuláčnej časti je viditeľné zamokrenie terénu na ploche 50 m<sup>2</sup> so stojacou vodou s maximálnou hĺbkou 10 cm (DB20). Voda bola ešte viditeľná v malých zosuvných jazierkach s plochou cca 1,5 m<sup>2</sup> v strednej časti zosuvu pri severnej (DB34) aj južnej (DB6) bočnej hrane zosuvu.

## 9 Pevnosť zemín

### 9.1 Teoretické základy

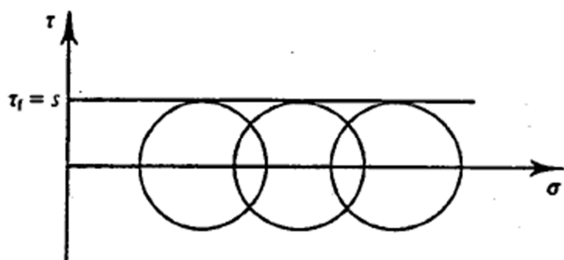
Atkinson (2007) popisuje pevnosť zeminy ako maximálne napätie, ktoré je zemina schopná vydržať pred tým, ako skolabuje. Popisuje dva kritéria porušenia: prvé, súdržnosť (Tresca criterion), hovorí, že materiál dôjde k porušeniu ak sa Mohrova kružnica dotkne obálky (Obr. 15), popísanej vzťahom (9.1):

$$\tau' = c' \quad (9.1)$$

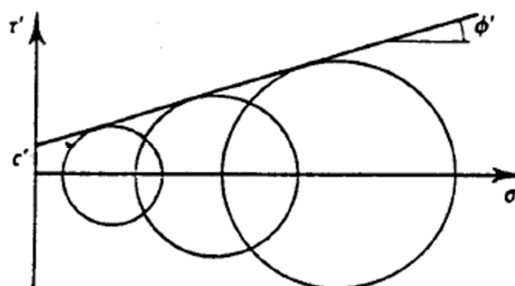
kde  $c'$  označuje súdržnosť materiálu a  $\tau'$  šmykové napätie. Druhé kritérium (9.2) sa nazýva Mohr - Coulombové (Obr. 16) a hovorí, že materiál sa poruší, ak sa Mohrova kružnica dotkne obálky popísanej rovnicou:

$$\tau' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (9.2)$$

kde  $\sigma'$  je normálové napätie,  $\phi'$  je uhol vnútorného trenia materiálu. Sú to efektívne parametre zemín, pretože podľa princípu efektívnych napätí, odpor k šmyku môžu spôsobiť len pevné časti zeminy-skelet (Myslivec, 1970).



Obr. 15: Trescovo kritérium porušenia.



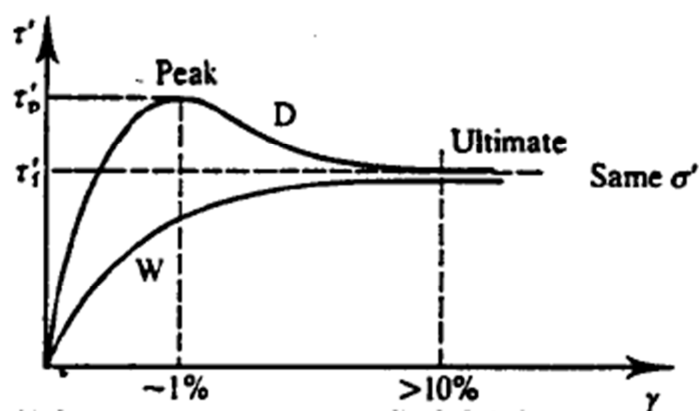
Obr. 16: Mohr-Coulombovo kritérium porušenia.

## Vrcholová pevnosť

Je to maximálne šmykové napätie, ktoré je zemina schopná vydržať. Je závislá na štruktúre zeminy, v hrubozrnných zeminách závisí na hutnosti, v jemnozrnných na stupni prekonsolidácie.

V hrubozrnnnej hutnej zemine, napríklad v uľahnutom piesku, rastie šmykové napätie veľmi rýchlo, už pri malom posune, do medznej hodnoty nazývanej vrcholová pevnosť (jasne viditeľný vrchol na krivke, obr. 17). Po dosiahnutí vrcholovej pevnosti klesá tangenciálne napätie  $\tau$  do limitnej hodnoty, ktorú nazývame kritická pevnosť. Naopak v kypróm piesku stúpa pevnosť do kritickej hodnoty, bez dosiahnutia vrcholu, ako pri vrcholovej pevnosti. V kypróm piesku je teda vrcholová pevnosť rovná kritickej. Vrchol na krivke je spôsobený dilatanciou materiálu. Dilatanciou sa rozumie energia navyše potrebná pre zvýšenie objemu materiálu pre šmyk. Uľahnutý piesok má zrná uložené najtesnejším možným spôsobom, preto pre šmyk treba väčšiu energiu ako v kypróm piesku.

V íloch je to podobné ako v pieskoch. Prekonsolidovaný íl má podobnú krivku v grafe závislosti pevnosti v šmyku s posunom ako uľahnutý piesok, a normálne konsolidovaný íl ako kyprý piesok. V krivke pre prekonsolidovaný íl tiež sledujeme vrchol ako pri uľahnutom piesku, pretože pri prekonsolidácii sú zrná ílu do seba viac zakliesnené. Pri ílovitých zeminách nie je ale kritická pevnosť pevnosťou konečnou, pretože pri pokračujúcom šmyku klesá až na hodnotu reziduálnej pevnosti (Mašín, 1999).



Obr. 17: Priebeh šmyku uľahnutého a kyprého piesku (Atkinson, 2007)

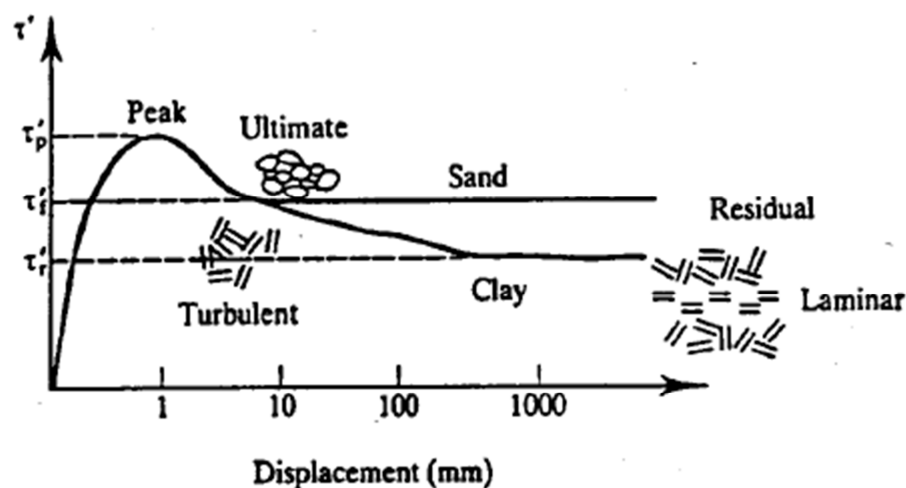


## Kritická pevnosť

Zemina vždy dosiahne limitnú hodnotu pevnosti nazývanú kritická pevnosť, bez ohľadu na to, akú mala pôvodnú štruktúru. Konečnou pevnosťou je ale len v hrubozrnných zeminách. Na šmykovej ploche sa hrubozrnná zemina pri dostatočne dlhom posune dostane do stavu turbulentného tečenia, ktoré je charakterizované určitou kritickou pórovitosťou. Kyprá zemina zníži svoju pórovitosť a hutná naopak dilatuje. Kritická pórovitosť na šmykovej ploche je vždy pre danú zeminu rovnaká, konštantná a preto aj pevnosť je vždy rovnaká.

## Reziduálna pevnosť

Najnižšia šmyková pevnosť, akú je materiál schopný vydržať sa nazýva reziduálna pevnosť. Dochádza k nej po veľmi dlhom posune a vyskytuje sa len u jemnozrnných zemín, ktoré obsahujú ploché ílové minerály. Tie sa pri tomto dlhom posune usporiadajú laminárne v smere potenciálnej šmykovej plochy a následne po sebe kľžu (Obr. 18). V prípade piesku a iných zemín s guľatými zrnami nie je možnosť laminárneho usporiadania týchto častíc možná, preto je reziduálna pevnosť rovná kritickej pevnosti. Zatiaľčo pri íloch môže byť reziduálny stav len 50% kritickej pevnosti. To je dôležité pri návrhu stavieb v zosuvných lokalitách (Atkinson, 2007).



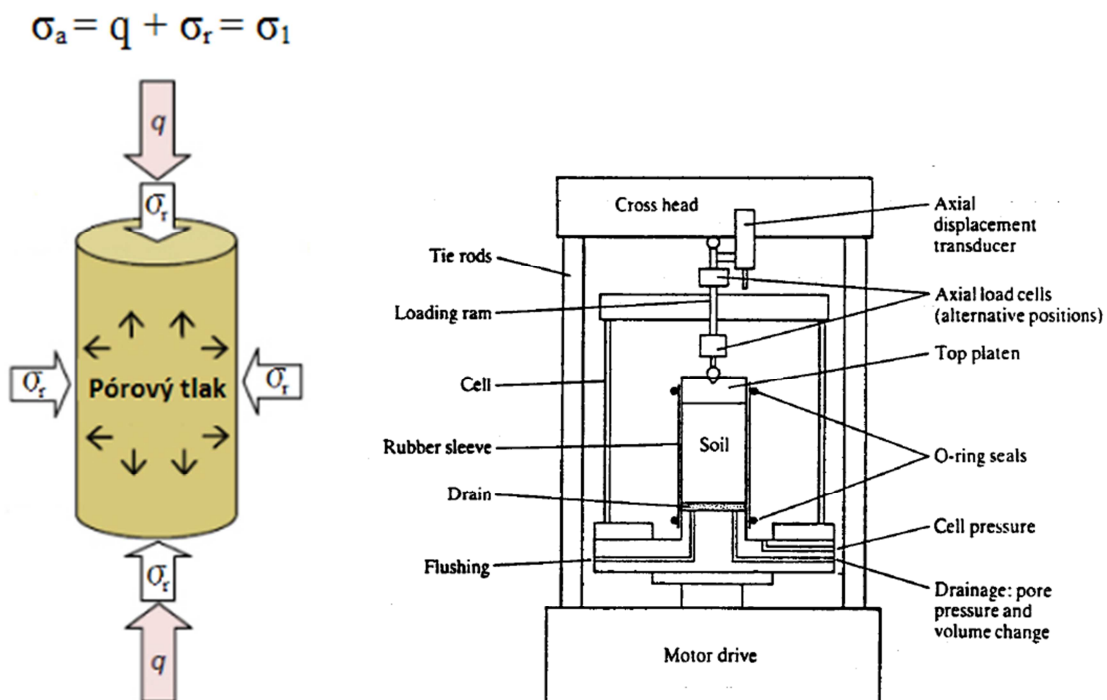
Obr. 18: Závislosť šmykového napätia na posune (Atkinson, 2007)

## 9.2 Laboratórne skúšky

### 9.2.1 Triaxiálny prístroj

Triaxiálny prístroj je jeden z najviac univerzálnych a v geotechnickej praxi široko využitelných laboratórnych prístrojov pre skúšky na zeminách a horninách. Schéma prístroja je popísaná na obrázku 20. Zo skúšky je možné získať parametre dôležité pre návrh rôznych geotechnických konštrukcií. Jeho výhodou je možnosť v priebehu skúšky sledovať odvodňovanie vzorky a merať v nich pórový tlak vody.

