

PŘÍSPĚVEK K PŘEKONSOLIDOVANÝM JÍLŮM V BRNĚ

CONFERENCE PAPER ON THE OVERCONSOLIDATED BRNO-CLAY

Ivan Poul¹

Abstract

Foundation of the buildings on the overconsolidated clays in town Brno is merged with wide problems. In general there is an assumption of $\pm 0^\circ$ angle of internal friction - ϕ_u (in 100% saturated clays, UU triaxial testing). However it does not operate in Brno-Neogene clays completely. In the depth below 10 m Poul (2007) made out ϕ_u higher volume than zero. The research was made on the building site Brno - Medlánky to find out a reason of a slope instability. Based on the RTG analyses and mechanical soil-testing, there was proved the direct influence of mineralogy on clay solidness. The relation between mineralogy, clay-structure and mechanical behavior is discussed in the conference paper.

Keywords

Clay, mineral, mechanics, consolidation, Mohr-Coulomb, internal friction, cohesion

1 PROBLÉMY S NEOGENÍMI JÍLY V MĚSTĚ BRNĚ

Na okrajích města Brna dochází k výstavbě budov na půdě, která zatím byla využívána pouze pro zemědělské účely. Při průzkumech pro stavební účely dochází ke zjišťování nových poznatků z různých oborů. Jako nejvíce problematické se jeví zakládání na vysoceplastických jílech, které představují v Brně velkou část geologického podloží. Toto můžeme rozdělit dle stáří na horniny výrazně předkvartérní a z geologického hlediska téměř současný kvartérní pokryv (spraše, svahoviny, šterky). Starší horniny můžeme generalizovat do dvou částí: na severozápadě je podloží budováno vyvřelými a metamorfovanými horninami (skalní horniny proterozoického stáří), na jihovýchodě aglomerace se jedná o neogenní mořské jíly. Horniny různých stáří jsou charakteristické odlišnými mechanickými vlastnostmi. Skalní horniny: žuly a ruly (ČSN 73 1001, R1-R5) budují strmé svahy a významné morfologické elevace, kdežto jíly (ČSN 73 1001, F8 CH/CV) tvoří podloží rovin a výplň v tektonicky predisponovaných depresích.

Neogenní mořské jíly, které známe pod historickým názvem „tégly“, jsou zeminy jejichž mechanické vlastnosti se v různých částech města zásadně liší. Ač jsou jíly typické tuhou až pevnou konzistencí, jsou velmi náchylné k objemovým změnám, rozbídnosti a k sesouvání. V povrchových partiích jíly zvětrávají a zásadně mění své mechanické vlastnosti. Nezvětralé jsou proměnlivě vápnité zeminy modrošedé až nazelenalé barvy; zvětralé mohou být běžové až nahnědlé barvy. V jihovýchodní části Brna se v jílech vyskytují často zvodnělé proplásky jemnozrnných písků písků. Vzhledem k tomu, že se často jedná o překonsolidované zeminy, bývají tektonicky (křehce) porušeny, což znepříjemňuje podzemní dobývací práce (tunely, kolektory).

1.1 Příklady staveb na jílech v městě Brně

1.1.1 Brno-Medlánky

V městské části Brno-Medlánky započala na jaře roku 2005 výstavba rozsáhlého sídliště několikapatrových obytných souborů. Inženýrsko-geologický průzkum nesprávně hodnotil staveniště jako druhou geotechnickou kategorii a na základě toho byly pro výpočty použity směrné normové charakteristiky (pro 2. GK přípustné). Geolog doporučil zakládání 5-patrových budov ve svahu (1:10) na vysoceplastických jílech (F8 CH) „plošně“. Projektant základových konstrukcí navrhl založení hlubinné. Po započítání zemních prací došlo vlivem podkopání svahu ke vzniku plošného sesuvu. Sesuvné pohyby způsobily až „vytečení“ vysoceplastických jílu z pod základové spáry základové desky, současně došlo k obnažení hlubinných základových konstrukcí. Aby svážné pohyby nepokračovaly, byla níže po svahu realizována štetovnicová stěna „Larsen“. Nad konstrukcemi (na hranici s parcelami jiných vlastníků) byla postavena 300 m dlouhá kotvená pilotová stěna.

1.1.2 Průzkum pro plánovaný tunel Vinohrady na brněnském VMO

Geotechnický a geofyzikální průzkum pro plánovaný tunel VMO Vinohrady započal v létě roku 2006. Z průzkumu vyplývá, že ražba tunelu bude probíhat v několika dílčích úsecích ve velmi odlišných geotechnických podmínkách (zvětralé až navětralé granitoidy, zvodnělé písky, vysoceplastické jíly, hlinité šterky a spraše). V trase tunelu – v tektonických depresích (sídlíště Vinohrady, Židenice - park Akátky) byly zjištěny zvětralé neogenní jíly různých mechanických vlastností i vzhledu. Tyto jíly způsobovaly již v minulosti velké problémy ve stavební praxi. Jižní svah

¹ Ivan Poul, RNDr., Ústav geotechniky, FAST, VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, e-mail: istvan@igeo.cz

vinohradské plošiny byl během budování náspu pro komunikaci (městský okruh) stabilně porušen a musel být sanován pilotovou stěnou, která se v současné době nalézá pod silnicí (V. Horák, ústní sdělení).

2 ZÁKLADNÍ POZNATKY

Zastoupení jílových minerálů v soudrzných zeminách velmi ovlivňuje mechanické vlastnosti. Neobvyklé vlastnosti soudrzných zemin bývají vysvětlovány v závislosti na mineralogickém složení (Lambe a Martin 1957). Halloyzit je tvořen rourkami, které obsahují velké množství vody a mají i velmi nízkou objemovou hmotnost, montmorillonit je vzhledem ke svojí struktuře značně náchylný na objemové změny. S rostoucím obsahem vody se snižuje smyková pevnost. Problémy nastávají u vrstevnatých jílů, kde se mění zastoupení jílových minerálů a tím i mechanické vlastnosti.

