

PŘEDPOKLÁDANÉ DŮVODY VZNIKU SESUVU V NEOGENNÍCH MOŘSKÝCH JÍLECH (BRNO-MEDLÁNKY)

RNDr. Ivan Poul¹

¹ Ústav geotechniky, FAST VUT v Brně, Veverří 95, 602 00 Brno

The Supposed reasons for a genesis of a landslide in the Neogene clays (Brno-Medlány)

The presentation discusses the influence of mineralogy on the geotechnical properties of Neogene clay. The research was made on the building site Brno - Medlány to find out a reason of slope instability. Based on the RTG analyses and mechanical soil-testing the direct influence of mineralogy on clay solidness was proved. Shallow levels of clay deposit are poor on carbonate content, but the soil contains high amount of gibbsite. The gibbsite occurrence can be traced up to 6 m depth. In the geological-exploration borehole (17 m depth) a weathered wood was found. The carbon-carbon dating certified age older than 40 KA. It was discovered that unstable slope in Medlány is paleo-landslide caused by incorrectly outlined excavation works.

1. ÚVOD

Sesuvy a jiné svahové pohyby vždy vzbuzovaly zájem široké veřejnosti, neboť jejich vznik bývá spjat se živelnými pohromami, které mají pro člověka velký ekonomický význam. Na severním okraji města Brna v městské čtvrti Medlány byla během roku 2005 zahájena výstavba vícepodlažních obytných budov. Během provádění zemních prací a budování základových konstrukcí ve vysoce plastických jílech neogenního stáří došlo ke vzniku sesuvu (Poul a kol. 2005). Sesuv vznikl důsledkem podkopání původního svahu, kdy se zemina začala sesouvat do přibližně 50 m široké stavební jámy. Výzkumem procesů vzniku sesuvu se začal zabývat autor ve své disertační práci. Na staveništi v Medlánkách byl za spoluúčasti České geologické služby (pobočky v Brně) proveden průzkumný vrt pro doplnění informací o průběhu smykových ploch a také pro odběr zemin určených k podrobnějším laboratorním výzkumům.

1.1 Charakteristika staveniště v Medlánkách

Terén je mírně svažité (1:10 až 1:12), nadmořské výšky se pohybují v rozmezí 220–270 m. n. m. Geologické podloží je tvořeno tenkou vrstvou spraši nad neogenními jíly (ověřená mocnost jílu více než 25 m). Neogenní jíl (F8 CH, od hloubky přibližně 10 m F7 CV) se vyznačuje převážně pevnou konzistencí. Povrchové partie neogénu zvětrávají, do hloubky cca 6 m jsou jíly potrhány a ve zvětralé zemině se vyskytují polohy sádrovcových drúz.

V lokalitě bylo naplánováno sídliště sestavené z čtyř a pětipatrových obytných budov. Před začátkem zemních prací byl v místě staveniště proveden inženýrsko-geologický průzkum (Grünnwald 2003). Autor průzkumu na základě mělkých vrtů, mělké lehké dynamické penetrační zkoušky a svých zkušeností označil staveniště jako druhou geotechnickou kategorii a navrhl plošné založení budov (budovy byly finálně založeny hlubinně). Druhá geotechnická kategorie umožňuje pro výpočty využít směrné normové charakteristiky podle normy ČSN 73 1001, což bylo geologem doporučeno.

Během provádění zemních prací ve vysoceplastických jílech došlo k porušení stability svahu a vzniku sesuvu. V některých místech došlo vlivem sesuvného pohybu zeminy až k obnažení hlubinných základových konstrukcí (Poul a Štábl 2006). Po určité časové prodlevě, zasáhl do vývoje havárie investor. Nad budovanými konstrukcemi, v místě již relativně rozsáhlého sesuvu, započal s budováním kotvené pilotové stěny. V návaznosti na stabilitní problémy byly provedeny doplňující IG průzkumy.