Pre test sa používajú vzorky valcového tvaru rozmerov výšky a priemeru v pomere 2:1 (38 mm rozmer šírky a do 100 mm rozmer výšky), obalené gumovou membránou a na podstavách vybavené pórovitými doštičkami (Atkinson, 2007). Vzorka sa vkladá do triaxiálnej komory, ktorá je následne naplnená vodou, ktorá na vzorku pôsobí radiálnym napätím  $\sigma_r$ . Vzorka je namáhaná deviátorovým (osovým) napätím  $q$ , ktoré je rovné rozdielu  $\sigma_a - \sigma_r$ . Axiálne napätie  $\sigma_a$  je vyvodzované pomocou hydraulického piestu (Obr. 19).



Obr. 19: Tlaky pôsobiace na vzorku v triaxiálnej komore, upravené podľa [www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)

Obr. 20: Všeobecná schéma triaxiálneho prístroja (Atkinson, 2007)

Izotropné komorové napätie je vyvodzované pomocou hydraulických GDS kontrolerov, ktoré tiež umožňujú zaznamenávať zmeny objemu v komore a vo vzorku a vytvárať pórové tlaky vo

vzorku. Ďalej je prístroj vybavený snímačom týchto pórových tlakov a meračom posunu komory v osovom smere. Deviatorové napätie je sledované snímačom vertikálneho napätia loadcell. Všetko je to zaznamenávané pomocou počítaču pripojeného k prístroju.

Loadcell a snímač pórových tlakov je potrebné pred každou skúškou kalibrovať.

### 9.2.2 Vzorky

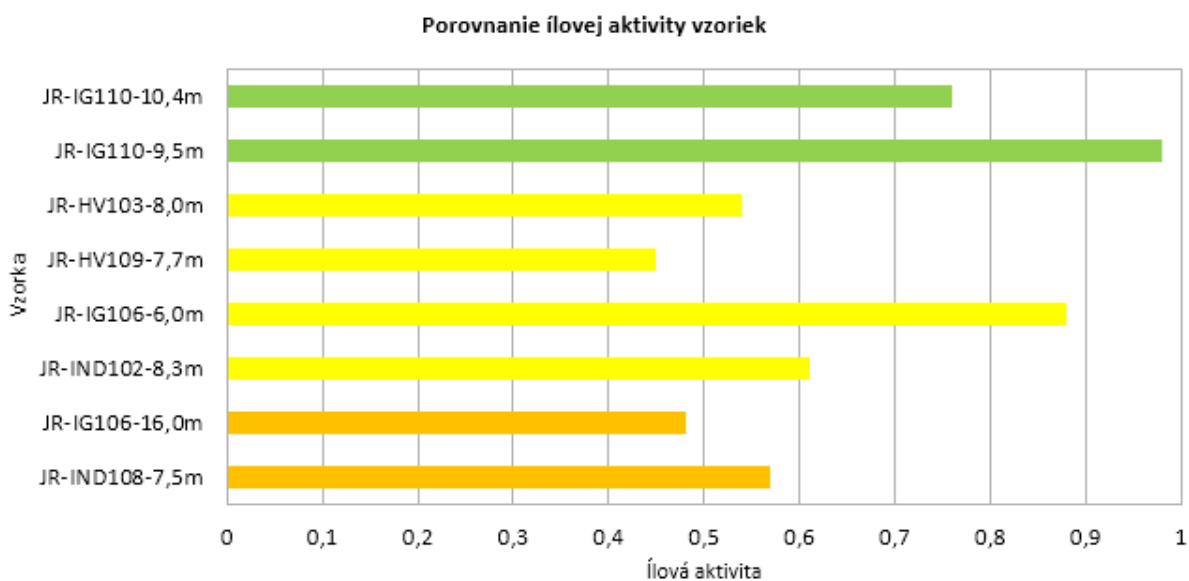
K dispozícii som mal vzorky z 8 vrtov z rôznych hĺbok, ktoré som odobral pri prieskume zosuvu, ktorý vykonávala firma AZ Consult, spol. s.r.o. Názov vlastných vzoriek som volil obdobne ako firma AZ Consult: JR-označenie vrtu. Vzorky som odoberal približne z rovnakých hĺbok ako zhotoviteľ prieskumu, aby prípadné prevzaté vlastnosti zemín odpovedali čo najviac skutočným vlastnostiam mnou odoberatých vzoriek. Mapa s vyznačenými vrtmi odoberatých vzoriek je na Obr. 14.

Týchto 8 vzoriek som rozdelil pre zjednodušenie do 3 skupín tak, aby každá skupina charakterizovala 1 geotyp. Rozdelenie vzoriek popisuje tabuľka 1.

skupina	názov	hĺbka (m)	názov AZ Consult	hĺbka (m)	hornina	geotyp	$W_L$	$W_P$	$I_p$	$I_A$	$I_A$ Prepoč.
1	JR-IND 102	8,3	IND 102	8,4	zvetr. slieňovec	K I b	64	29	35	0,63	0,61
1	JR-HV 103	8	HV 103	6,5	zvetr. slieňovec	K I a	70	30	40	0,54	0,54
1	JR-IG 106	6	IG 106	8,5	zvetr. slieňovec	K I b	66	32	34	0,89	0,88
1	JR-HV 109	7,7	HV 109	7,7	zvetr. slieňovec	K I b	58	30	28	0,45	0,45
2	JR-IND 108	7,5	IND 108	7,5	zvetr. slieňovec	K II	56	28	28	0,67	0,57
2	JR-IG 106	16	IG 106	17,6	zvetr. slieňovec	K II	55	27	28	0,52	0,48
3	JR-IG 110	9,5	IG 110	9	tuftický íl	PN I	80	50	30	1,03	0,98
3	JR-IG 110	10,4	IG 110	10,5	tuftický ílovec	PN II	79	53	26	0,9	0,76

Tab. 1: Rozdelenie vzoriek do skupín a hodnoty niektorých vlastností

Z každej skupiny som vybral 1 vzorku, ktorá má z celej skupiny pravdepodobne najnižšiu kritickú pevnosť. Pri výbere som zohľadňoval ílovú aktivitu jednotlivých vzorkou, ktorú som prevzal zo správy prieskumu firmy AZ Consult, spol.s.r.o. Ílová aktivita je podľa Skemptonova pomeru indexu plasticity  $I_p$  k podielu ílovej frakcii. S narastajúcou ílovou aktivitou minerálov totiž klesá kritická pevnosť zeminy (Wood, D., M., 1990)



Tab. 2: Výber vzorky na základe ílovej aktivity zeminy

**Žltá skupina K1** – vybratá vzorka JR-IG106-6m je šedý slínovec, úplne zvetraný na íl.

**Oranžová skupina K2** – vybratá vzorka JR-IND108-7,5m je šedý slínovec, úplne zvetraný na íl.

**Zelená skupina PN** – vybratá vzorka JR-IG110 – 9,5m je červeno hnedý piesočnatý tufitický íl.

Ílovú aktivitu som však prepočítaval, pretože podľa normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12- Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí, sa konzistenčné medze stanovujú na zemine presiatej cez sito s veľkosťou oka 0,4 mm alebo sitom jemu najpodobnejším. Preto by sa aj pri počítaní ílovej aktivity zeminy mala táto skutočnosť brať v úvahy. Percentuálny podiel ílovej zložky som teda počítal len zo zeminy, ktorá prepadla spomínaným sitom. Po prepočítaní hodnoty poklesli až o 15%. Prepočítané hodnoty sú udané v tabuľke 2.

Kritickú pevnosť vybraných 3 vzoriek som stanovoval pomocou triaxiálneho prístroja. Celkovo bolo uskutočnených 7 CIUP triaxiálnych skúšok (izotropne konsolidovaná, neodvodnená skúška s meraním pórových tlakov ), pre prvú vzorku tri, na ďalších vzorkách dve skúšky na rôznych triaxiálnych prístrojoch. Z technických dôvodov boli úspešné však len tri testy, pre každú vzorku jeden. Skúšky boli robené na rekonštituovaných vzorkách v laboratóriu mechaniky zemín na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Karlovej v Prahe. Všetky skúšky prebiehali podľa platnej normy ČSN CEN ISO/TS 17892-9-Geotechnický průzkum a

zkoušení –Laboratorní zkoušky zemin –Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin.

### 9.2.3 Metodika skúšky

#### Príprava rekonštituovanej vzorky

Vzorky som musel nastrúhať na strúhadle a v mažiari rozdzviť na čo najjemnejšie časti. Podstatou rekonštituovaných vzoriek je príprava kaše s vlhkosťou väčšou, ako je vlhkosť na mädzi tekutosti. Pri tejto vlhkosti nevznikajú pri príprave vzorky miesta vyplnené vzduchom. Preto som vzorku zeminy vymiešaval s destilovanou vodou niekoľko hodín v elektrickom miešači. Po dostatočnom vymiešaní som pripravoval vzorky na ich konsolidáciu.