2.1 Vazby mezi atomy a atomární stavba krystalů jílových minerálů

Základní jednotkou jílu jsou 4-stěny Si-O₄ anebo 8-stěny Mg-OH a Al-OH (uspořádané v rozích). Blíže o atomární stavbě mluví čtyři Paulingova pravidla:

- každý kladný iont je v koordinačním mnohostěnu obklopen několika zápornými ionty, počet je dán poměrem poloměrů iontů (ionty se musí dotýkat opačně nabitého, mezní možnost je, když se dotýkají dva stejně nabitě)
- koordinační mnohostěny mohou mít společné atomy
- společné hrany a plochy ve struktuře snižují stabilitu (shodně nabitě ionty se dostávají blíže, odpuzují se)
- nízkovalenční ionty s vysokým nábojem jsou ve struktuře umístěny co nejdál od sebe (silně se odpuzují)

Poddle Paulingova principu mohou mít kyslíky pouze dvě společné Si 4-stěny. Z toho vyplývá, že se shlukují do koncentrických struktur po šesti 4-stěnech. Kyslíky též spojují čtyřstěnné kruhy a osmistěnné sousedního shluku. Polohy v 8-stěnech jsou obsazeny Mg²⁺, v každé jednotkové buňce jsou 3 ionty Mg (pouze 2/3 poloh jsou zaplněny Al³⁺ v dioktaedrické vrstvě). V šupinách jílových minerálů rozlišujeme dvě vazby: kovalentní (společné volné elektrony) a iontové. Tyto vazby jsou velmi pevné a je velmi obtížné je porušit. Ve struktuře však často dochází k iontové záměně, což ovlivňuje síly vazeb – do koordinačního mnohostěnu je možné umístit pouze podobné ionty (nejčastěji dochází k výměnám Al³⁺, nebo Fe³⁺ za Si⁴⁺ anebo Mg²⁺ za Al³⁺).

Mezi krystaly (tvaru destiček) existují sekundární vazby: van der Waalovy vazby a vazby vodíkové (vodík působí jako vazba mezi dvěma silně zápornými plochami), velikost vazby je asi 1/10 iontové. To znamená, že kolmo na směr působení vazeb je dvojice krystalů oslabena v pevnosti ve smyku. V případě malé vzdálenosti mezi deskami (>1 Å) jsou sorbované kationy (Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺) schopné vytvořit dvojvrstvu a tím vzniknou velmi silné vazby (až 100 kJ/cm²), které se chovají jako neoddělitelné. Oddělení je možné pouze chemickým způsobem (výměnou kationů Ca²⁺ za Na⁺).

2.2 Voda

Důležitou součástí zeminy je voda; mechanické vlastnosti jílu výrazně závisí na obsahu vody. Voda má v jílových minerálech specifickou funkci; vlastnosti vody se mění při různých skupenstvích a v závislosti na vazbách mezi molekulami. Vodu v jílu (myšleno zemině) je možné v širším kontextu rozdělit na **pevně vázanou, vodu v dipólech** (plasticko-viskózní) mezi krystaly a **volnou**.

V elektromagnetickém poli dochází ke tvorbě dipólů molekul vody; umožňuje jí to vhodný úhel mezi H-O-H. Čtyři volné molekuly vody mohou vytvořit 4-stěnu a vzhledem k vhodné velikosti (molekula kapalné vody má rozměr 0,958 Å) se shlukují do hexagonálních útvarů (podobně jako tetraedry či oktaedry jílu). Grim (1953) zjistil, že sorbovaná voda vytváří nad tetraedrickou vrstvou kruh polarizovaných molekul vody; vazba je nad iontem Si. Voda je tedy sorbována na povrch jílové částice a tím se stává při běžných přírodních podmínkách její nedělitelnou součástí. Odlišné skupiny jílových minerálů jsou schopné vázat odlišné množství vody. Toto závisí na tvaru krystalu, specifickém povrchu, převládajícím náboji a na kationech zapracovaných do struktury. Poměr hrany ku ploše udává celkový náboj krystalu, hodnoty pro typické minerály uvádí Stepkowska (1968): u kaolinitu asi 12 %, illitu 6 % a montmorillonitu 2 % (jedna vrstva sorbované vody vytváří u kaolinitu vlhkost 0,3 %, u montmorillonitu a illitu 2,4 %).

Destičky jílových minerálů (umístěné k sobě paralelně) jsou na plochách shodně nabity a navzájem se odpuzují a současně přitahují vodíkovými nebo van der Waalovými silami, tím pádem se přímo nedotýkají. Vzdálenost, kde se odpudivé a přitažlivé síly rovnají uvádí např. Lambe (1960): u kaolinitu 7 Å, u montmorillonitu 12 Å (u malé vzdálenosti desek jsou kationy rozmístěny rovnoměrně). Je všeobecně známo, že kaolinit obsahuje pouze nepatrné množství vody (M<1%) naopak minerály skupiny smektitů (montmorillonit) obsahují až 700 % vody. Molekuly vody jsou u montmorillonitu osmotickými silami tlačeny mezi krystaly a oddalují je. Mezi dva krystaly montmorillonitu je

možné umístit maximálně tři molekuly vody (více vody je možné vmístit pouze při mechanickém porušení vazeb mezi šupinami).

Plasticko-viskózní voda je typ, který se nedostává do pohybu ve smyslu Darcyho zákona. Tato voda je dokonce schopna přenášet i slabé napětí, lze ji však ze zeminy snadno vytlačit nebo odpařit. V širším kontextu je třeba uvažovat o plasticko-viskózní hmotě (a ne o kapalině). Tato voda není příliš ovlivňována vnějšími silami, při proudění se nepohybuje. Toto se uplatňuje asi do vzdálenosti 10 molekul od plochy krystalu (Mencl 1966). Tloušťka této vrstvy může být až 1000 Å (ve vzdálenosti větší než 10 molekul je síla vazeb minimální).

Volná voda se při napětí pohybuje - v pórech tak vzniká proudění. Vodu je možné ze zeminy snadno vysušit (při 105°C).

2.3 Struktura jílu

Struktura jílovitých zemin a jílu může velmi zásadně ovlivňovat mechanické vlastnosti zeminy. Rozlišujeme několik typů zrnitostních struktur, které jsou dány sedimentačním prostředím a pozdějším vývojem. Volně sedimentující šupinky jílových minerálů se k sobě přednostně natáčí hrana k ploše (jsou opačně nabitě). Ve slané vodě vzniká mikrostruktura „dům z karet“ (hrany se dotýkají ploch), ve sladké vodě vznikají struktury, kde se hrany dotýkají ploch ale současně jsou zde i plochy dotýkající se paralelně (Kazda 1968).