2. PRŮZKUMNÁ DÍLA

Na lokalitě Brno-Medlánky bylo v rámci různých etap průzkumu provedeno velké množství vrtů a penetračních sond, jejichž výsledky měl autor příspěvku k dispozici (Grünnwald 2003, Fojtík 2005, Poul a kol. 2005, Vlček a kol. 2005). Pro získání dalších důležitých charakteristik byl autorem příspěvku v místě staveniště v Medláncích proveden jeden inženýrsko-geologický vrt (Medlánky-1). Z petrologického popisu všech vrtů vyplývá, že přibližně svrchních 12 m je tvořeno pokryvem, který vznikl zvětráváním, sesouváním a přeplavováním obnažených partií spodnobadenských jílu. Ve vrtných jádrech byly popsány partie tvořené z velké části sádrovcem. Barva sedimentu je proměnlivá - byl zastižen jílem rezavo-šedé až nahnědlé barvy.

V hloubce přibližně 13,4 m pod povrchem byl sledován pozvolný přechod zvětralého jílu do autochtonního neogenního jílu (v rozsahu jednoho metru vrtného jádra došlo k výrazné změně barvy a konzistence). Podloží pevný jílel se vyznačuje šedou až zelenou barvou, občasné je až střípkovitě rozpadavý. V profilu průzkumného vrtu Medlánky-1 byly potvrzeny minimálně 3 smykové plochy. Jiné smykové plochy je možné vysledovat v záznamech dynamických penetračních zkoušek (Fojtík 2005). Lokální poklesy dynamického penetračního odporu byly pozorovány v hloubkách přibližně 2 m a 6 m. Podzemní voda je vázána lokálními přítoky na sádrovcové polohy. Ustálená hladina podzemní vody byla v provedených vrtech sledována v hloubce cca 10 m pod povrchem. Ve vrtu Medlánky-1 byl v hloubce 17,0 m nalezen na staré smykové ploše úlomek téměř rozloženého dřeva.

2.1 Metodika laboratorního výzkumu

Na odebraných zeminách byly prováděny převážně zkoušky pro zatřídění zemin dle normy ČSN 73 1001 (Grünnwald 2003, Fojtík 2005). Až po vzniku sesuvu následující autoři IG průzkumů prováděli průkaznější laboratorní zkoušky (triaxiální zkoušky UU, smykové krabicové zkoušky, stlačitelnost). Na vzorcích zemin odebraných z vrtu Medlánky-1 byly provedeny RTG analýzy za účelem zjištění zastoupení jílových minerálů ve vzorcích.

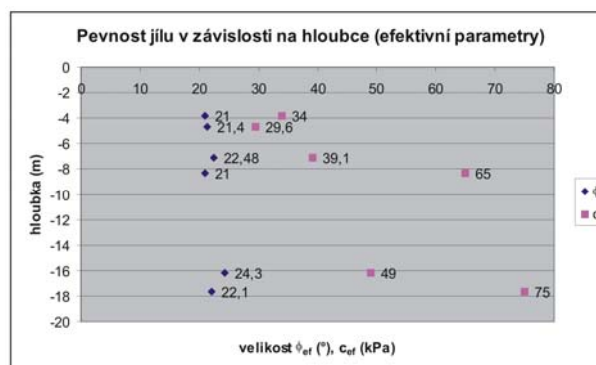
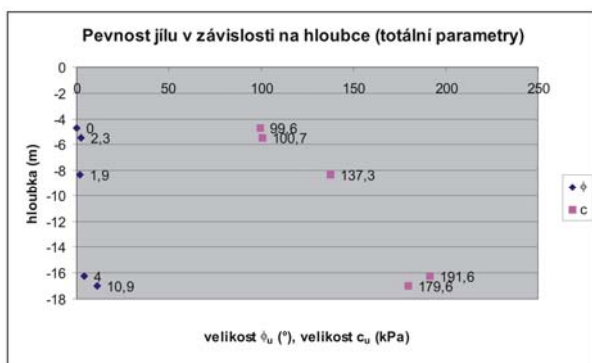
Při hloubení průzkumného vrtu Medlánky-1 (hloubka 17,8 m) bylo prováděno průběžné vzorkování. V průběhu vrtání bylo odebráno 20 neporušených a 10 porušených vzorků zemin pro laboratorní účely. Ve velké míře bylo prováděno testování těles v triaxiálním přístroji a ve smykovém krabicovém přístroji. Všechny výsledky mechanických zkoušek respektují Mohr-Coulombův model.