Obr. 21: Konsolidácia vzoriek

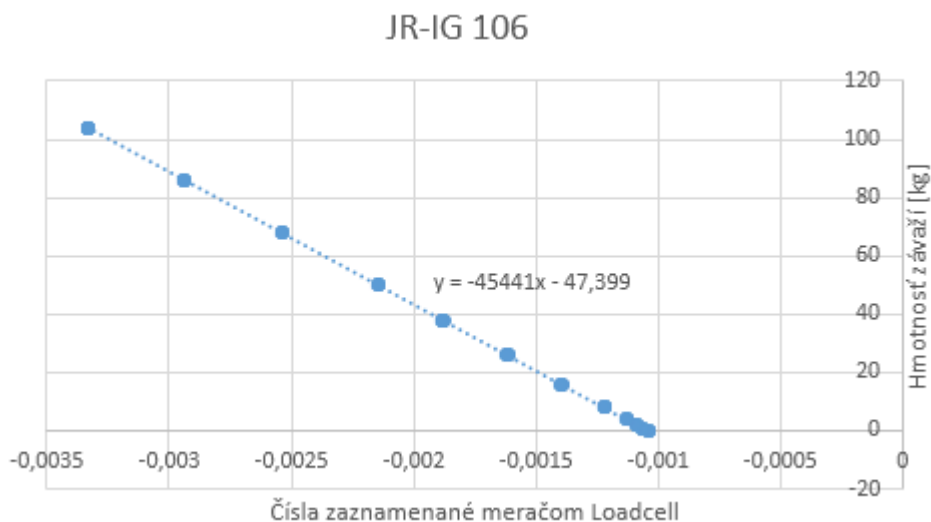


Obr. 22: Vytlačenie vzorky

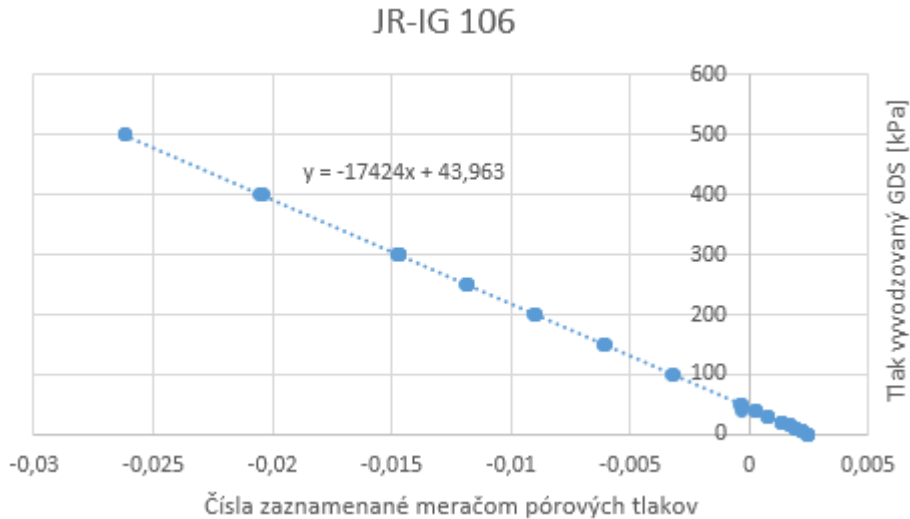
Vzorky jednooso konsolidujú v kovovej rúre (Obr. 21), kruhového priemeru 3,8 cm a dĺžky cca 35 cm. Z oboch strán je rúra vybavená plastovými koncovkami s pórovitými doštičkami, ktorými drénuje voda zo vzorky. Do rúry som širokým lievikom nalial približne 2-3 dcl kaše, priložil drenážne doštičky a koncovky a nechal konsolidovať pri zaťažení cca 70 kPa. Zaťažovanie bolo krokové, 10 kPa za 1 deň. V priebehu konsolidácie treba vzorky neustále navlhčovať destilovanou vodou aby nevysychali. Za koniec konsolidácie som považoval relatívne ukončenie deformácií. Celý proces trval v priemere 10 dní na jednu vzorku.

## Kalibrácie prístrojov

Pred každou jednotlivou skúškou je pre čo najvyššiu presnosť merania potreba urobiť kalibráciu snímača vertikálneho osového zaťaženia Loadcell a snímaču pórových tlakov. Loadcell je elektronický snímač, ktorý meria veľkosť vertikálneho osového zaťaženia. Je priamo v kontakte s roznášacou doštičkou umiestnenou na vzorku. Postup jeho kalibrácie je taký, že snímač loadcell sa vyberie z komory a vloží sa do špeciálneho stojanu, ktorý umožňuje prikladať kovové závažia známej hmotnosti na snímač. Závažia som prikladal od 0 kg vzostupne až po 104 kg, pritom prístroj Loadcell zaznamenával rozličné čísla. Tieto čísla sa následne v tabuľkovom procesore Excel 2013 vynesú do grafu v závislosti na danom zaťažení závažiami. Obrázok 23 ukazuje príklad grafu pre výpočet smernici kalibračnej krivky. Podobne sa postupuje aj pri kalibrácii meraču pórových tlakov pomocou kontroleru GDS. Kontroler GDS bol pripojený k meraču pórových tlakov, za ktorým bol zatvorený kohút vývodu do spodnej drenáže. Na GDS kontroleri som nastavoval hodnoty tlakov vzostupne od 0 kPa až po 500 kPa. Smernicu krivky (Obr. 24) som vypočítal obdobne ako pri Loadcell. Kalibrácie JR-IND108 a JR-IG110 sú súčasťou prílohy 5.



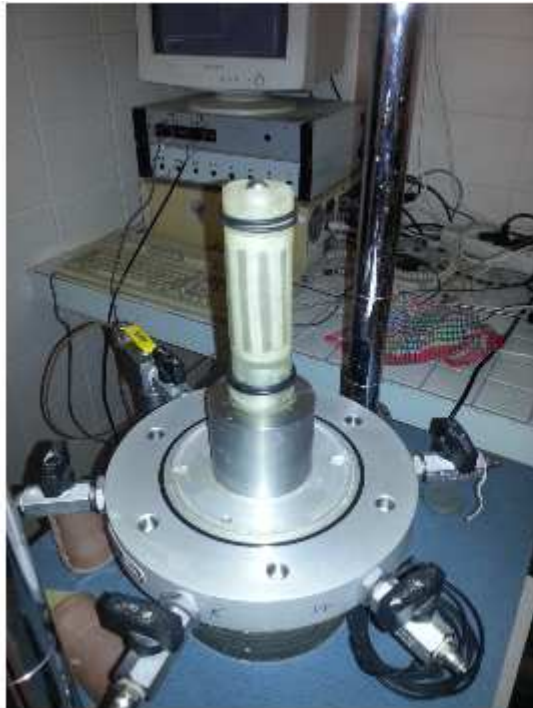
Obr. 23: Kalibrácie Loadcell pre vzorku JR-IG106



Obr. 24: Kalibrácie pórových tlakov pre vzorku JR-IG106

### Osadenie vzorky do komory

Po konsolidácii som vzorku opatrne vytlačil z kovovej rúry a orezal na rozmer 78mm. Orezanú vzorku som zvážil a zmeral jej rozmery. Po zvážení sa následne obalí do filtračného papiera, ktorý pomáha viesť vodu po stranách vzorky. Zo spodnej strany sa vzorka obloží pórovitou doštičkou a z vrchnej roznášacou doštičkou, ktorá rovnomerne prenáša axiálne napätie na celú plochu vrchnej podstavy vzorky. Následne sa vzorka položí do trojosového prístroja a pretiahne sa cez ňu gumová membrána, ktorá je nad a pod vzorkou zaistená gumovými krúžkami. Gumové krúžky slúžia aj na zaistenie tesnosti voči komorovej vode. Následne sa nasadí komora, ktorá sa pripevní pomocou 6 šraub a naplní sa destilovanou vodou.



Obr. 25: Vzorka pripravená na založenie komory a začiatok skúšky.



Obr. 26: Triaxiálny prístroj pripravený na začiatok skúšky.

### Sýtenie vzorky

V prvom kroku po osadení vzorky je potrebné vzorku nasýtiť vodou. To je kontrolované pomocou GDS prístrojov. Na začiatku sýtenia som nastavil ako počiatočnú hodnotu v komore tlak 20 kPa a vo vzorke tlak 10 kPa. Po jednom dni som navýšoval aj komorový, aj sýtiaci tlak vo vzorku na hodnotu 310 kPa (komora) a 300 kPa (vzorka). Efektívne napätie je teda po dobu trvania sýtenia stále 10 kPa. Pre overenie stupňa nasýtenia som použil Skemptonov parameter B, tzv B-check. Je definovaný ako pomer zmeny pórového tlaku ku zmene komorového tlaku. Postup jeho zisťovania je taký, že sa uzavrie dolná drenáž a zvýši sa komorový tlak o 50 kPa. Zmenu pórového tlaku sledujeme pomocou GDS prístroja.

V ideálnych podmienkach dosahuje Skemptonov parameter hodnotu 1, pri tuhých íloch to je hodnota 0,91 ([www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)). Ja som považoval za nasýtenú vzorku ak som dosiahol hodnotu 0,95 a vyššie.



## Konsolidácia vzorky

Po dosiahnutí vyššie spomenutého Skemptonovho parametru som začal fázu izotropnej konsolidácie vzorky jedno-rázovým prírastkom komorového tlaku. Rýchlosť prírastku bola 2 kPa/hod. Efektívne napätie som zvyšoval na tri rôzne hodnoty: 70 kPa, 150 kPa a 300 kPa, pričom pórový tlak ostával vo všetkých troch vzorkách rovnaký, a to 300 kPa.

Konsolidačnú fázu som ukončil, keď sa ustálili objemové zmeny vo vzorke.

## Šmýkanie vzorky

Pre každú vzorku a každú skúšku je potrebné vypočítať rýchlosť šmýkania vzorky. Podľa normy ČSN CEN ISO/TS 17892-9 (2005) som použil vzťah:

$$V_{\max} = \frac{(H_i - \Delta H_c) \times \varepsilon_{1f}}{F \times t_{50}} \quad (9.3)$$

kde je:

$v_{\max}$  maximálna rýchlosť šmýkania vzorky

$H_i$  počiatková výška vzorky

$\Delta H_c$  zmena výšky vzorky počas priebehu konsolidácie

$\varepsilon_{1f}$  očakávané pomerné osovú pretvorenie pri porušení (15%)

F faktor, závislý na type skúšky (pre neodvodnenú skúšku drénovanú z jednej podstavy sa uvažuje hodnota 2,1)

$t_{50}$  je čas potrebný pre 50% konsolidáciu vzorky

Zmenu výšky vzorky počas priebehu konsolidácie som počítal z:

$$\Delta H_c = \frac{1}{3} \times \frac{\Delta V_c}{V_i} \times H_i \quad (9.4)$$

kde je:

$\Delta V_c$  zmena objemu vzorky počas priebehu konsolidácie

$V_i$  počiatkový objem vzorky pred konsolidáciou

Rýchlosti šmykania vzoriek boli nižšie ako 0,004 mm/min. Pri tejto fáze skúšky je potrebné zaznamenávať osovú zaťaženie, osovú stlačenie a pórové tlaky.

#### 9.2.4 Zhrnutie výsledkov laboratórnych skúšok

Triaxiálne skúšky boli robené na štandardných vzorkoch rozmerov 76 mm výšky a 38 mm priemeru. Pri teste boli počítačom zaznamenávané viaceré veličiny:

- Čas (min)
- Komorový tlak (kPa)
- Sýtiaci tlak (kPa)
- Zmena objemu vody v kontrolere GDS pre komorový tlak ( $\text{mm}^3$ )
- Zmena objemu vody v kontrolere GDS pre sýtiaci tlak ( $\text{mm}^3$ )
- Pórové tlaky
- Deviatorové napätie Loadcell
- Axiálne stlačenie vzorku (mm)

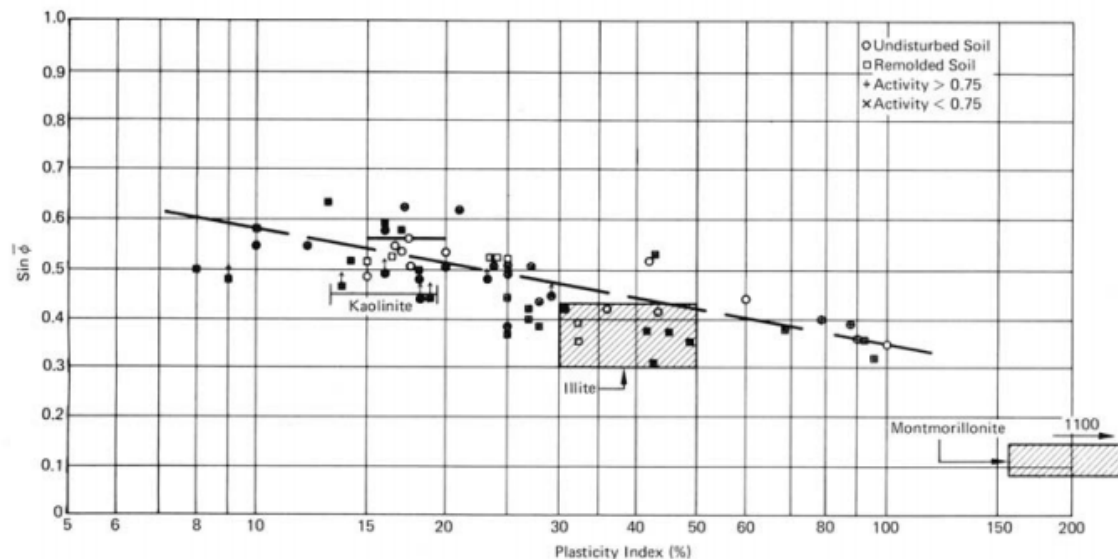
Po ukončení testu boli dáta importované do osobného počítača, kde boli vyhodnotené pomocou tabuľkového procesoru Excel 2013. Hodnoty namerané meračom deviatorového napätia loadcell a meračom pórových tlakov boli prepočítané pomocou kalibračnej rovnice na napätia.