Floktuovaná struktura vzniká při vyšší koncentraci rozpuštěných iontů v roztoku. Krystaly jílových minerálů koagulují (shlukují se) ve vločky se zárodkem floktuované (vzpříčené) struktury. Jílové krystaly se zejména shlukují kolem nečistot a vytváří tak větší částice (vločky). Jedna částice obsahuje 100 až 1000 základních vrstviček (tloušťka 0,01-0,1 mikro μm). Koagulace funguje podle předepsaných rovin a za působení elektrolytu. Pokud je velká koncentrace roztoku, vločky jsou malé (2-30 μm). Naopak pokud je voda příliš čistá anebo obsahuje velké množství alkálií ke koagulaci nedochází. Podobně je tomu u příliš koncentrovaných roztoků. Důležitým faktorem je též pH vody. Viskozita „kaolinitové suspenze“ se zvyšuje se snižujícím se pH roztoku. Kyselé ionty H_3O^+ se sorbují na hrany a zvyšují tak přitažlivost k plochám. V případě zásaditého roztoku se na hrany navazují OH^- a snižuje se tak kladný náboj (může se přeměnit až na záporný), současně roste výměnná kapacita (Stepkowska 1968).

Vlivem vysušování elektrolytu dochází také ke koagulaci. Při pokračujícím vysušování (volné a plasticko-viskózní vody) vzniká vlivem negativního kapilárního tlaku zpevnění (Schalek 1968). Vznikají čtyřúhelníky, rovnoběžníky (diamantová struktura) a trojúhelníky. Nejpevnější koagulované útvary jsou trojúhelníky, neboť vnitřní přitažlivé síly i konsolidační síly mají podobný směr a tvar zpevňují. U jiných tvarů vlivem konsolidace dochází k natáčení částic do pozice šupin navzájem paralelní. Trojúhelníky vznikají za vysoké koncentrace elektrolytu. Jsou izotropně velmi pevné, aniž by došlo ke smykovému porušení nedovolují bobtnání jílu. Z diamantové struktury (rovnoběžnostěn) mohou při smykovém porušení vzniknout trojúhelníkové struktury. Ve slané vodě vznikají za asistence jemných pískových zrn tzv. „prázdné struktury“ vyplněné volnou vodou (Kazda 1968).

Dispergovaná struktura vzniká u sladkovodních jílu s velkými odpudivými silami mezi záporně nabitými plochami záporně. Šupiny jsou od sebe dostatečně vzdáleny, při čemž se orientují paralelně se siločarami (radiálního) gravitačního pole. Pórovitost je zde velká až střední, závisí na konsolidačním tlaku, který zeminy prodělala během svého vývoje (např. Mencl 1966).

Jíly jsou izotropní, pokud neprodělaly výraznou konsolidaci. Původní struktura je vnějšími procesy deformována (konsolidace, překonsolidace) a dochází k rotacím šupin do pozice k sobě navzájem paralelní. Orientovaným napětím se částice usměřují – vzniká **paralelní struktura**.

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

V předešlé kapitole jsme si ukázali, že mechanické vlastnosti závisí na mineralogickém složení. Dále závisí na granulometrii, tvaru zrn, dotyku částic, cementaci, vodě a elektrolytu v pórech zeminy. Pevnost zeminy budeme popisovat podle Mohr-Coulombova modelu.

3.1 Pevnost (ve smyku)

Před překročením vnitřního tření mezi částicemi (doposud nedojde k porušení ve smyku) se jemnozrná zemina deformuje zhruba podle Hookova zákona. Po překročení vnitřního tření se chová plasticky aniž by se zmenšoval odpor na smykové ploše (dle Mohr-Coulombova modelu elasto-plastická pevná hmota). Na základě tohoto pozorování jsou jíly nazývané jako „kohezivní zeminy“. Bishop prováděl pokusy s různě saturovanými zeminami a zjistil, že méně saturované zeminy mají vyšší pevnost. Při zkoušce pevnosti, kdy je saturace 100%, vzniká v pórech značný tlak vody

(je téměř nestlačitelná), může docházet k porušování vazeb a neuplatňuje se tření mezi zrnny. Tím pádem se velikost (totálního) úhlu vnitřního tření blíží k 0° a pevnost je definována pouze kohezí.

Jinak je tomu u zkoušek odvodněných, kdy se plně uplatňuje tření mezi částicemi. U tuhých jíílů byl pozorován velký rozdíl mezi odvodněnou pevností vrcholovou a reziduální (dostatečně dlouhý pohyb po smykové ploše). Bjerrum (1967) dokonce pozoroval u překonsolidovaných zemín křehké chování. Předpokládá se, že od doby porušení zeminy (všesměrné uspořádání částic) dochází na smykové ploše k rotacím částic do pozice paralelně se smykovou plochou, tak aby tvořily při pohybu minimální překážky. Jakmile dojde ke vzniku smykové plochy klesá pevnost.

Velmi důležitým faktorem je uspořádání částic; přednostní uspořádání částic snižuje pevnost (šupiny jílových minerálů jsou uloženy paralelně). Největší pevnost má struktura „trojúhelníků“, nejnižší pevnost byla pozorována u struktury paralelní (Kazda 1968). Bylo prokázáno, že nejnižší pevnost jílu ve smyku je v případě, kdy normálová napětí σ_1 a σ_2 leží v rovině paralelní s usměrněnými šupinami jílových minerálů (Skempton a Hutchinson 1969). U překonsolidovaných neogenních jíílů v Brně dále ovlivňuje dilatance na smykové ploše a cementační vazby. Dle Mencla (1966) mohou cementační vazby zvyšovat úhel vnitřního tření až o 3° . Dilatance se při nízkém nadloží uplatňuje málo.

3.2 Bobtnavost

Mezi dvěma částicemi jílových minerálů působí odpudivé síly (plochy jsou shodně nabitě) a současně i síly přitažlivé. V určité vzdálenosti, která je specifická pro jednotlivé skupiny jílových minerálů, dochází k vyrovnání odpudivých a přitažlivých sil. Mezi částicemi není vzduchoprázdno, ale osmotickými silami je mezi částice tlačena voda (viz 2.2). Závislost odpudivosti na vzdálenosti destiček je např. u montmorillonitu logaritmická (Norrish a Ransell-Colom 1961). Velmi důležitým poznatkem je přímá závislost přiblížení dvou částic (překonání odpudivosti) na konsolidačnímu napětí. Při konsolidaci se zvyšují síly stlačující destičky k sobě, čímž dochází k vypuzení vody z prostoru mezi částicemi. Při pomalém zatěžování se může zemina plasticky přetvářet bez porušení a ztráty vazeb, po odtížení dochází pomalu k návratu do původní pozice (pružné chování, Schalek 1968). Bez zatížení tedy dochází k nasávání vody mezi částice až do vyrovnání odpudivých, přitažlivých sil. Tehdy v jílu vzniká záporný pórový tlak.