Pevnost jílu (triaxiální zkoušky UU) byla vzhledem k četnému odběru (dvojitých) neporušených vzorků odvozena z testování 5-7 těles. Vyhodnocení výsledků zkoušek pro jednotlivé hloubky odběru probíhalo pomocí metody nejmenších čtverců.

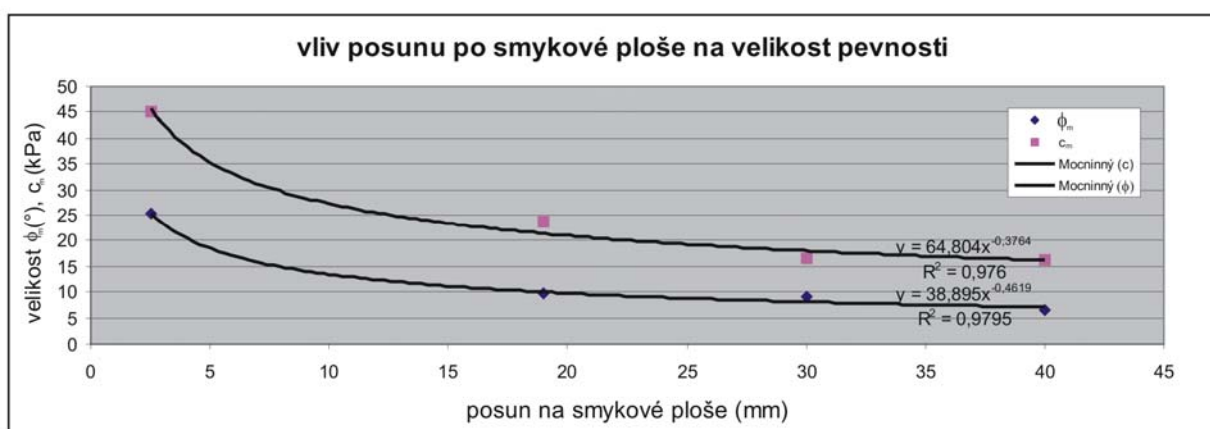
3. VÝSLEDKY

3.1 Vrt Medlánky-1

Z výsledků laboratorních zkoušek vyplývá, že se s rostoucí hloubkou odběru pevnost zeminy zvyšuje (obr. 1, 2). Totální úhel vnitřního tření (zkoušky UU) s hloubkou narůstá z hodnoty $\pm 0^\circ$ (měkká konzistence, hloubka 3,5 m) až do 11° (pevná konzistence, hloubka 17,8 m). Se zvětšující se hloubkou odběru roste také velikost pevnostních charakteristik v efektivních parametrech. Úhel vnitřního tření se mírně zvětšuje; jeho velikost se pohybuje v intervalu 21° až 24° . Velikost koheze se zvětšuje výrazněji, avšak rozptýlené hodnoty je velký (30-75 kPa).



Obr. 1: Velikosti totální pevnosti v závislosti na hloubce odběru (triaxiální zkoušky UU) **Obr. 2:** Velikost efektivních parametrů pevnosti v závislosti na hloubce odběru



Obr. 3: Graf znázorňující vlivu posunu na pevnost (rychlý posun 0,8 mm/min) po již existující smykové ploše. Testování probíhalo ve smykovém krabicovém přístroji.