Z výsledkov prvej série skúšok vykazoval jeden prístroj chybu merania pórových tlakov. Následne po skúške bol na sústave zamenený počítač a neskôr aj merač pórových tlakov. Druhý prístroj vykazoval nereálne výsledky chovania komorového tlaku. Preto som za dôveryhodné mohol považovať len výsledky tretieho prístroja. V prvom prístroji bol na chybe pretekajúci kohút uzáveru pórových tlakov a na druhom prístroji kontroler tlaku GDS. Po dokončení skúšok boli všetky tri prístroje skontrolované a opravené a všetky už pracujú správne. Tretí prístroj počas skúšok pracoval správne.

Úspešné boli teda tri triaxiálne skúšky, na každom vzorku jedna. Dve vzorky boli izotropne konsolidované pri efektívnom napätí 150 kPa a jedna pri efektívnom napätí 300 kPa. Grafy

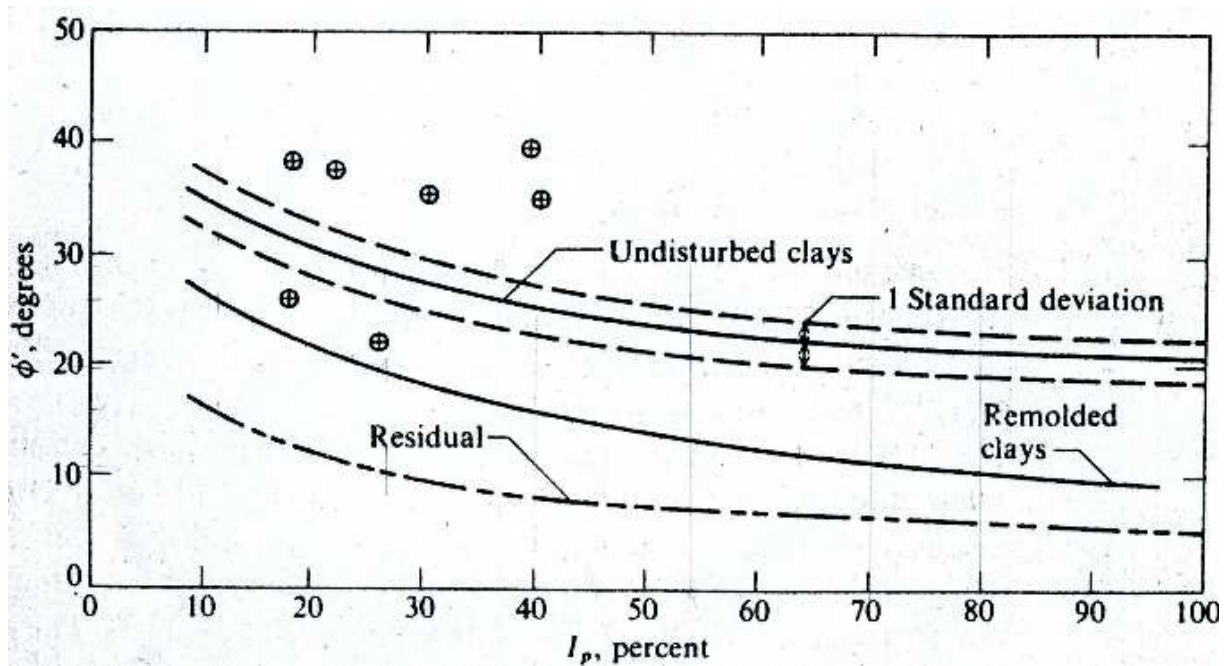
priebehov pórových tlakov, dráh napätí a mobilizovaného uhlu vnútorného trenia sú súčasťou prílohy 6.

Výsledné hodnoty kritického uhlu vnútorného trenia 2 vzoriek (JR-IND108 a JR-IG106) ílu boli porovnané s grafom (Obr. 27), ktorý popisuje vzťah medzi indexom plasticity a uhlom vnútorného trenia.



Obr. 27: Vzťah medzi uhlom vnútorného trenia a indexom plasticity (Mitchell, J.,K., Soga, K., 2005)

Z grafu je vidieť, že s narastajúcim indexom plasticity  $I_p$  klesá uhol vnútorného trenia  $\phi'$ . Rekonstituované vzorky zemín v grafe sú označené štvorcovým symbolom a neporušené vzorky krúžkom. Vzorka JR-IND108 s indexom plasticity 28 % môže podľa grafu dosahovať hodnoty uhlu vnútorného trenia v rozmedzí cca 21-26° a vzorka JR-IG106 s indexom plasticity 34 % v rozmedzí cca 19-24°.



Obr. 28: Vzťah medzi uhlom vnútorného trenia a indexom plasticity (Bjerrum et al., 1960)

Obrázok 28 zobrazuje graf, v ktorom sú aproximované výsledky rekonštituovaných (remolded clays) vzoriek ílu. Porovnanie popisuje tabuľka 2.

Hoci je porovnávanie s grafmi len orientačné, výsledky považujem za dôveryhodné a použijem ich pri nasledujúcom modelovaní stability svahu.

Výsledná hodnota kritického uhlu vnútorného trenia tufu (JR-IG110) bola porovnaná len s výsledkom geotechnického prieskumu zosuvu Dobkovičky. Vzorka JR-IG110 nemá charakter ílu ale charakter hlíny. Preto sa pre porovnanie nemôže tento graf použiť. Bol pri nej ale nameraný uhol vnútorného trenia  $29,5^\circ$

V tabuľke 3 sú zhrnuté a porovnané moje výsledky merania, výsledky prieskumu zosuvu Dobkovičky (Suchý, J., 2014) a tabuľkové hodnoty kritického uhlu vnútorného trenia (Mitchel, et al., 2005, Bjerrum, et al., 1960).

Skupina	Vzorka	Geotyp AZ	Ip	$\phi$ Ja krit	$\phi$ AZ vrch	$\phi$ Tab Mitchell	$\phi$ Tab Bjerrum	721003	731001
K2	JR-IND108	K2	28	$22,5^\circ$	$24^\circ$	21-26°	$19^\circ$	Cl	CH
K1	JR-IG106	K1b	34	$19,5^\circ$	$24^\circ$	19-24°	$17^\circ$	Cl	CH
PN	JR-IG110	PN1	30	$29,6^\circ$	$16^\circ$	-	-	saCl, saSi	MV

Tab. 3: Porovnanie výsledných hodnôt uhlu vnútorného trenia

## 10 Numerické modelovanie

### 10.1 Ideálna plasticita

Mohr-Coulombov model je najpoužívanejší ideálne plastický konštitučný model v geomechanike. Zahŕňa v sebe lineárnu elasticitu aj ideálnu plasticitu. Lineárna elasticita Mohr-Coulombovho modelu je založená na Hookovom zákone (Plaxis, 2015), ideálna plasticita na Mohr-Coulombovej podmienke porušenia.

Základným princípom elastoplasticity je rozdelenie pretvorenia na elastickú časť a plastickú časť:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (10.1)$$

Hookov zákon vzťahuje napätie k pretvoreniu, substitúciou predchádzajúceho vzťahu (10.1) do Hookovho zákona vzniká:

$$\dot{\sigma} = \mathcal{M}^{ep} : \dot{\epsilon} = \mathcal{M}^e : \dot{\epsilon}^e = \mathcal{M}^e : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p) \quad (10.2)$$

kde  $\mathcal{M}^e$  je elastická matica tuhosti a  $\mathcal{M}^{ep}$  je elasto-plastická matica tuhosti (Mašín,2015).

Ideálna plasticita zavádza funkciu napätia nazývanú podmienka (plocha) plasticity:

$$f(\sigma) = 0 \quad (10.3)$$

ktorá je funkciou tenzoru napätia. Sama o sebe však ešte nedokáže rozlišovať medzi elastickou a elasto-plastickou deformáciou, preto spoločne s podmienkou plasticity (10.3) musí platiť nerovnosť:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} : \dot{\sigma}^e > 0 \quad (10.4)$$

kde  $\dot{\sigma}^e$  je skúšobný prírastok napätia.

Obom vyššie popísaným vzťahom (10.3, 10.4) sa spoločne hovorí podmienka plastického zaťažovania, ktorá už dokáže rozlišovať medzi elastickou a elasto-plastickou deformáciou. Ak je splnená, hovoríme o elasto-plastickom zaťažovaní, inak hovoríme o elastickej odozve.

Matematicky sa vyhodnocovanie podmienky plasticity zapisuje nasledujúcim spôsobom:

- a) Stav napätia je na ploche plasticity a skúšobný prírastok napätia smeruje do plochy plasticity, elasto-plastické prírastovanie:

$$f(\sigma) = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma} : \dot{\sigma}^e > 0 \quad (10.5)$$

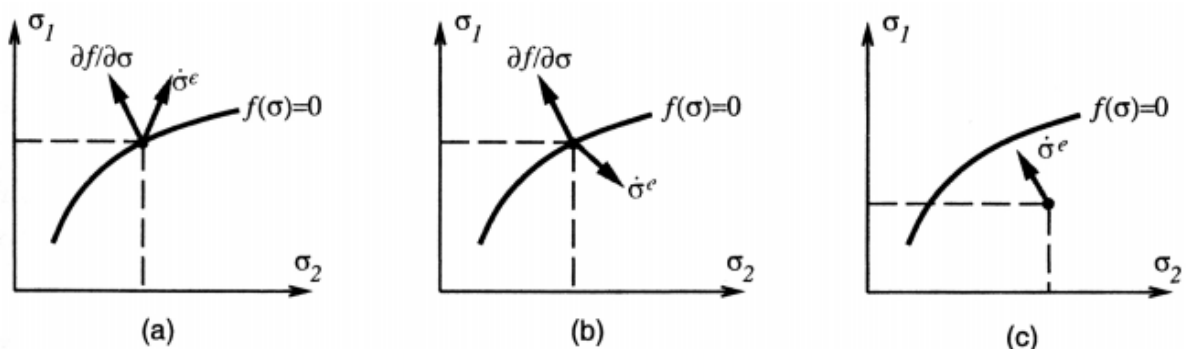
- b) Stav napätia na ploche plasticity a skúšobný prírastok smeruje pozdĺž alebo do plochy plasticity, elastická odozva:

$$f(\sigma) = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma} : \dot{\sigma}^e \leq 0 \quad (10.6)$$

- c) Stav napätie je vo vnútri plochy plasticity, elastická odozva pre ľubovoľný skúšobný prírastok napätia:

$$f(\sigma) < 0 \quad (10.7)$$

Všetky tri stavy popisuje obrázok 28.