3.3 Změny pevnosti vlivem promrzání jílu

Ve studených regionech mírného klimatického pásu se během zimy několikrát opakují cykly promrznutí země a opět roztátí. Takovéto cyklické změny mají velký vliv na mechanické vlastnosti jemnozrnných zemín (stlačitelnost, pevnost). Současně dochází i k chemickým změnám, jedná se o tzv. „aktivitu sodíku“, kdy kationy Ca^{2+} , Mg^{2+} jsou během cyklů promrzání nahrazovány za Na^+ . Změny struktury jsou ovlivňovány fázemi transformace vody v pórech zeminy (vznikají zde čočkovité útvary tvořené ledem). Při zmrznutí je minerální skelet dehydratovaný – struktura jílových minerálů se zmenšuje a deformuje (okolo vznikají ruptury viditelné elektronovým mikroskopem). Nejvíce se deformace projevují u jíílů obsahujících smektit nebo kaolinit v kombinaci s přísávkem klastického křemene. U kaolinitu vznikají dutiny mnohem větší (až několik setin mm, Hohmann-Porebska 2002). Pomalé tečení ledu způsobuje pohyb vlhkosti po případné smykové ploše a tím i snížení části pevnosti (kterou jinak způsobuje dilatance).

Velký nárůst pevnosti byl pozorován pokud smyková plocha vznikala kolmo na ledové plochy. Původní hodnoty jsou $\phi = 10,5^\circ$, $c = 96,3$ kPa, pokud je smyková plocha položena paralelně se zmrzlými částicemi ledu dochází k nárůstu úhlu vnitřního tření na úkor koheze $\phi_1 = 22,4^\circ$, $c_1 = 63,7$ kPa při smykové ploše kolmé na ledové plošky pevnost i koheze zásadně narůstají $\phi_2 = 45^\circ$, $c_2 = 112,5$ kPa (Hohmann-Porebska 2002).

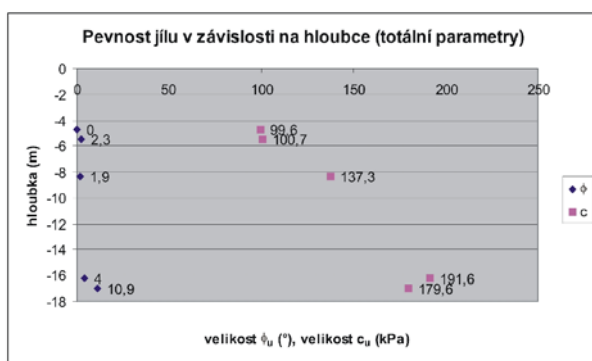
4 VLASTNÍ POZOROVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Na lokalitě Brno-Medlány bylo v rámci různých etap průzkumu pro projektovou a stavební činnost provedeno velké množství vrtů a penetračních sond, jejichž výsledky měl autor příspěvku k dispozici. Pro účely disertační práce byl vyhotoven průzkumný vrt Medlány-1, ze kterého bylo odebráno 20 neporušených a velké množství porušených vzorků pro laboratorní účely (fyzikálně-indexové a mechanické vlastnosti zemín, RTG difraktometrie, mikrosonda, elektronový mikroskop). Dále byl na lokalitě provedeny tři geofyzikální profily georadarem (Hubatka 2007). Výzkumy v jiných lokalitách (Vinohrady, Židenice, Staré Brno, Horní Heršpice) byly vázány na průzkumnou anebo stavební činnost firem GEOTest Brno a.s., SG – Geotechnika, a.s., Skanska DS, a.s. Byly prováděny následující laboratorní zkoušky: triaxiální zkoušky typu UU, smykové krabicové zkoušky, stlačitelnost, bobtnavost, stanovení vlhkosti, zrnitosti a konzistenčních mezí.

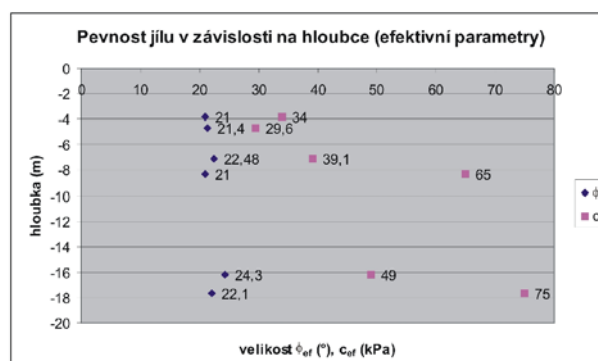
4.1 Jíl z lokality Medlány

Z petrologického popisu všech vrtů vyplývá, že přibližně svrchních 12 m je tvořeno pokryvem, který vznikl zvětráváním, sesouváním a přeplavováním obnažených partií spodnobadenských jíílů. Nejsvrchnějších 6 m je tvořeno jíilem, který je potrhaný a současně obsahuje velké drúzy sádrovce. Barva sedimentu je proměnlivá - byl zastížen jíil

rezavo-šedé až nahnědlé barvy. Hluběji byl zastižen homogenní zelený jíl. Z výsledků laboratorních zkoušek vyplývá, že se s rostoucí hloubkou odběru roste pevnost zeminy (obr. 1 a 2). Totální úhel vnitřního tření s hloubkou narůstá z hodnoty $\pm 0^\circ$ (měkká až tuhá konzistence, hloubka 3,5 m) až do 11° (pevná konzistence, hloubka 17,8 m). Velikost pevnosti v efektivních parametrech se zvyšuje mírněji, velikost ϕ_{ef} se pohybuje v intervalu 21° až 24° . Velikost koheze se zvětšuje výrazněji, z 30 až na 75 kPa.



