

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

Monitoring sedání podloží násypů dopravních staveb

(Monitoring of settlement of embankment subsoil)

Petr Karlín



Vedoucí bakalářské práce : Ing. Jan Novotný CSc.

Konzultant : Mgr. David Mašín Ph.D.

Praha, srpen 2010

Prohlášení originality: Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury. V Českých Budějovicích dne 29.8.2009

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Novotnému CSc. za podnětné připomínky, návrhy a svědomité vedení této práce. Stejně tak děkuji Mgr. Davidu Mašínovi Ph.D. za nepostradatelné rady během konzultací. Velké poděkování náleží akciové společnosti ARCADIS Geotechnika za poskytnutí archivních dat, bez kterých by nebylo možné tuto práci zpracovat.

ABSTRAKT

Během každé dopravní stavby se využívá násypů, proto je důležité vykonat podrobný geologický průzkum. Úkolem průzkumu je stanovení vlastností základové půdy (podloží) pro tyto násypy, mosty a jiné objekty závislé na zatížení. U mnoha objektů se projeví nežádoucí snížení násypu během času, tento jev je způsobem především konsolidací podložních vrstev.

Pro lepší predikci hodnot sedání se na základě parametrů získaných z inženýrsko-geologického průzkumu počítají hodnoty konsolidace. V rámci sledování (monitoringu) se měří výšková změna podloží vztažená k referenčnímu bodu. Tyto hodnoty jsou dále zpracovávány a porovnávány s výpočtem. V práci je snaha o unifikaci závislosti zatížení ku sedání, popřípadě zatížení a čas potřebný na 90% konsolidaci.

SUMMARY :

During each transport buildings are used embankments, therefore it is important to carry out a detailed geological survey. The task of the survey is to determine the soil properties (soil) for such embankments, bridges and other objects depend on the load. For many objects is undesirable reduction embankment over time, this phenomenon is mainly caused by the consolidation of underlying layers.

Parameters find out from the engineering-geological survey is calculating for better prediction of settlement which is based on the value of consolidation. In the following monitoring is measured by change in soil elevation relative to a reference point. These values are further processed and compared with the calculation. Main aim of this work is to unify the addition values of loading, settlement and time for 90% consolidation.

OBSAH :

1.	ÚVOD	1
2.	PROBLEMATIKA SEDÁNÍ	1
	2.1 Teorie konsolidace	1
	2.2 Součinitel propustnosti	2
	2.3 Oedometrický modul	2
	2.4 Součinitel konsolidace	2
	2.5 Jednoosá konsolidace	3
3.	NUMERICKÉ METODY VÝPOČTU SEDÁNÍ	3
4.	ZPŮSOBY MĚŘENÍ	4
	4.1 Sledování hladiny podzemní vody	4
	4.2 Měření pórových tlaků	4
	4.3 Hydrostatické měření sedání	5
	4.3.1 Požadavky na instalaci	5
	4.3.2 Požadavky na geodetické měření	6
	4.3.3 Vyhodnocení zkoušky	6
	4.3.4 Příklady z realizace a vyhodnocených měření	6
	4.4 Vyhodnocení monitoringu a jeho výpočet pomocí MKP	9
	4.4.1 Srovnávací výpočet pomocí MKP	9
5.	PRAXE V ZAHRANIČÍ	9
6.	METODIKA ZPRACOVÁNÍ DAT	10
	6.1 Zařazení do inženýrsko-geologických regionů	10
7.	DISKUZE	12
	7.1 Grafy závislosti zatížení versus sedání	12
	7.2 Grafy závislosti zatížení a logaritmu času	13
	7.3 Zhodnocení grafů a další možné směry pro zpřesnění výsledků	14
8.	ZÁVĚR	15
9.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	16
10.	PŘÍLOHY	

1. Úvod

Za předmět této bakalářské práce jsem si vybral monitoring sedání násypů dopravních staveb, neboť jsem v průběhu předchozích let mohl během brigád nahlédnout do geotechnické praxe, kde se s tímto fenoménem posledních 15 – 20 let v České republice lze nezdědky setkat.

Práce byla zadána tak, že má za úkol předložit nashromážděná data k posouzení domněnky, že sedání (konsolidace) je proces závislý nejen na výšce násypu, objemové hmotnosti zeminy tvořící násyp a bezprostředním podložím dané stavby, ale že je závislý i na zařazení do příslušného inženýrsko-geologického regionu. Snahou bylo ucelení představ o hodnotách sedání (konsolidace) a času potřebného pro 90% konsolidaci na základě následujících vstupních podmínek – výška násypu, objemová hmotnost a inženýrsko-geologický region. Pro tento účel byla nashromážděna data o měření sedání na lokalitách v rámci České republiky. K dosažení lepší přehlednosti byla vypracována tabulka těchto měření. Pro rozčlenění bylo vybráno členění (dle Pašek, 1982) dále bylo navrženo dělení dle mocnosti stlačované (konsolidované) vrstvy podle poznatků získaných z geologické mapy České geologické služby, resp. z mapového serveru této instituce. Následně byly vytvořeny grafy pro jednotlivá prostředí a podmínky (sednutí, čas, výška násypu atd.). Tyto data jsou podrobena rozboru v diskuzi, kde je poukázáno na problémy v interpretaci, možné chyby v metodice. V závěru jsou již interpretované hodnoty či výsledky, kterých se podařilo dosáhnout.