Obr. 29: Možné výsledky vyhodnocovania podmienky plastického zaťažovania (Herle, 2003).

Ak sa podmienka plasticity v priebehu deformačného procesu nemení a je zhodná s podmienkou porušenia, označujeme tento stav ako ideálna plasticita (Herle, 2003).

### Mohr-Coulombova podmienka plasticity

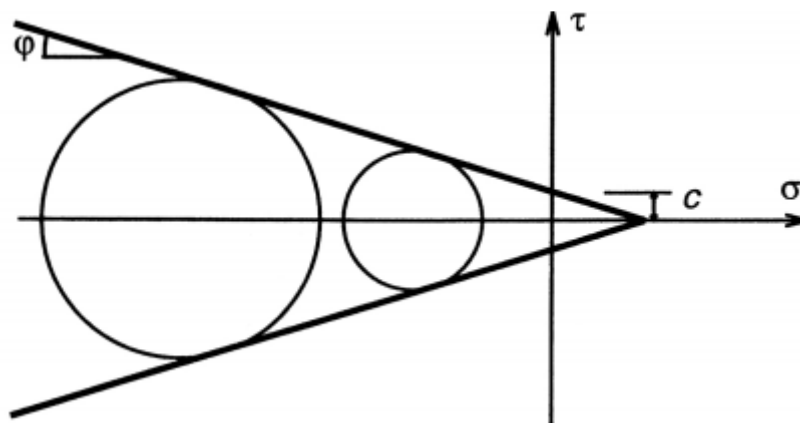
Najpoužívanejšou podmienkou plasticity v geomechanike je Mohr-Coulombova podmienka plasticity:

$$\tau + \sigma \tan \varphi - c = 0 \quad (10.8)$$

ktorá predstavuje obálku Mohrových kružníc (viz. kapitola 9.1) pri medznej napätosti (Obr. 29). Je definovaná konštantným uhlom vnútorného trenia. Pre použitie rovnice v konštitučnom vzťahu, kde je potrebné nájsť rovinu s maximálnym pomerom šmykového a normálového napätia je vhodnejší zápis:

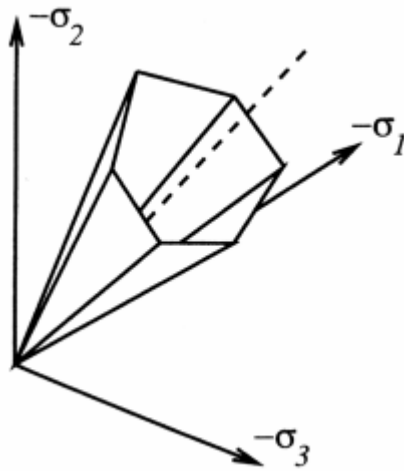
$$f(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \quad (10.9)$$

kde  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  sú maximálne a minimálne hlavné napätia.



Obr. 30: Mohr-Coulombova podmienka plasticity (Herle, 2003)

V prípade izotropného materiálu je možné poradie hlavných os napätia zamieňať, v tomto prípade bude rovnica (10.9) predstavovať v priestore hlavných napätí šesťboký ihlan (Obr. 30).



Obr. 31: Mohr-Coulombova podmienka plasticity v priestore hlavných napätí (Herle, 2003)

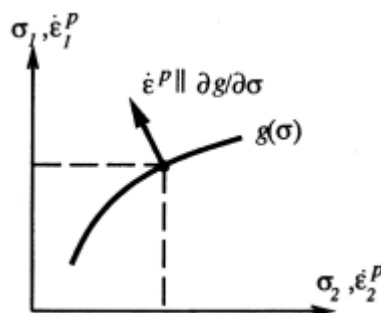
Okrem elastickej matice tuhosti a podmienky plasticity je pre plnú definíciu ideálne plastického konštitučného modelu potrebné definovať tretiu veličinu, a to plastický potenciál (Mašín, 2015). Ak podmienka plasticity indikuje plastické pretváranie, je potrebné určiť smer  $\mathbf{m}$  a veľkosť jeho prírastku  $\lambda$  (plastický násobiteľ):

$$\dot{\epsilon}^P = \lambda \mathbf{m} \quad (10.10)$$

Pre výpočet smeru plastického pretvorenia je potrebné zaviesť plochu plastického potenciálu  $g(\sigma)$ , teda:

$$\mathbf{m} = \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (10.11)$$

kde funkcia  $g = 0$  sa nazýva plastický potenciál a jej gradient udáva smer plastického pretvorenia. Obrázok 31 popisuje, že pri vhodne zvolenej funkcii  $g$  je možné simulovať kontraktanciu aj dilatanciu materiálu.



Obr. 32: Význam plastického potenciálu (Herle, 2003)



Pri použití Mohr-Coulombovej podmienky plasticity má plastický potenciál tvar rovnice :

$$g(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \psi \quad (10.12)$$

kde  $\psi$  je uhol dilatancie.

Správny výpočet dilatancie či kontraktancie je dôležitý v prípade, ak sú objemové zmeny nejakým spôsobom obmedzené, napríklad neodvodnenými podmienkami. Potlačenie týchto zmien vedie k zásadným zmenám napätosti počas deformácie, a tým aj k zmenám šmykovej pevnosti materiálu (Herle, 2003).

## 10.2 Numerické modelovanie stability

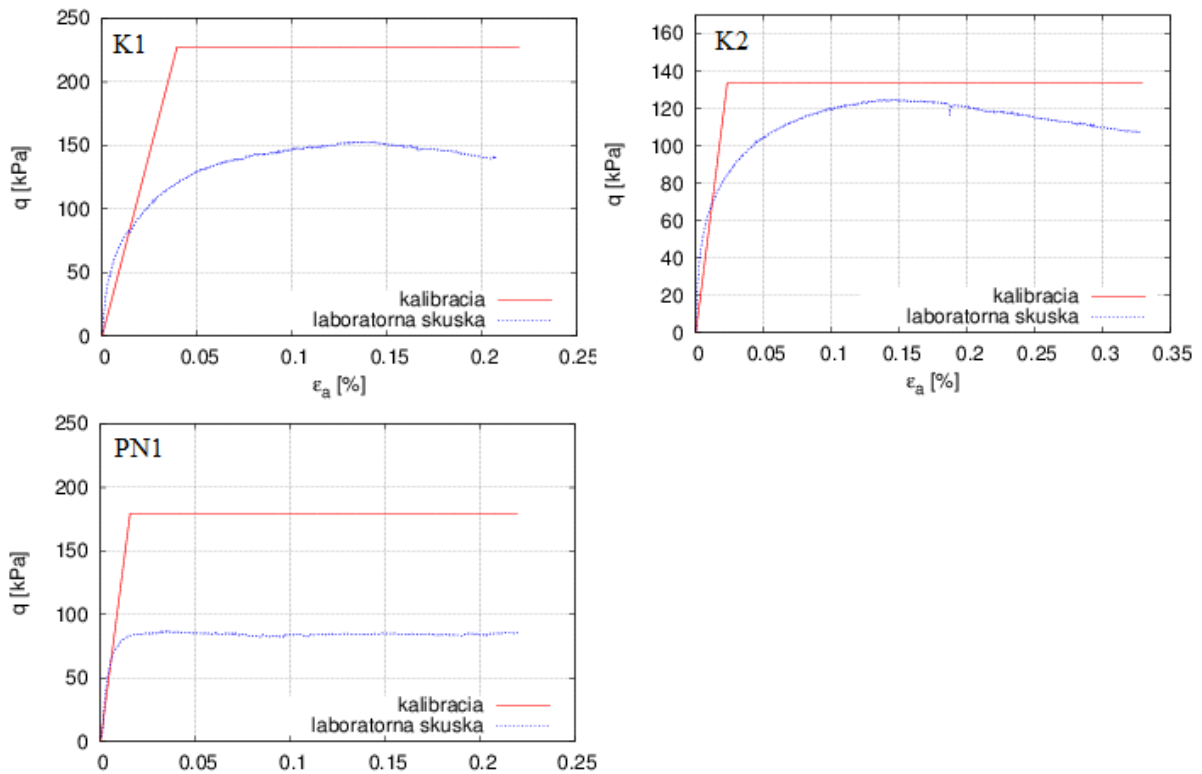
Modelovanie stability bočných stien zosuvu prebiehalo v programe Plaxis 2D verzia 2015.01. Boli modelované tri priečne a jeden pozdĺžny rez zosuvom.

### Kalibrácia parametrov

Pred samotným modelovaním je potrebné na základe neodvodnených triaxiálnych skúšok skalibrovať parametre pre Mohr-Coulombov model:  $E$ ,  $\nu$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ,  $\psi$ . Kalibrácia bola robená v programe Triax. Výsledky kalibrácie sú uvedené v tabuľke 4, grafy kalibrácie na obrázku 33.

		K2	K1	PN1	
E	Youngov modul	5000	5000	10000	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	Poissonovo číslo	0,3	0,3	0,3	[-]
c	Súdržnosť	22,5	19,5	29,6	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Uhol vn. trenia	1	1	1	[°]
$\psi$	Dilatancia	0	0	0	[°]

Tab. 4: Hodnoty parametrov pre Mohr-Coulombov model.