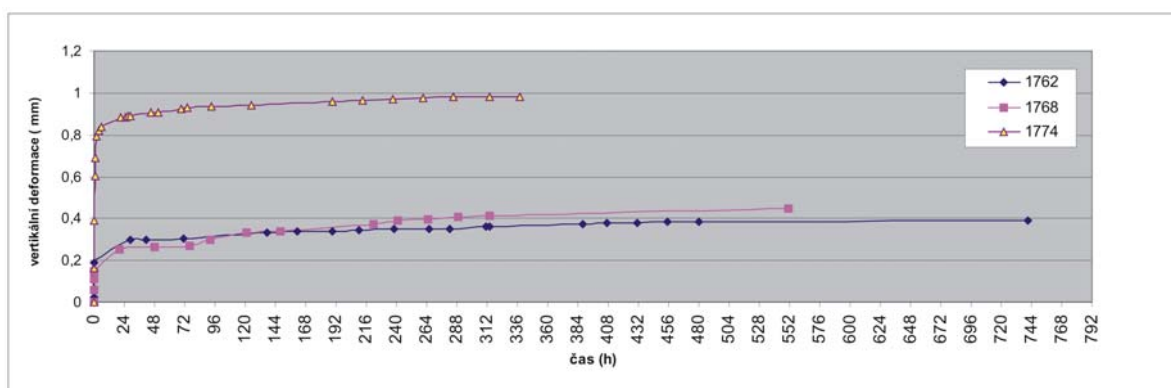
Ve smykovém krabicovém přístroji byl testován vliv délky pohybu na smykové ploše na velikosti (pevnosti) úhlu vnitřního tření a velikosti koheze (hloubka odběru jílu 7,1 m). Pokles pevnosti jílu na smykové ploše v závislosti na délce posunu lze vyjádřit mocninnou funkcí (obr. 3). Původní pevnost neporušeného vzorku (při standardním testování dle ČSN 72 1030) je vyjádřena parametry o velikosti $\phi_{ef} = 22,5^\circ$, $c_{ef} = 39,1$ kPa.

U testovaného jílu se zřejmě uplatňuje vliv rychlosti prováděné zkoušky. Při rychlejším posunu krabic, který měl modelovat pohyb po existující smykové ploše, dosáhl vzorek větší vrcholové pevnosti ($\phi_m = 25,3^\circ$, $c_m = 45,1$ kPa) než vzorek původně neporušený.

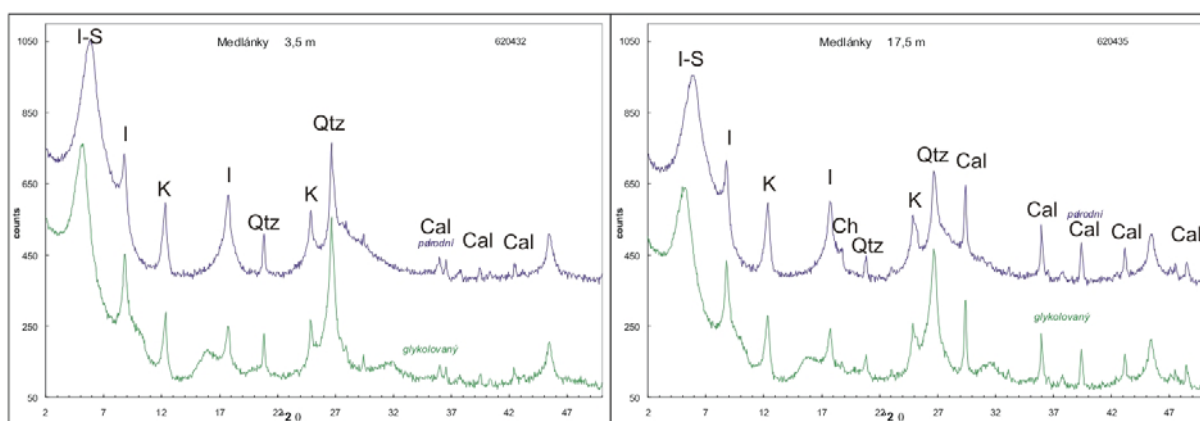
Laboratorními analýzami bylo zjištěno, že s rostoucí hloubkou roste vlhkost zeminy ze 30 % až na 40 %. Současně bylo zjištěno, že jíl odebraný z báze vrtu vykazuje 2,5 x větší bobtnavost než vzorky z mělkých odběrů. Předpokladem byly významné mineralogické změny jílu, zejména přítomnost smektitu (montmorilonit) v hlubších partiích vrtu.