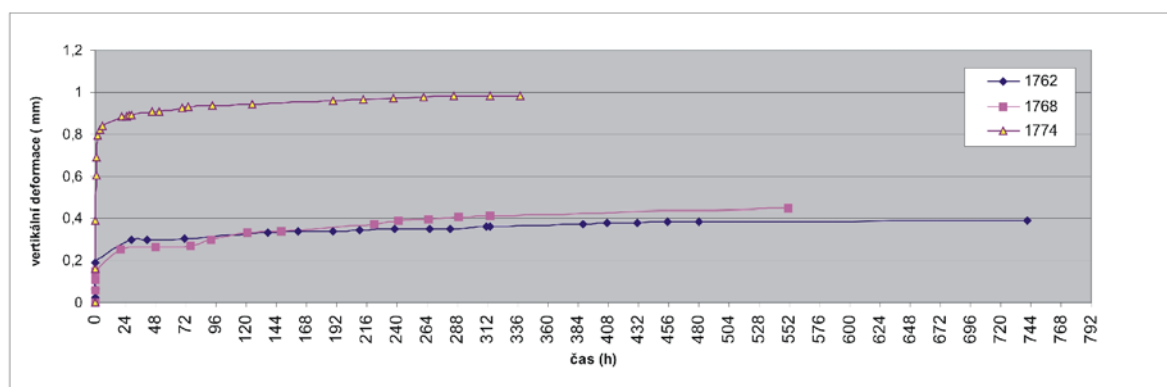
Obr. 1: Velikosti totálních parametrů pevnosti v závislosti na hloubce odběru (modře hodnoty ve stupních, fialově v kPa)



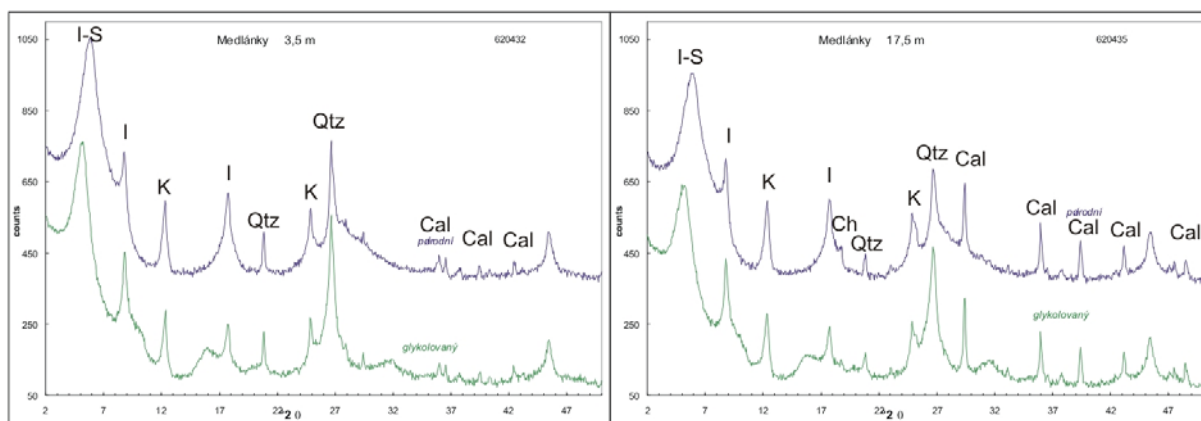
Obr. 2: Velikosti efektivních parametrů pevnosti v závislosti na hloubce odběru (modře hodnoty ve stupních, fialově v kPa)

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 (obr. 3). Předpokladem byly významné mineralogické změny jílu, avšak nebyly potvrzeny (obr. 4).

Z odebraných vzorků jílu byly prováděny RTG difrakční analýzy. Nejnázornější příklady jsou z hloubek 3,5 m a 17,5 m (obr.4). Z RTG analýz oproti předpokladům vyplývá, že se zastoupení jílových minerálů v profilu vrtu zásadně nemění. V povrchových partiích je nepatrně více zastoupen směsný minerál illit-smektit, na jehož úkor směrem do hloubky přibývá kaolinit, illit a chlorit. Významné je, že sediment odebraný z povrchu není téměř vápnatý (obr. 4), naopak jíl z báze vrtu je tvořený až z 15 % karbonátem. Laboratorní rozbor podzemní vody (Fojtík 2005) prokázal abnormálně vysokou koncentraci síranových (2680 mg/l), hydrogenuhličitánových (800 mg/l) a volných iontů vápníku (530 mg/l).



Obr. 3: 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.

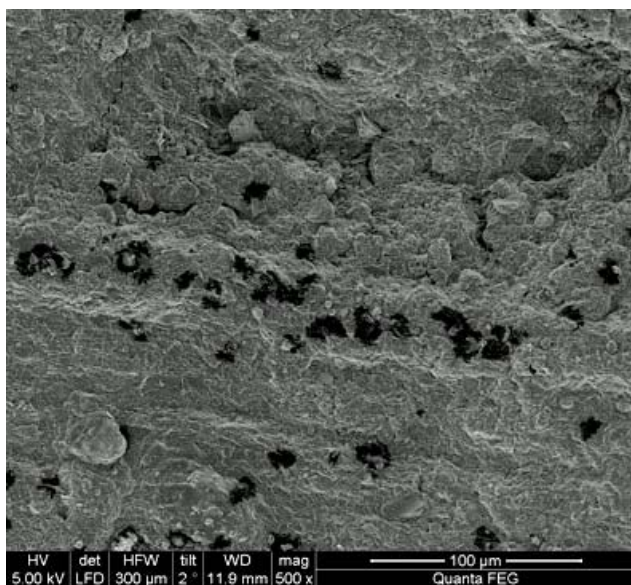


Hloubka	Kaolinit	Illit-smektit	Expanda bilita	Illit detrit.	Chlorit	Křemen	Σ
(m)	(%)	I-S (%)	S vs I-S (%)	(%)	(%)	(%)	
3,5 m	13	65	90	17	0	5	100
11,3 m	20	55	80	20	0	5	100
17,5 m	23	45	85	25	3	4	100

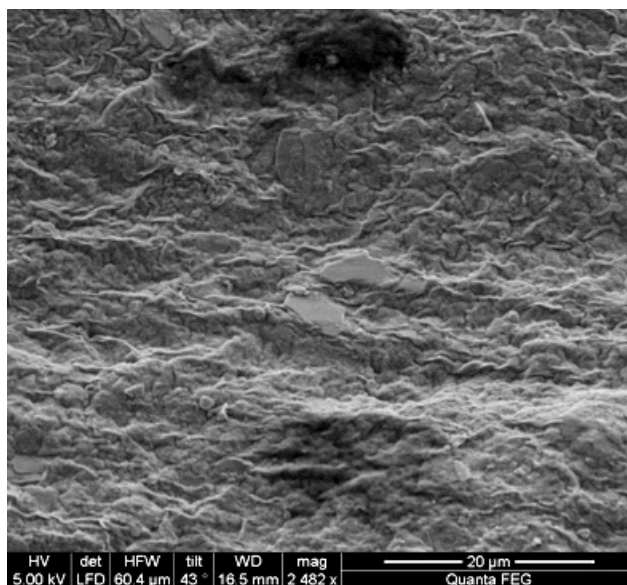
Obr. 4: Grafický záznam RTG analýz jílových minerálů a vyhodnocení semikvantitativní analýzy z Medlánek
Vysvětlivky: I-S - illit-smektit, I – illit, K – kaolinit, Ch – chlorit, Qtz – křemen, Cal – karbonát (kalcit)

4.2 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. 5 a 6). Šupinky byly porušeny stříhem, nedošlo k jejich rotacím do pozic paralelních se smykovou plochou, jak je všeobecně předpokládáno.