2. Problematika sedání a její teorie

Sedání je proces výlučně spojený s pojmem konsolidace. Konsolidací se obecně rozumí deformace vícefázového prostředí (zeminy) v čase pod účinkem vnějšího (konstantního či proměnného) zatížení. Tato deformace probíhá jak vlivem postupného vytlačování pórové vody (primární konsolidace), tak rovněž vlivem reologických procesů ve skeletu zeminy (sekundární konsolidace). (dle Vaníčka, 1987) Naše problematika se bude zabývat jen první částí, tzn. primární konsolidací.

2.1 Teorie konsolidace

Konsolidace podloží je proces spojený se změnou objemu, s vytlačováním vody z pórů v zemině vlivem přitížení, to vše je doprovázené sedáním. Celý proces je časově závislý na propustnosti, délce drenážní dráhy a stlačitelnosti zemin. Také proto je nutno brát v úvahu jisté problémy v případech málo propustných zemin. V případě, že jsou nasycené vodou, pak v nich platí Terzaghiho princip efektivních napětí.

$$\sigma' = \sigma - u$$

kde σ' - efektivní napětí; σ - celkové (totální) napětí; u - pórový tlak

Tento princip platí pouze pro stupeň nasycení $S=1$, pro menší nasycení je nutno do vzorce včlenit též tlak vzduchu v pórech.

V případech, kdy pórový tlak roste, dochází k poklesu smykové pevnosti, což může vést ke ztrátě stability jinak bezpečného násypu.

Před vlastním přitížením podloží je hodnota pórového tlaku rovna tlaku hydrostatickému, jenž je závislý na hloubce hladiny podzemní vody. Při výstavbě násypu se vlivem náhlého přitížení zvýší pórové tlaky v podloží a obzvláště v nepropustných zeminách není umožněno jejich okamžité vyrovnání s okolím. Konsolidace těchto zemin je dlouhodobý proces disipace pórových tlaků do okolí, spojený s nárůstem, které je konečné ve chvíli, kdy je hodnota

pórového tlaku rovna příslušnému hydrostatickému tlaku pro danou hloubku podzemní vody. Časový průběh rychlosti sedání je odvislý od disipace pórových tlaků, a proto rychlost sedání postupně klesá. Obecně je pro násyp nejkritičtější období dosypání násypu, při němž je přetížení největší a i hodnota pórových tlaků je maximální.
(dle Chyczyiová, 2007)

2.2 Součinitel propustnosti (propustnost – K)

Z výše napsaného je možno poznat, že pro konsolidaci jsou klíčové především charakteristické vlastnosti dané zeminy a zatížení. Jako první si popíšeme propustnost (K), jenž je dána vztahem :

$$K = k \cdot \mu / \gamma$$

kde k – hydraulická vodivost (koeficient filtrace); μ – dynamická viskozita vody; γ – objemová tíha vody

Pozn. Hydraulickou vodivost (koeficient filtrace $m \cdot s^{-1}$) k stanovíme dle vzorce $k = Q \cdot L / (h \cdot A \cdot t)$, kde Q – objem proteklé vody; L – výška vzorku; h – rozdíl výšek hladin; A – průřez vzorku; t – čas pomoci stopek.
(dle Boháč, 2008)

zemina	hydraulická vodivost
štěrka	10^{-1} až $10^{-3} m \cdot s^{-1}$
písek	10^{-2} až $10^{-4} m \cdot s^{-1}$
jemnozrnný písek	$10^{-5} m \cdot s^{-1}$
silt(prach)	$10^{-6} m \cdot s^{-1}$
písečnatá hlína	10^{-6} až $10^{-8} m \cdot s^{-1}$
jíl	$<10^{-8} m \cdot s^{-1}$

(tabulka č.1 – typické hodnoty hydraulické vodivosti – upraveno dle Boháč, 2008)

Pozn. Ve starších zdrojích (např. Eichler, Maceková, 1996 a Vaníček, 1987) mohou být definice součinitele propustnosti, propustnosti jiné než výše uvedené.