Z odebraných vzorků jílu byly prováděny RTG difrakční analýzy. Nejnázornější příklady jsou z hloubek 3,5 m a 17,5 m (obr. 5). Z RTG analýz oproti předpokladům vyplývá, že se zastoupení jílových minerálů v profilu vrtu zásadně nemění.

V povrchových partiích je zastoupeno více směsného minerálu illit-smektit, na jehož úkor směrem do hloubky přibývají kaolinit, illit a chlorit. Významné je, že sediment odebraný z povrchu není téměř vápnatý (obr. 5), naopak jíl z báze vrtu je tvořený až z 15 % karbonátem.



Obr. 4: Srovnání výsledků poměrné jednoosé deformace (bobtnání) v čase (vzorek č. 1762 hloubka odběru 3,5 m, č. 1768 hloubka odběru 11,2 m, č. 1774 hloubka odběru 17,8 m). Bobtnání bylo prováděno v edometrickém přístroji, krabice se vzorkem byla zalita vodou.



Hloubka	Kaolinit	Illit-smektit	Expanda-bilita	Illit detrit.	Chlorit	Křemen	Σ
(m)	(%)	I-S (%)	S vs I-S (%)	(%)	(%)	(%)	
3,5 m	13	65	90	17	0	5	100
11,3 m	20	55	80	20	0	5	100
17,5 m	23	45	85	25	3	4	100

Obr. 5: Grafický záznam RTG analýz jílových minerálů a vyhodnocení semikvantitativní analýzy z Medlánek *Vysvětlivky:* I-S - illit-smektit, I – illit, K – kaolinit, Ch – chlorit, Qtz – křemen, Cal – karbonát (kalcit)

3.2 Další vrtné průzkumy (lokality Medlánek)

Doplňující IG průzkum prováděl v lokalitě Medlánek (Vlček a kol. 2005). V rámci průzkumu bylo provedeno 8 průzkumných vrtů, bylo však odebráno pouze omezené množství neporušených vzorků pro laboratorní analýzy. Provedená triaxiální zkouška UU (vrt VS3, cca 50 m po svahu od vrtu Medlánek-1, hloubka 3,1 m) dosáhla obdobného výsledku jako vzorek odpovídající hloubky z vrtu Medlánek-1 ($\phi_u = \pm 0^\circ$, $c_u = 108$ kPa). Srovnatelné výsledky (z různě situovaných vrtů) byly dosaženy i pomocí smykové krabicové zkoušky ($\phi_{ef} = 24,2-27,5^\circ$, $c_{ef} = 25-38$ kPa). Vlhkost zkoumaných zemín se pohybovala v intervalu 33-41 %.

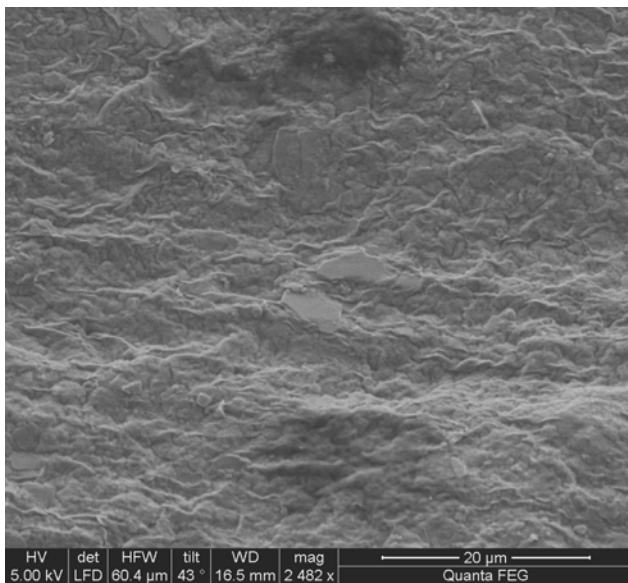
Laboratorní rozbor podzemní vody (Fojtík 2005) prokázal abnormálně vysokou koncentraci síranových (2680 mg/l), hydrogenuhličitanových (800 mg/l) a volných iontů vápníku (530 mg/l).