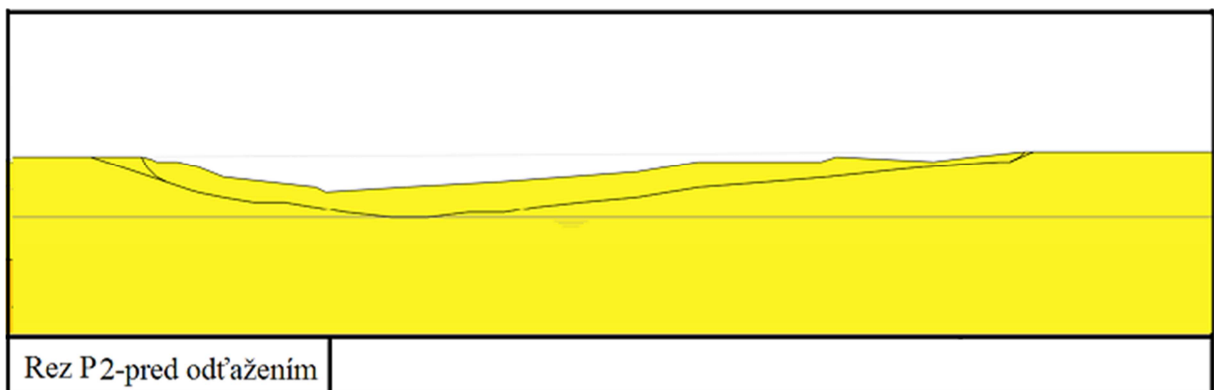
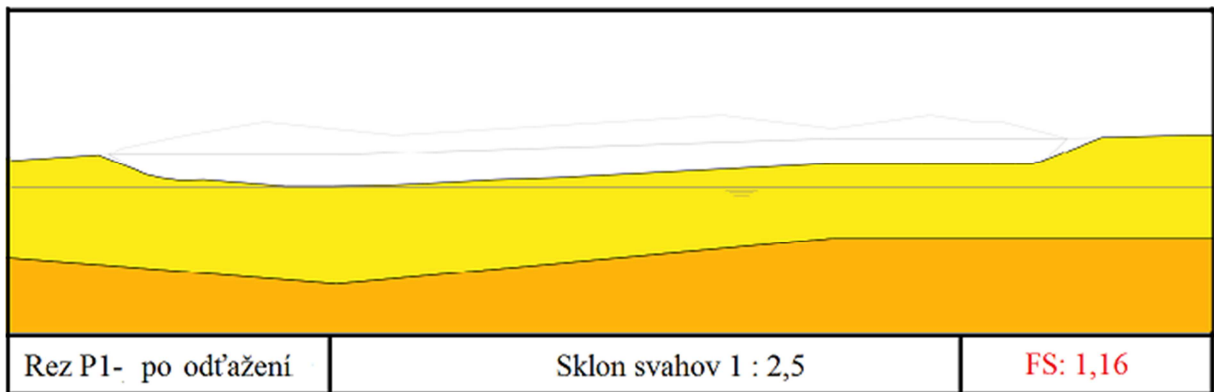
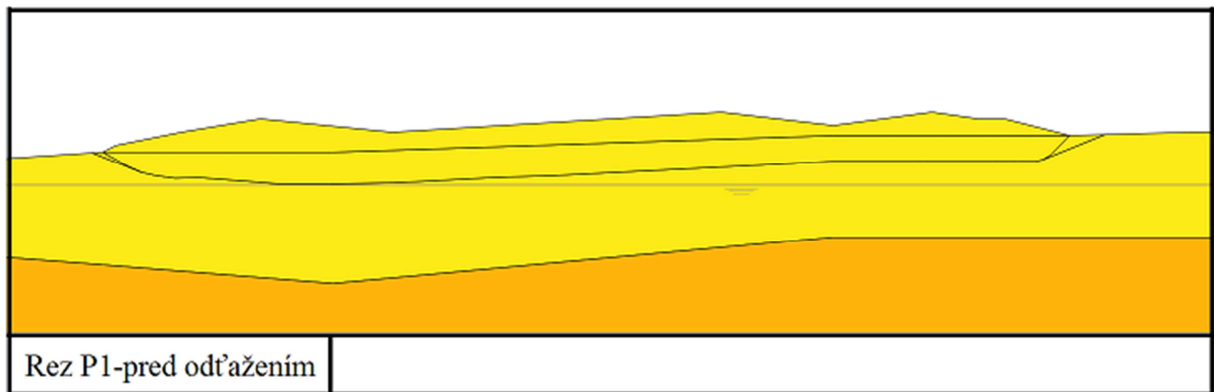
Obr. 33: Grafy kalibrácie parametrov-pracovné diagramy

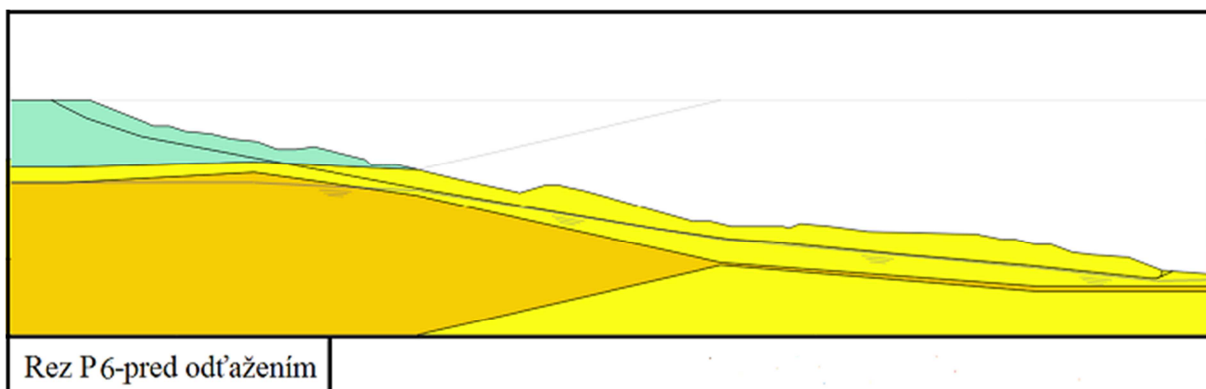
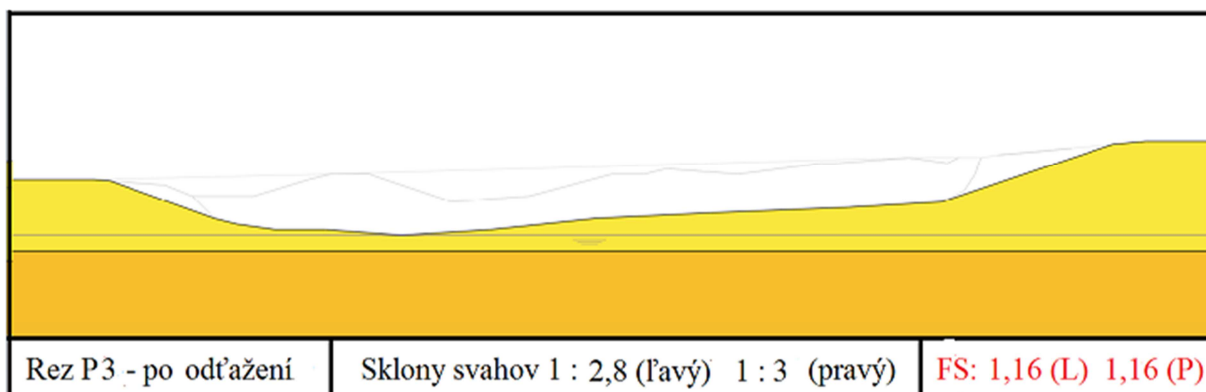
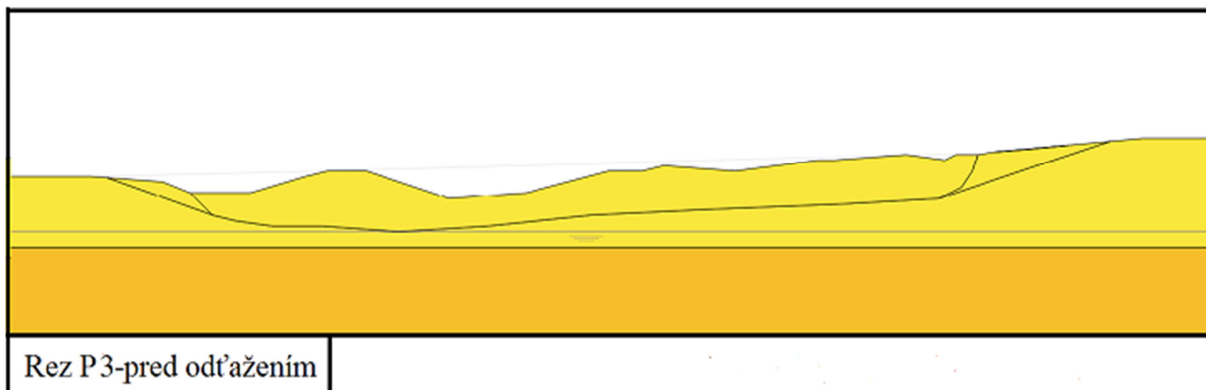
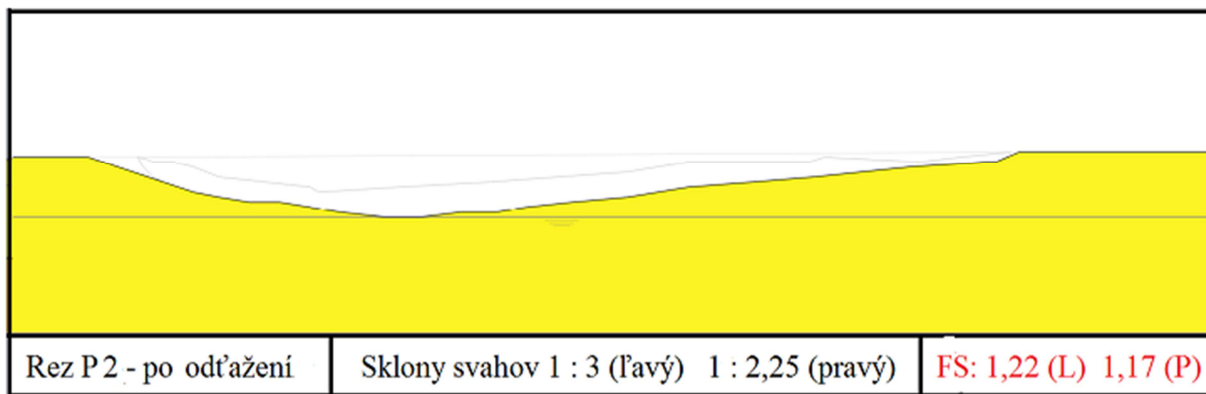
## Geometria a postup

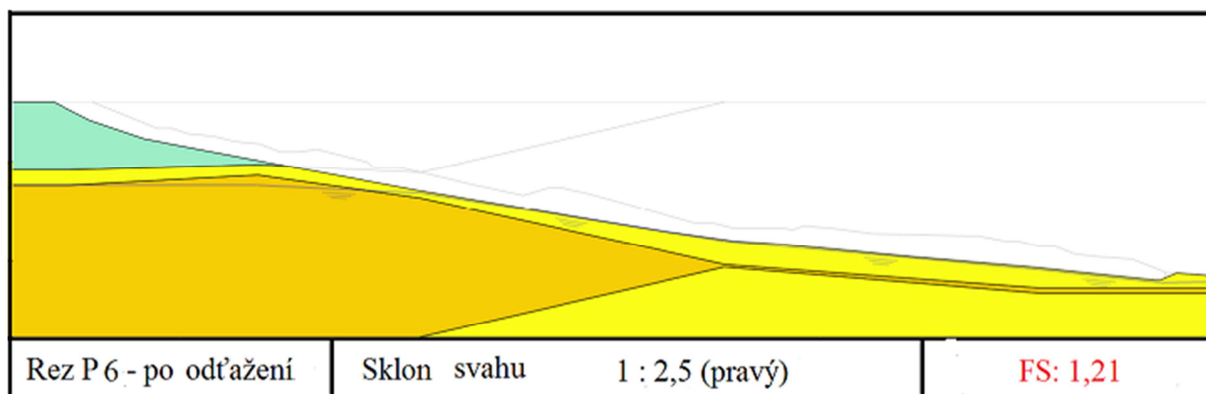
Kontúry povrchu terénu a predpokladanú polohu šmykovej plochy som vkladal do programu Plaxis 2D pomocou digitalizačného programu Web Plot Digitizer. Programom som z výkresu rezu (Suchý, 2014) vytvoril z línií tvaru zosuvu sústavu bodov  $x, y$ , ktoré som importoval do programu plaxis 2D. Použil som 3 priečne rezy (P1, P2, P3) a jeden pozdĺžny (P6). Rezy sú schematicky naznačené na obr. 14. Počet bodov na jeden rez sa pohyboval v rozmedzí od cca 40 pre priečne rezy do 70 bodov pre pozdĺžny rez, s presnosťou bodov 0,5m. Geologické pomery rezov som zjednodušil tým spôsobom, že som rôzne geotypy generalizoval podľa tabuľky 2 (kap. 9.2.2 Vzorky). Používal som teda 3 vlastné geotypy K1, K2 a PN. Rozhranie jednotlivých geotypov som udával podľa dokumentácie vrtov spracovaného zosuvu Dobkovičky (Suchý, 2014), ktoré sú súčasťou prílohy 7.