Obr. 5: Detail striace (orientace subhorizontální) na vzorku zvětralého neogenního jílu z lokalitay Židenice (Jv-5), foto Z. Frgala



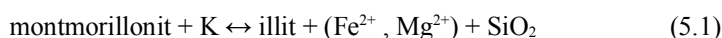
Obr. 6: Šupiny slíd ze sousedního vzorku (testování pobyhalo ve smykovém krabicovém přístroji, pohyb byl paralelní s nejdelší osou krystalů), šupinky byly porušeny stříhem, foto Z. Frgala

5 DISKUSE

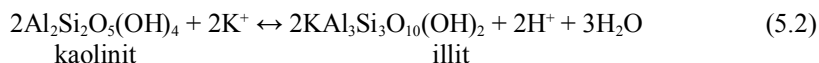
Překonsolidované jíly v podmínkách jižní Moravy tvoří přechod mezi zeminami a poloskalními horninami. Překonsolidace byla způsobena zvýšeným normálovým napětím nadloží. Po zakončení sedimentace a ústupu moře (před 16,5 MA) probíhala konsolidace nejefektivněji (zemina nebyla nadlehčována vztlakem vody). Během následujících milionů let docházelo ke zvětvávání a erodování jílu, tak že se na povrch dostávaly stále hlouběji pohřbené partie. Předpokládána vysvětlení mineralogických a mechanických změn překonsolidovaných jílu na lokalitě Medláňky jsou uvedeny v následujících odstavcích.

5.1 Mineralogické změny - rekrystalizace jílových minerálů

V otevřeném přírodním systému jsou alkalické a křemité komponenty mobilní, kdežto hliník je inertní. Většina mineralogických reakcí je možná mezi minerálními fázemi $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$. Přeměna jednotlivých skupin minerálů probíhá buď samovolně (energie se uvolňuje) anebo dodáním energie. Všeobecně platí, že z jílových minerálů vznikají diagenetickými pochody (za aktivity nezbytných prvků) slídy. Naopak zvětváváním slíd vznikají opět jílové minerály (Meunier 2005). Rekrystalizací montmorillonitu (ze skupiny smektitů) za vysoké aktivity K^+ , zvýšenou teplotou a tlakem vzniká slída - illit (rovnice 5.1)



Obdobně může vznikat illit za vysoké aktivity K^+ rekrystalizací kaolinitu (rovnice 5.2)



Takové tvrzení mohou dokládat RTG difrakční analýzy jílu z Medlánek; bylo zjištěno, že největší procentuální zastoupení má přechodový minerál illit-smektit (I-S), často se též vyskytuje illit, byl zaznamenán i kaolinit (viz obr. 4). Velké zastoupení slídy a přechodového minerálu I-S v jílu na lokalitě v Medláňkách poukazuje na vysoké tlaky, kterým byl jíl původně vystaven. Mineralogické složení jílových minerálů se v profilu vrtu Medláňky-1 mění nepatrně.

Dnes exhumované jíly tedy byly stlačeny sedimenty v nadloží, které byly postupem času v celé mocnosti erodovány. Vzhledem k tomu, že jíly byly pohřbeny a stlačovány ve velké hloubce, kde působí fluida, byly krystaly jílových minerálů stmeleny kalcitem (vzniká autigeně anebo se uvolňuje ze schránek organismů). Silná cementace (zemina obsahuje až 15 % hmotnosti kalcitu) změnila výrazně mechanické vlastnosti zemin. Zeminy jsou tuhé až pevné konzistence a chovají se křehce ba dokonce občasně vykazují lasturnatý lom. Překonsolidace spojená s cementací není plně vratným jevem, poukazuje na to výskyt těchto jílu v korytech řek, které si uchovávají své původní mechanické vlastnosti téměř v nezměněné míře (např. jíl v řece Svatce u Nosislavy). Ve vodním toku není dostatek ionů, které by způsobily retrogradní rekrystalizaci (rovnice 5.1 a 5.2).

5.2 Vliv tixotropie

Při zatížení jílu (tlakovém namáhání) dochází k pohybu pórové vody, která je nucena překonávat odpor pevně vázané vody a odpor z vlastní viskozity. Postupem času však dojde ke zneutralizování pórových tlaků. Při pomalém zatěžování se může zemina plasticky přetvářet bez porušení a ztráty vazeb (Schalek 1968). Zatížení působící na šupiny jílových minerálů v kolaugačních útvarech způsobuje reorientaci krystalů; po odtížení (převládnu-li odpudivé síly mezi krystaly nad kompresními a cementačními) dochází pomalu k návratu do původní pozice. Bez zatížení může v jílu vznikat záporný pórový tlak, protože je do „nadzvedávající se“ struktury vlivem osmotických sil nasávána voda.

Původní struktura překonsolidovaného jílu z Medlánek byla zřejmě „dům z karet“. Tato struktura byla vlivem velkého zatížení transformována na paralelní, tak že byla překonána odpudivá síla (konsolidačními procesy) a šupiny jílových minerálů se téměř dotýkají. Během stlačování byla ze zeminy vytlačována voda. Velmi vysoké tlaky současně mohou způsobit rekrystalizace jílových minerálů. Avšak k rekrystalizaci je důležitý dostatečný přínos odlišných kationů, aby se mohla uplatnit iontová výměna (Meunier 2005, Meunier a Velde 2004).

5.3 Smykové zkoušky

U plně saturovaných jílu předpokládáme v totálních parametrech nulový úhel vnitřního tření (např. Terzaghi, Peck a Mesri 1996). Avšak laboratorními zkouškami jílu typu UU jsem zjistil, že neogenní jíl který není zvětralý (neobsahuje sádrovec a obsahuje velké množství karbonátů) vykazuje úhel vnitřního tření až 11°. Naopak zvětralý jíl (v povrchových partiích) vykazuje úhel vnitřního tření $\pm 0^\circ$. V efektivních parametrech k nárůstu úhlu vnitřního tření téměř nedochází. Rozdíl mezi velikostí efektivního úhlu vnitřního tření z povrchu ve srovnání s jilem z hloubky (18 m) je asi

2°. Domnívám se, že tento rozdíl je způsobený cementačními vazbami (kalcit, dolomit), které byly na povrchu erodovány. Vliv cementačních vazeb, které způsobují nárůst ϕ až o 3° popsal pro brněnský jíl Mencl (1966).