3.3 Brno – Židenice a Brno - Vinohrady

Další výzkumy mechanických vlastností neogenních jílu provádí autor i v jiných částech města Brna. Zvětralé neogenní jíly byly v rámci disertační práce zkoumány také na lokalitách Vinohrady a Židenice. Na vzorcích jílu, které byly testovány ve smykovém krabicovém přístroji, bylo zjišťováno chování „šupinek“ jílových minerálů na smykové ploše. Fotografie byly pořízeny na elektronovém mikroskopu FEI QUANTA FEG 200 v režimu LoVac, 80 Pa, H₂O, detekce: LFD – sekundární elektrony. Testovaný jíl tuhé až pevné konzistence měl kolmou orientaci na předpokládanou vrstevnatost, současně pohyb na smykové ploše (v krabicovém smykovém přístroji) byl orientován paralelně s protažením krystalů (obr. 7). Šupinky byly porušeny stříhem, nedošlo k jejich rotacím do pozic paralelních se smykovou plochou, jak je všeobecně předpokládáno (např. Mencl 1966).

4. DISKUSE

Pevnostní charakteristiky zastižených zemin se na lokalitě Medlánský s narůstající hloubkou odběru výrazně mění. S hloubkou odběru zeminy narůstá vlhkost sedimentu a zřejmě vlivem cementace a dilatance na smykové ploše úhel vnitřního tření a koheze. Povrchové partie jsou chudé na karbonáty, často se zde však vyskytují drúzy sádrovce. Jíl z báze vrtu je oproti povrchu tvořen až z 15 % karbonáty. Při RTG stanovení zastoupení jílových minerálů nebyly zjištěny velké rozdíly mezi povrchem a hlouběji odebranými sedimenty.



Obr. 7: Smyková plocha vytvořená laboratorně ve zvětralém neogenním jílu (Brno-Židenice) se stříhem porušenými šupinkami slíd a jílových minerálů - orientace šupin subhorizontální (foto Z. Frgala)

Obnažené spodnobadenské jíly v povrchových partiích zvětrávají za úbytku karbonátů (současně mění svoji barvu). Karbonáty dříve tvořily cementační tmel mezi jednotlivými šupinkami fylosilikátů, čímž zvyšovaly pevnost jílu. Úbytek karbonátů na povrchu zkoumaného profilu lze vysvětlit pomalými krasovými procesy. Toto je způsobeno reakcí kalcitu s vodou; voda obsahuje rozpuštěné hydrogenuhličitanové ionty (P. Rovnaníková), které se do podzemní dostávají vsakem dešťové vody.

V povrchových partiích (do 6 m) zkoumaného profilu byly zjištěny velké drúzy sádrovce, jejichž vznik lze vysvětlit reakcí síranových iontů obsažených ve vodě (vznikají oxidací pyritu) s ionty vápníku uvolněnými krasovými procesy z kalcitu. Vlivem krystalizace sádrovce dochází k potrhání jílu, neboť jeho molární objem je asi dvakrát větší než molární objem kalcitu (Linde 1994). Důležitým aspektem pro proces potrhání jílu je také velký krystalizační tlak sádrovce až 28,2 MPa (Heidingsfeld 1997), který zde několikanásobně převyšuje tlak z nadloží.

Trhlinami v jílu proniká do zeminného masívu dešťová voda, která způsobuje další zvětrávání sedimentu a bobtnání jílu. Při adsorpci vody na povrch šupinek klesá síla chemických vazeb mezi krystaly, což také mohlo zásadně ovlivnit pevnost sedimentu (Šimek *et al.* 1991). U jílu je smyková pevnost na existujících smykových plochách 2,5 x nižší než vrcholová (vlastní pozorování, Mencl 1966). Na smykové ploše již proběhla dilatance, jsou zde porušeny cementační vazby a obvykle zde dochází alespoň k drobnému prohnětení zeminy (Mencl 1966). U překonsolidovaných jílu vzniká dokonce na smykové ploše důsledkem dilatance sání podzemní vody, čímž dochází k bobtnání jílu a jeho změknutí.