2.3 Oedometrický modul (E_{oed})

Stanovení modulu je možné v oedometru, kde naměříme potřebné hodnoty deformace při jistém napětí, které posléze dosadíme do vzorce.

$$E_{oed} = \Delta \sigma'_v / \Delta \epsilon$$

kde $\Delta \sigma'_v$ - přírůstek efektivního vertikálního napětí; $\Delta \epsilon$ – přírůstek deformace

Pozn. Oedometrický modul je závislý na hodnotách napětí, proto jej nelze brát jako konstantu pro danou zeminu.

(dle Eichler, Maceková, 1996)

2.4 Součinitel konsolidace C_v

Z předchozích dvou bodů můžeme snadno dopočítat další důležitou hodnotu a to součinitel konsolidace. Součinitel dostaneme pomocí vzorce:

$$C_v = K \cdot E_{oed} / \gamma_w$$

kde K – propustnost; E_{oed} – oedometrický modul; γ_w – objemová tíha vody

Další možností, jak součinitel konsolidace získat je experimentální stanovení z oedometru, kdy do grafu vyneseme zatížení x čas – t a to dvojím způsobem, prvním je Casagrandeho

způsob, kdy čas- t zlogaritmujeme ($\log t$). Druhým možným způsobem je Taylorova metoda, kdy je čas- t odmocněn (\sqrt{t}). (dle Chyczyiová, 2007 a Eichler, Maceková, 1996)

Pozn. Jelikož se součinitel konsolidace počítá z oedometrického modulu, jenž je závislý na napětí, tak ani součinitel konsolidace nelze brát jako konstantu pro danou zeminu.

2.5 Jednoosá konsolidace

Jednoosá konsolidace je termín, který používáme v souvislosti se zjednodušením reálné konsolidace. V tomto pohledu zanedbáváme působení dalších rozměrů (sil), což velmi zjednoduší výpočty i představy o konsolidaci. V tomto případě lze využít Terzaghiho teorii konsolidace jež je taktéž označována jako lineární teorie konsolidace, setkat se lze i s termínem jednoosá konsolidace s lineární závislostí napětí – deformace, který se zdá být nejvhodnější.

Pro platnost této teorie je potřeba, aby platily tyto předpoklady :

- I) zemina je nasycená ($S=1$)
- II) voda i zrna zeminy jsou nestlačitelné
- III) platí tzv. *Darcyho zákon* *)
- IV) zemina je homogenní
- V) deformace pevné fáze je způsobována výlučně efektivním napětím a je lineární a nezávislé na čase (tj. probíhá okamžitě)

Společně s předpokládaným jednoosým stlačením je též nutno uvažovat o jednoosém proudění. Zvláštním případem je tzv. oboustranná drenáž, kdy mohou pórové tlaky disipovat do dvou stran. Důležitost možnosti tohoto zjednodušení je potřebná pro předpověď chování dané zeminy, jelikož takovéto zatížení (resp. konsolidace) je stejné jako zatížení v oedometru. (dle Chyczyiová, 2007 a Eichler, Maceková, 1996)

*) Darcyho zákon - $v = k \cdot i$; v = filtrační rychlost, k = hydraulická vodivost (konstantní), i – hydraulický gradient).

3 Numerické metody výpočtu sedání

Vzorců či způsobů výpočtu sedání existuje hned několik, od těch jednoduchých až po metodu konečných prvků (MKP), řada z nich je pro praktické použití z mnoha důvodů nevyhovující.

$s = h_0 \cdot \Delta\sigma'_v / E_{oed}$, kde h_0 – počáteční mocnost; $\Delta\sigma'_v$ – efektivní přitížení; E_{oed} – oedometrický modul

$s = C_c \cdot h_0 \cdot (1 + e_0) \cdot \log((\sigma_{v0}' + \Delta\sigma'_v) / \sigma_{v0}')$, kde C_c – index stlačitelnosti; h_0 – počáteční mocnost; e_0 – počáteční číslo pórovitosti; σ_{v0}' – počáteční efektivní přitížení; $\Delta\sigma'_v$ – přírůstek efektivního přitížení

$s = h_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_v$, kde h_0 – počáteční mocnost; m_v – součinitel objemové stlačitelnosti; $\Delta\sigma'_v$ – přírůstek efektivního přitížení; Tento vzorec je totožný s prvním vzorcem, jelikož $m_v = 1 / E_{oed}$

$s = -\Delta e / (1 + e_0) \cdot h_0$, kde Δe – změna čísla pórovitosti; e_0 – počáteční pórovitost; h_0 – počáteční mocnost (dle Atkinson, 2007; Boháč, 2008)

Sedání plošných základů může být rozděleno na 3 oddělené komponenty sedání

$s = s_i + s_c + s_s$, kde s – celkové sedání ; s_i – počáteční, neodvodněné sedání ; s_c – konsolidační sedání ;
 s_s – sedání vlivem sekundární konsolidace. (dle Vanička, 1987)

Při stavbě násypů liniových staveb je důležitá též doba sedání. Tato doba se vypočítá dle

$t = T \cdot H^2 / C_v$, kde T – časový faktor; H – drenážní dráha; C_v – součinitel konsolidace

Pozn. U zemin, které mají v podloží nepropustnou vrstvu je H rovno mocnosti zeminy (může drenovat jen vzhůru). V opačném případě se H počítá jako poloviční mocnost (drenuje vzhůru i dolů).