Vysvětlení nárůstu pevnosti v totálních parametrech (triaxiální zkouška UU) je mnohem obtížnější. Předpokládáme, že po ukončení působení konsolidačního napětí (které výrazně převyšuje odpudivost shodně nabitých ploch) dochází vlivem tixotropie jílu alespoň částečně k obnovování struktury „dům z karet“. Současně dochází k nasávání vody do prostoru mezi šupinami. Hoffmann (1957) zjistil, že při dokonalém rozdužení „paralelní struktury“ vznikne velice rychle struktura „dům z karet“. K rozdužení paralelní struktury může vlivem tangenciálního napětí docházet také na smykové ploše. Vzhledem k tomu, že porušení zeminy smykovou plochou v triaxiálním přístroji není paralelní s uložením šupin, může dojít k významnému prohnětení jílu na smykové ploše. Důsledkem prohnětení a nedostatku vlhkosti na smykové ploše (v aktivní zemině) vzniká podtlak (záporné pórové tlaky) a voda je nasávána ze zeminy neaktivní (kladné pórové tlaky). Na základě uvedených indicií se domnívám, že v případě překonsolidovaných cementovaných jílu dochází během zkoušky UU na smykové ploše ke vzniku záporných pórových tlaků a díky tomu se může uplatňovat tření mezi šupinami.

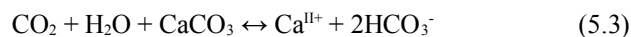
5.4 Použití rekonstituovaných vzorků pro studium jílu

V dnešní době je pro testování mechanických vlastností jílu používáno tzv. rekonstituovaných vzorků. Jedná se o vzorky, které jsou připravovány uměle v laboratoři. Postup přípravy je založen na kompletním porušení původních vazeb jílu a cementace a následně je „hmota“ konsolidována nebo hutněna na původní geostatické napětí. Ze ztuhnuté hmoty (jílu) se posléze připravují vzorky pro laboratorní zkoušky; výrobu lze několikrát opakovat.

Mezi stoupenci konstitučního modelu Cam Clay panují předpoklady, že se jedná o vzorky, které lépe reprezentují skutečné vlastnosti zeminy. Bishop (in Schokking 1997) zjistil, že překonsolidovaný London Clay, který také položil jako základ modelu Cam-Clay, je při mechanickém testování i za působení nízkého normálového napětí vysoce dilatantní. London Clay není cementován kalcitem (Clausen a Gabrielsen 2002), proto jeho časté srovnávání s neogenním jílem v Brně zavádějící (výzkumy na FAST v Brně, např. Uhrin 2004). Hoffmann (1957) navíc zjistil, že při rozdužení a přehutnění jílu (rekonstituce) roste pevnost – vznikne novotvořená struktura „dům z karet“. Novotvořené vazby zvyšují pevnost ve smyku a smykové porušení vznikne tam, kde je nejvyšší vzdálenost mezi částicemi. Použití rekonstruovaných vzorků doporučuje Šimek a kol. (1991) pouze tehdy pokud není jíl cementován.

5.5 Zvětrávání kalcitu, krystalizace sádrovce a uvolňování cementačních vazeb

V základové půdě probíhá dle laboratorních chemických analýz velké množství různých chemických reakcí. Tyto reakce lze rozpoznat pomocí různých indikačních znaků. Mezi takové lze považovat změny mineralogického složení a zvýšené koncentrace některých iontů (oproti normálu). V podzemní vodě, která je obsažena v překonsolidovaných vápnatých jílech se jedná zejména o síranové ionty (SO_4^{2-} 2518-2702 mg/l), hydrogenuhličitanové ionty (HCO_3^- 702-842 mg/l) a kationy vápníku (Ca^{2+} 535-541 mg/l). Z petrologického a RTG rozboru zeminy vyplývá, že povrchové partie jílu (v Medlánkách i Vinohradech) jsou chudé na karbonáty, ale naopak bohaté na sádrovec. Úbytek karbonátů se dá vysvětlit „krasověním“ kalcitu, viz rovnice 5.3 (tvorí tmel mezi krystaly jílových minerálů). Medlánkách v hloubce 17 m byl zjištěn obsah karbonátů až 15 hmotnostních procent.



Krasovění je způsobeno průnikem dešťové vody do pórů v zemině; voda obsahuje velké množství atmosférického - rozpuštěného CO_2 . Oxid uhličitý za účasti H_2O posléze reaguje s kalcitem za vzniku hydrogenuhličitanů (reakce je vratná). V zemině je však rozptýleno velké množství síranových anionů (vznikají oxidací pyritu), které zabraňují zpětné reakci (krystalizaci kalcitu). Volné ionty vápníku jsou spotřebovávány během reakce s rozpuštěnými síranovými ionty za vzniku sádrovce (rovnice 5.4).



O faktu že geochemická bilance probíhajících reakcí je vyvážená může svědčit hodnota $\text{pH} = 7,0$. Kalcit i sádrovec mohou v zemině migrovat. Sádrovec má dokonce mnohonásobně vyšší rozpustnost ve vodě (256 mg/100g H_2O při 20°C, objemová hmotnost 2,32 g/cm³) než kalcit (1,4 mg/100g H_2O při 20°C).

5.5 Vliv krystalizace sádrovce na potrhání jílu

Z terénních pozorování i vrtného průzkumu vyplývá, že zvětralé neogenní jily jsou potrhány. Vysvětlení tohoto stavu může být různé: (klasické) - svahovými pohyby, během kterých vznikají hluboké zátrhy. Druhé vysvětlení je pomocí krystalizace sádrovce, což již bylo diskutováno v předešlé podkapitole. Kalcit, který je během předešlých reakcí (5.3 a 5.4) postupně transformován na sádrovec, má téměř poloviční molární objem (36,9 cm³/mol) než produkt reakcí - sádrovec 74,21 cm³/mol (Lide 1994). Z uvedeného vyplývá, že většina volných iontů vápníku je spotřebována na

krystalizaci sádrovce. Vzhledem k tomu, že krystaly sádrovce jsou složitějšího chemického vzorce (složeny z více atomů) a navíc obsahují ve strukturní mřížce navíc dvě molekuly vody (může se jednat dotace z povrchu), zaujmají dvakrát větší objem než kalcit. Zajímavý je krystalizační tlak sádrovce 28,2 MPa (Heidingsfeld 1997), který může během růstu drúz způsobit až potrhání jílu. Do vzniklých trhlin proniká „agresivní“ dešťová voda (s rozpuštěným oxidem uhličitým), která s dalšími krystaly kalcitu. Jedná se vlastně o jakousi progresivní reakci zvětrávání vápenného sedimentu.