Dřevo nalezené v průzkumném vrtu Medlánky-1 v hloubce 17 m bylo evidentně pohřbeno během svahového pohybu, je podle datování starší než 40 000 let. Ze studia fotografií jílu odebraných na Vinohradech vyplývá, že pokud v jílu vznikne smyková plocha, dojde k porušení šupinek jílových minerálů stříhem (obr. 7) za vzniku křehké diskontinuity. Pokud však do trhliny (smykovou plochu) pronikne mineralizovaná voda se snadno migrujícími prvky (Fe, Mn), dojde ke krystalizaci cizorodých minerálů. Výplně eliminují tixotropické vlastnosti jílu a diskontinuity tím pádem rapidně snižují pevnost jílu.

5. ZÁVĚR

Sanovaný svah v Brně–Medlánkách je paleosesuv, který byl reaktivován nesprávně navrženými zemními pracemi. V povrchových partiích zeminného masívu dochází ke krasovnění kalcitu a tím porušení cementačních vazeb mezi krystaly jílu. Reakcí volných iontů Ca^{2+} s SO_4^{2-} (+ $2\text{H}_2\text{O}$) dochází ke vzniku sádrovce, jehož vysoký krystalizační tlak způsobuje potrhání jílu. Migrující voda v trhlinách způsobuje další zvětrávání, měknutí a tím i snížení pevnosti jílu. Velký vliv na zvětrávání jílu a změny struktury má i promrzání (Hohmann-Porebska 2002). Dlouhodobým intenzivním zvětráváním jílové zeminy se postupně zhoršují původní stabilitní poměry do té míry až nastane sesutí svahu. Ke vzniku sesuvů docházelo v místě staveniště i v dávné minulosti (doložen je sesuv starší než 40 000 let). Jedná se o tedy kontinuální proces spojený s erozí neogenního jílu probíhající zřejmě již nedlouho po ústupu spodnobadenského moře (16,5 MA).

6. LITERATURA

- Fojtík, K. (2005): Brno – Nové Medlánky – obytný soubor – sanace sesuvu. — MS, K. Fojtík. Brno.
- Grünwald, Z. (2003): Inženýrsko geologický průzkum pro bytové domy Brno – Medlánky. — MS, HIG geologická služba. Brno.
- Heidingsfeld, V. (1997): Fyzikální a chemická koroze stavebních materiálů. — *in* Kotlík, P. *ed.*: Voda – nepřítel památek, Sborník Stop, 9-12. Praha.
- Hohmann-Porebska, M. (2002): Microfabric effects infrozen clays in relation to geotechnical parameters. — *Applied Clay Science* 21, 77-87. Elsevier Science.
- Lide, D. R. (1994): CRC Handbook of Chemistry and Physics – 75th Edition. — CRC Press. Boca Raton, Ann Argot, London, Tokyo.
- Mencl, V. (1966): Mechanika zemin a skalních hornin. — Academia. Praha.
- Poul, I., Štábl, S., Lidmilová, M. a Kučera, P. (2005): Brno – Nové Medlánky – obytné soubory, zpráva o provedené analýze lokality. — MS, SG Geoprojekt, s.r.o. Brno.
- Poul, I. a Štábl, S. (2006): Problémy svahových deformací při realizaci obytných budov v Brně – Medlánkách. — *Juniorstav* 2006, 4, FAST VUT v Brně. 145-150.
- Vlček, P., Štábl, S. a Poul, I. (2005): Brno-Medlánky, Obytné soubory – závěrečná zpráva. — MS, SG Geoprojekt, s.r.o. Brno.
- Šimek, J., Jesenák, J. Eichler, J. & Vaníček, I. (1991): Mechanika zemin. — SNTL. Praha.