Zosuté masy som do programu Plaxis definoval nástrojom *Polygon*. Okrajové časti neporušenej časti svahu som definoval nástrojom *Line*. Následne boli do geometrie doplnené rozhrania geologických vrstiev nástrojom *Borehole*. K zdokumentovaným vrtom vrtaných na lokalite bolo pridaných niekoľko „fiktívnych“ vrtov, kvôli lepšej interpretácii priebehov

rozhraní rôznych geotypov a hĺbky hladiny podzemnej vody. Hladinu podzemnej vody v priečných rezoch som volil vodorovnú, tesne pod najhlbším bodom šmykovej plochy, pri pozdĺžnom reze som hladinu podzemnej vody volil na rozhraní medzi nepriepustnými ílmi a priepustnejšími tufmi. Od akumuláčnej časti bola vedená hladina podzemnej vody tesne pod šmykovou plochou, v hornej časti, kde sa začali vyskytovať tufy, bola hladina volená hlbšie. V modely som neuvažoval bazaltové horniny v mieste lomu a nezahrnul som ich do geometrie. Geometrie tvarov reliéfu pred a po odťažení sú na obrázku 34.







Obr. 34: Geometrie tvarov všetkých profilov zosuvu a stanovené sklon svahov a ich stupeň stability.

V modeloch pre bočné steny bol použitý vo všetkých prípadoch materiál K1, ktorý bol v podloží zosuvu v mieste šmykovej zóny. Sklony boli upravované do sklonu, aby spĺňali najmenšie požadované stupne stability svahov pre kritické šmykové parametre 1,15 (podľa normy ČSN 73 6133 - tabuľka 5).

<b>Zářez</b>		
<b>Zemina</b>	<b>Smykové parametry (efektívni)</b>	<b>Stupeň bezpečnosti</b>
Jemnozrnná	vrcholové	1,5
	kritické	1,15
	reziduální	1,1
Hrubozrnná	vrcholové	1,2
	kritické	1,15
Skalní hornina	vrcholové	1,3
	kritické	1,15

Tab. 5: Najmenšie požadované stupne stability (ČSN 73 6133)

Všetky štyri profily boli modelované obdobným spôsobom. Pre každú kalkuláciu boli použité tri fáze výpočtu:

- *Initial phase* - V tejto fáze program počíta počiatočné napätové pole pre počiatočnú konfiguráciu geometrie. Typ výpočtu bol zvolený *Gravity loading* z dôvodu nehorizontálnych rozhraní vrstiev. Typ výpočtu pórových tlakov bol zvolený *Phreatic*. Tento spôsob počíta pórové tlaky na základe výšky hladiny podzemnej vody.

- *Phase 1* - Odstránenie zosutých hmôt. V tejto fáze boli odstránené všetky zosuté hmoty a svahy bočných stien boli upravené do príslušného sklonu. Typ výpočtu bol zvolený *Plastic* a typ výpočtu pórových tlakov *Phreatic*.
- *Phase 2* - Výpočet faktoru stability. Vo fáze bol zvolený typ výpočtu *Safety*. Program v tejto fáze počíta stupeň stability  $\Sigma Msf$  pre daný sklon svahu. Program redukuje šmykové parametre  $\tan \varphi$  a  $c$ , až dokým nedôjde ku kolapsu:

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \Sigma Msf \quad (10.13)$$

kde je  $c$  súdržnosť,  $\tan \varphi$  je súčiniteľ trenia a index  $r$  označuje redukované parametre (Plaxis, 2015).

### 10.3 Zhrnutie výsledkov numerického modelovania

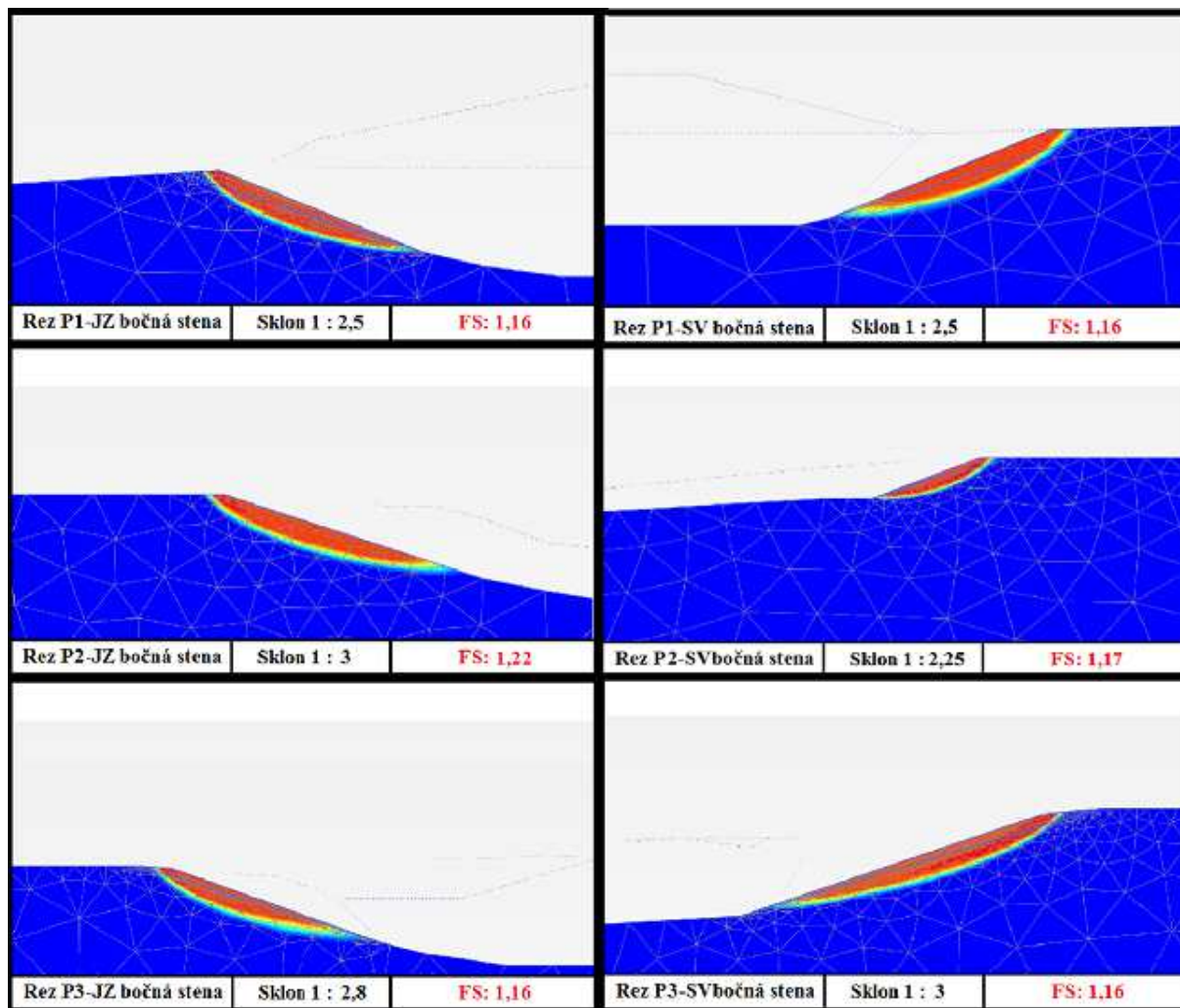
Numerickým modelovaním v programe Plaxis 2D boli zistené maximálne prípustné sklony bočných stien zosuvu po prípadnom odťažení všetkých zosutých hmôt tak, aby spĺňali stupeň stability vyšší než 1,15 (ČSN 73 6133). V tabuľke 6 sú popísané výsledné sklony a ich príslušné stupne stability.

	sklon JZ svahu	FS	sklon SV svahu	FS
Rez P1	1 : 2,5	1,16	1 : 2,5	1,16
Rez P2	1 : 3	1,22	1 : 2,25	1,17
Rez P3	1 : 2,8	1,16	1 : 3	1,16

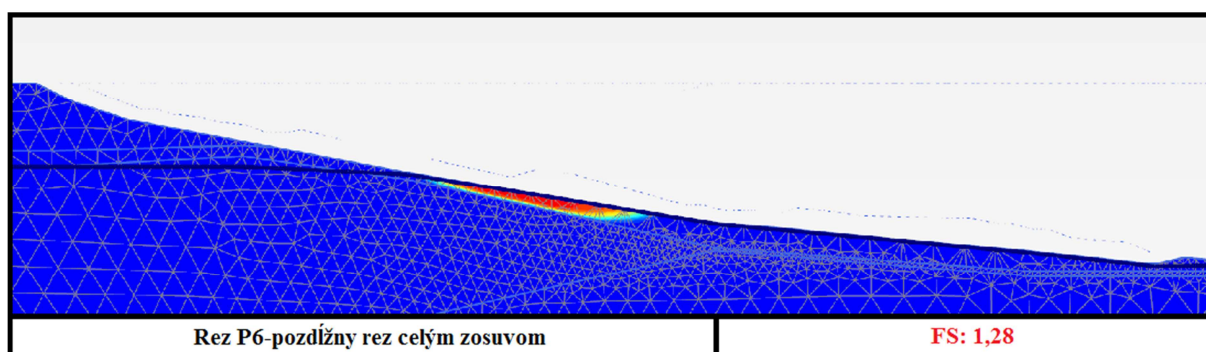
Tab. 6: Výsledné sklony svahov bočných stien a ich príslušné stupne stability

Následne boli modelované potenciálne svahové deformácie bočných svahov stien zosuvu (obr. 35) a svahu, vzniknutom po odťažení akumuláčnej časti zosuvu.

Modelovaní sa zistila aj celková stability svahu po odťažení. Obrázok 36 ukazuje miesto, kde môže dôjsť k potenciálnej svahovej deformácii v prípade  $FS=1$ . Faktor stability takto upraveného svahu bol spočítaný na 1,28.



Obr. 35: Potenciálne svahové deformácie upravených svahov bočných stien zosuvu (pričné rezy).



Obr. 36: Potenciálna svahová deformácia v upravenom svahu zosuvu.

Po odťažení zosutých hmôt bude potrebné všetky svahy upraviť do príslušných, vyššie popísaných sklonov. Bez úpravy nebude ani jeden zo svahov dlhodobo stabilný.

## 11 Diskusia výsledkov

Táto práca sa zaoberá zhodnotením zemného prúdového zosuvu, ktorý bol aktivovaný v noci z 6. na 7. júna 2013 po výdatných dažďových zrážkach blízko obci Dobkovičky. Zosuv zasiahol a poškodil jednokoľajnú železničnú trať, časť vybavenia kameňolomu Dobkovičky a rozostavanú diaľnicu D8 (kapitola 7).