5.6 Zvětrávání illitu

Remmer & Eberl (in Šucha 2001) popsali zajímavý případ, kdy geologický profil obsahoval ve spodní části mineralogickou asociaci bohatou na karbonáty, doprovázenou plagioklasem, illitem, illit-smektitem, kaolinitem a chloritem. Směrem k povrchu se ztrácely karbonáty a pyrit, které byly nahrazeny sádrovcem (v okolí sádrovce je jíl ochuzen o karbonáty, pozorování v Medláncích). Problémem se zabývali také Elsass a kol. (in Šucha 2001), kteří vytvořili názor na genezi popisované asociace. Jedná se o dvou až třístádiový systém. První fáze zahrnovala diagenetickou tvorbu illitu, I-S a chloritu. V další fázi, která probíhala v hypergenním prostředí došlo ke zvětrávání pyritu a vytvoření kyselých podmínek, otvírání illitových vrstev za vniku I-S s větším zastoupením expandujících vrstev. Domnívám se, že podobné geochemické a minerlogické procesy probíhají i během zvětrávání jílu v Medláncích (minerlogické složení viz obr. 4).

Minerál sádrovec má velký vliv na chemické změny uvnitř jílu. Toto bylo pozorováno během provádění experimentu, kdy byl jíl vystaven kontaktu se sádrovcem a jeho krystalizaci (Delmas *et al.* 1985). Při kontaktu jílu se sádrovcem dochází k výměnám kationů Ca^{2+} za Na^+ Mg^{2+} . Krystalizací sádrovce uvnitř jílu vznikají dutiny až trhliny tvaru „lodiček“ veliké 2-3 μm , kterými může migrovat voda do hloubky.

6 ZÁVĚR

Předložený článek vychází ze všeobecně známých předpokladů a znalostí o jílových minerálech. Tyto znalosti byly aplikovány na získané výsledky z lokality Medlánců a Vinohrady. V současné době se jedná o výzkumy, které nejsou dostatečně podloženy. V následujících týdnech bude v Medláncích proveden druhý hluboký vrt, jehož výsledky by měly potvrdit, či vyvrátit hypotézy předložené v kapitole 5.

7 LITERATURA

- Bjerrum, L. (1967): Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlement of building. — *Geotechnique* 17.
- Clausen, J.A. a Gabrielsen, R.H. (2001): Parameters that control the development of clay smear at low stress states: an experimental study using ring-shear apparatus. — *Journal of Structural Geology*, 24, 10. 1569–1586.
- Delmas, A. B., Bini, C. & Berrier, J. (1985): The Effect of Gypsum on the Pore System Geometry in Two Clay Soils. — *Miner. Petrogr. Acta*, 29-A, 499–509.
- Fojtík, K. (2005): Brno – Nové Medlánců – obytný soubor – sanace sesuvu. — MS, K. Fojtík. Brno.
- Heidingsfeld, V. (1997): Fyzikální a chemická koroze stavebních materiálů. — in Kotlík, P. ed.: *Voda – nepřítel památek*, STOP, 9–12. Praha.
- Hoffmann, U. (1957): Tixotropie bei Kaolinit und innerkristalline Quellung bei Montmorillonite. — *Kolloid Zeitschrift*, 5, 151, 8, 97.
- Hohmann-Porebska, M. (2002): Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. — *Applied Clay Science* 21, 77-87. Elsevier Science.
- Kazda, J. (1968): Studium strukturnosti systému: jílová zemina – voda. — in Myslivec, A. ed.: *Ílovité zeminy a ich použitie v stavebníctve*. Vydavateľstvo SAV. Bratislava.
- Lambe, T. W. (1960): A mechanics picture of shear strength in clay. — *Research conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, University of Colorado. 555–580.
- Lambe, T. W. a Martin, R. T. (1957): Composition and engineering properties of soil. — 5. Highway Research Board, 5, 36. 693–702.
- Lide, D. R. (1994): *CRC Handbook of Chemistry and Physics – 75th Edition*. — CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo.
- Meunier, A. (2005): *Clays*. — Springer Berlin, Heidelberg, New York.
- Meunier, A. & Velde, B. (2004): *Illite*. — Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Mencl, V. (1966): *Mechanika zemin a skalních hornin*. — Academia. Praha.
- Norrish, K. a Rausell-Colom, J. A. (1961): Low angle X-ray diffraction studies of the swelling of montmorillonite and vermiculite. — *Proc. 10th National Conference on Clay and Clay Minerals*, University of Texas. Pergamon press. 123.
- Ramamurthy, T. (2001): Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. — *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 5. 683–697.

- Schalek, D. (1968): Niektoré poznatky z experimentálnych prác s tixotropnými zeminami. — *in* Myslivec, A. *ed.*: Ílovité zeminy a ich použitie v stavebníctve. Vydavateľstvo SAV. Bratislava.
- Schockking, F. (1998): Anisotropic strength behaviour of a fissured overconsolidated clay in relation to Saalian glacial directions. — *Engineering Geology*, 49, 31–51.
- Skempton, A.W. a Hutchinson, J.N. (1969): Stability of neutral slopes and embankment foundations. — VII ICSMFE, State of the art. vol. Mexico.
- Stepkowska, E. (1968): Fyzikálno-chemické problémy nasýtených ílov. — *in* Myslivec, A. *ed.*: Ílovité zeminy a ich použitie v stavebníctve. Vydavateľstvo SAV. Bratislava.
- Šimek, J., Jesenák, J. Eichler, J. a Vaníček, I. (1991): *Mechanika zemin*. SNTL, Praha.
- Šucha, V. (2001): *Íly v geologických procesoch*. — Univerzita Komenského Bratislava.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. A Mesri, G. (1996): *Soil mechanics in engineering practice*. — John Wiley & sons, inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Uhrin, M. (2004): Aplikace Cam Clay modelu na brněnský jíl. — MS, FAST, VUT v Brně.

Recenzoval

Kamila Weiglová, VUT v Brně, FAST, Ústav geotechniky, vedoucí ústavu, Veverí 95, 602 00 Brno, email: weiglova.k@fce.vutbr.cz