Detailným mapovaním (kapitola 8.2) bola vytvorená ručne kreslená inžiniersko-geologická mapa geomorfologických tvarov reliéfu mierky 1:1000 a bolo zaznamenaných a popísaných 38 dokumentačných bodov. Mapa bola Českou geologickou službou zdigitalizovaná a použitá ďalej pre účely inžiniersko-geologického prieskumu zosuvu.

Po zmapovaní svahovej deformácie nasledoval počas prieskumu zosuvu odber vzoriek zemín z vrtov. Vzorky boli odoberané z 8 rôznych vrtov, v každom z viacerých hĺbok. Vzorky boli rozdelené do troch skupín (kapitola 9.2.2), skupiny boli volené na základe podobnosti geotypov zemín v jednej skupine. Z každej skupiny (geotypu) bola vybraná jedna vzorka zeminy s najnižšou šmykovou pevnosťou s celej skupiny. Výber bol robený na základe ílovej aktivity minerálov. Na takto vybraných vzorkách boli robené laboratórne skúšky mechaniky zemín.

Cieľom laboratórnych skúšok bolo stanoviť pre každú skupinu zemín kritický uhol vnútorného trenia. Na to bola použitá triaxiálna neodvodnená skúška s meraním pórových tlakov. Postup skúšky popisuje kapitola 9.2.3. Pre každú zeminu bola robená jedna triaxiálna skúška, z dôvodu technických problémov počas testovania zemín. Pre overenie výsledkov boli výsledné hodnoty kritického uhlu vnútorného trenia dvoch vzoriek ílov (JR-IND108, JR-IG106) porovnané s dvoma grafmi zobrazujúcimi závislosť  $\varphi_{cr}$  na indexe plasticity (Mitchell, 2005; Bierrum, 1960, kapitola 9.2.4). V oboch prípadoch bola zhoda dostačujúca pre dôverovanie mnou získaným výsledkom. Výsledky aj porovnanie zobrazuje tabuľka 2. Výsledné hodnoty kritického uhlu vnútorného trenia som použil pri numerickom modelovaní stability.

Numerické modelovanie prebiehalo v programe Plaxis 2D verzia 2015.01. Plaxis je program, ktorý pracuje na základe metódy konečných prvkov. Geometria bola do programu vložená pomocou voľne prístupného digitalizačného programu Web Plot Digitizer (kapitola 10.2). Pri



modelovaní bol použitý Mohr-Coulombov model. Kalibrácia parametrov prebiehala v programe Triax. Výsledné hodnoty kalibrácie parametrov zobrazuje tabuľka 4. Modelovanie bolo zamerané na zistenie sklonov bočných stien zosuvu po odťažení zosutých hmôt tak, aby spĺňali faktor stability podľa normy ČSN 736133, čo je 1,15. Na výpočet stability bočných stien boli použité tri priečne rezy zosuvom P1, P2, P3 a na celkovú stabilitu pozdĺžny rez P6. Modelovaním sa zistilo, že všetky bočné steny zosuvu stabilné budú, ak sa upravia do sklonov popisujúcich v tabuľke 6. Celková stabilita zosuvu po odťažení je taktiež vyhovujúca, a to s faktorom stability  $FS=1,28$ . Týmto zistením je možné navrhnúť spôsob sanácie formou odťaženia zosutých hmôt až po šmykovú plochu.

Návrh sanácie spracovaný firmou AZ Consult, spol. s.r.o. je popísaný v kapitole 7.2. Zameriava sa na tri hlavné sanačné opatrenia:

- Odvodnenie
- Terénne úpravy
- Statické konštrukcie

Odvodnenie má za cieľ znížiť pórové tlaky a tým zvýšiť šmykovú pevnosť geomateriálu. Pre sanáciu zosuvu je to najdôležitejší prvok a plne s ním súhlasím.

Druhým a tretím opatrením sú terénne úpravy a statické konštrukcie. Firma navrhuje úpravu povrchu, zarovnanie depresí a vybudovanie zaťažovacej lavice v spodnej časti zosuvu, pre zlepšenie pomeru aktívnych a pasívnych síl. Pri päte priťažovacej lavice tesne nad telesom diaľnice navrhuje postaviť statický prvok.

Táto diplomová práca však skúmala, aké stabilitné pomery v mieste zosuvu vzniknú po odťažení všetkých zosutých hmôt bez dodatočného statického zabezpečenia. Z výsledkov modelovania vyplynulo, že bočné steny zosuvu budú stabilné, ak budú upravené na príslušný sklon. Taktiež celková stabilita svahu bude prípustná. Ak by sa odťažila čo najväčšia časť zosutých hmôt, priťažovacia lavica ako aj pilotová stena by nemuseli byť realizované (tým pádom by bola sanácia aj finančne menej náročná).

## 12 Záver

Táto diplomová práca v sebe zahŕňa tri okruhy skúmania svahovej deformácie na diaľnici D8 pri obci Dobkovičky:

- *inžiniersko-geologické mapovanie*
- *laboratórne skúšky*
- *numerické modelovanie*

### **Inžiniersko geologické mapovanie**

Mapovanie prebiehalo na jar 2014. Výsledkom je ručne kreslená mapa mierky 1:1000, kde sú zakreslené všetky morfológické znaky zosuvu. Mapa v sebe zahŕňa 38 vlastných dokumentačných bodov. K mape je priložená legenda, textový popis dokumentačných bodov a fotografická dokumentácia 30 dokumentačných bodov.

### **Laboratórne skúšky**

Testovanie vzoriek zemín prebiehalo v laboratóriu mechaniky zemín na Ústave hydrogeologie, inženýrskej geologie a geofyziky Přírodovědecké fakulty University Karlovy v Prahe. Osem odobratých vzoriek bolo rozdelených do troch skupín (geotypov). Z každej skupiny bola vybraná jedna vzorka na základe aktivity ílových minerálov. Na vybraných vzorkách zemín boli robené neodvodnené triaxiálne skúšky s meraním pórových tlakov. Výsledkom bol kritický uhol vnútorného trenia, ktorý bol použitý pri numerickom modelovaní stability stien a celkovej stabilite zosuvu po odťažení všetkých zosutých hmôt.

### **Numerické modelovanie**

Modelovanie bolo robené pomocou programu Plaxis 2D, verzia 2015.01. Do programu boli vložené kontúry troch priečných rezov zosuvu a jeden pozdĺžny. Úlohou bolo modelovať správanie sa stien zosuvu po odťažení zosutých hmôt a navrhnúť sklon stien tak, aby spĺňali faktor stability 1,15 (ČSN 736133). Overená bola aj celková stabilita svahu po odťažení, a bol stanovený jej faktor stability 1,28. Tieto výsledky dokladajú, že aj uvažovaný variant celkového odťaženia zosuvnej akumulácie by bol stabilítne vyhovujúci.

Dôležité je brať tiež v úvahu, že zosuv sa nachádza v rozsiahlom zosuvnom území. Zmenou zaťaženia (napr. priťažovacia lavica) sa menia pomery aktívnych a pasívnych síl vo svahu a môže dôjsť k ďalšej svahovej deformácii nižšie po svahu smerom k Litochoviciam.

## 13 Literatúra

### **PUBLIKÁCIE A SPRÁVY:**

- 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, 1960.
- Cajz, V., a kol., 1996: *České stredohoří*, Český geologický ústav, Praha, ISBN 80-7075-238-6
- Český úřad zeměměřický a katastrální, 1996: *Vyšší geomorfologické jednotky České republiky*, Praha, ISBN 80-901212-7-6
- Herle, I., 2003: *Základy matematického modelování v geomechanice*, Univerzita Karlova v Praze, Karolinum, ISBN 80-246-0745-X
- Kycl, P., 2014: *Dálnice D8-stavba 0805 A, sesuv Dobkovičky, km 56,300-56,500, GTP/IGT*
- Kycl, P., et. al 2009: *Dokumentace geologických odkryvů a geologických fenoménů v tělese dálnice D8 v úseku stavby 0805 Lovosice - Řehlovice a jejich aktuální význam pro upřesnění geofaktorů životního prostředí, ČGS*
- Kycl, P., 2010: *Dodatok k Kycl, P., et. al 2009: Dokumentace geologických odkryvů a geologických fenoménů v tělese dálnice D8 v úseku stavby 0805 Lovosice - Řehlovice a jejich aktuální význam pro upřesnění geofaktorů životního prostředí, ČGS*
- Kycl, P., 2013: *Situační zpráva o sesuvu Dobkovičky D8 km 56,300 ke dni 11. června 2013, ČGS*
- Mašín, D., 1999: *Pevnost směsí zemin*. Bakalářská práce, PŘF UK, Praha, 31 s.
- Mašín, D., 2015: *Prednášky z predmetu: Matematické modelování v geomechanice*, Univerzita Karlova v Praze
- Mitchell, J., K., Soga, K., 2005: *Foundamentals of soil behavior*, third edition, John Wiley and Sons, inc., ISBN-10:0-471-46302-7
- Myslivec, A., Eichler, J. a Jesenak, J. (1970). *Mechanika zemin*. SNTL, Praha,
- Pašek, J., 1973: *Sesuvy podél trasy projektované dálnice u Prackovic*, Geologický průzkum, únor 1973, číslo 2 (170), ročník XV
- Pechar, T., 2005: *Dobkovičky – hloubkové rozšíření ložiska, závěrečná ypráva úkolu s výpočtem zásob*, stav ke dni 3.11.2004, GET s.r.o. Praha

- Plšková, M., Záruba, J., 2014: Inženýrskogeologický průzkum a monitoring předpolí Dobkovičky v km 56,300-56,500. Arcadis CZ, a.s. divize Geotechnika.
- ŘSD, 2015: *Dálnice D8, Lovosice-Řehlovice*, stavba 0805, informační leták, stav k 04/2015
- Skempton, A., W., *The Collodial Activity od Clays*, University of London, England
- Suchý, J., a kol., 2014: *Závěrečná zpráva-D8 -Odstránění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 – 0805*. AZ Consult.
- Rybář, J., Suchý, J., 1997: Účelová IG mapa, modelová oblast Prackovice. M 1:5000.. ÚSMH AV ČR. Praha
- Wood, D., M., 1990: *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-33782-8
- Záruba, J., 2011: *Zpráva, Inženýrskogeologický doprůzkum, stabilitní výpčty v km 56,160 – 56,660*, Arcadis Geotechnika, Praha, 2011

#### **NORMY:**

- ČSN CEN ISO/TS 17892-9 *Geotechnický průzkum a zkoušení –Laboratorní zkoušky zemin – Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin*
- ČSN CEN ISO/TS 17892-12-*Geotechnický pruzkum a zkoušení-Laboratorní zkoušky zemin-Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*
- ČSN 73 6133: *Návrh a provádění zemního telesa pozemních komunikací*

#### **WEB:**

- [http://mapy.geology.cz/geocr\\_50/](http://mapy.geology.cz/geocr_50/)
- [www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)-*White Paper: Introduction to Triaxial Testing* (22.2.2015)
- [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz) (10.6.2015)
- [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl): *Material models manual 2015* (19.7.2015)