Jelikož je potřeba znát i procentuální stupeň celkového sednutí, byl zaveden tzv. průměrný stupeň konsolidace - U_{avg} , jenž uvádí jaká část pórových tlaků již disipovala.

$U_{avg} = (s(t) - s_i) / s_c$, kde $s(t)$ – celkové (totální) sednutí; s_i – iniciální sednutí; s_c – konsolidační sednutí

(dle Atkinson, 2007 a Eichler, Maceková, 1996)

Pozn. Metoda konečných prvků je nad rámec této práce, proto zde byla pouze zmíněna, způsob reálného použití MKP v počítačovém program je uveden v kapitole 4, podkapitole 4.4

4 Způsoby měření

Monitoring sedání násypů nám má poskytnout celkové výsledky chování podloží během výstavby násypu, v některých komplikovanějších případech též při běžném provozu. Monitoring můžeme rozdělit do tří typů měření.

- sledování hladiny podzemní vody
- hydrostatická nivelace
- měření pórových tlaků

Všechny výše uvedená měření musejí být zhotovena v projektu geotechnického monitoringu, ve kterém se specifikuje umístění hydrostatické nivelace spolu s měřidlem pórových tlaků. Sledování hladiny podzemní vody je nutné započít již před stavbou samotnou (například lze zajistit hodnoty při sledování jímacích objektů v pásmu okolo stavby, kde je možno očekávat narušení hladiny podzemní vody – ochrana jímacích objektů). Pro přesnější hodnoty je nutno zřídit pozorovací vrt u paty násypu.

Pozn. Nově je pro monitoring sedání využíván též inklinometr umístěný vertikálně, jeho velkou výhodou je mnohem větší přesnost měření.

4.1 Sledování hladiny podzemní vody

Jak již bylo výše uvedeno, tak pro přesné hodnoty výšky hladiny podzemní vody je nutné zřídit pozorovací vrt u paty násypu, kde může být nainstalován automatický hladinoměr či můžeme hladinu měřit podle elektrokontaktního hladinoměru. Výška hladiny podzemní vody nám určuje zónu nasycení pórů.

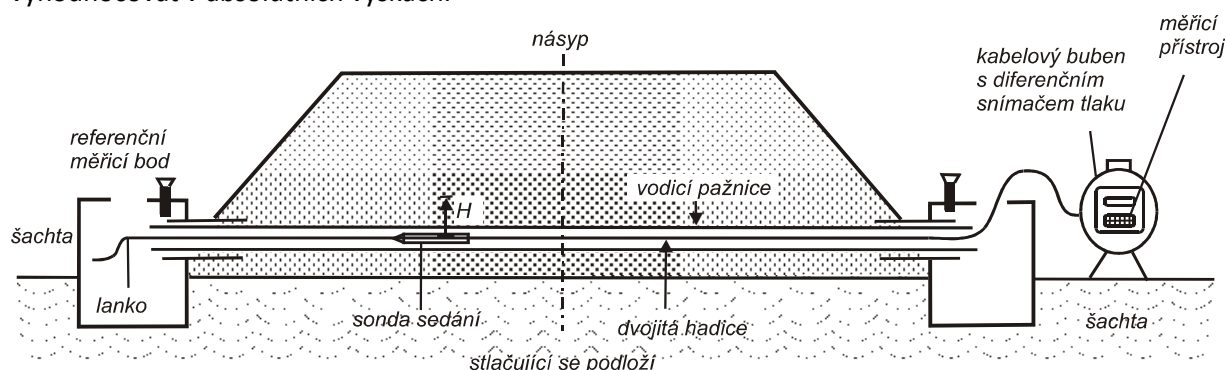
4.2 Měření pórových tlaků

Pro monitoring pórových tlaků se používají piezometry fungující na principu struny, které se osazují do vrtu vyhloubeného v podloží násypu, a to do příslušné hloubky; zpravidla mělčí polohy pro

kontrolu stability a hlubší polohy pro sledování průběhu konsolidace. Zaznamenaný geologický profil vrtu slouží jako upřesnění sledu a charakteru vrstev zeminy pro srovnávací matematický model. V měřeném horizontu je snímač obsypán a od výše položených vrstev utěsněn. Voda vytlačující se z pórů zeminy vlivem přitížení vytváří tlak na sensitivní membránovou destičku, která je spojena s vibrujícím drátem, jenž frekvenčním vlněním odesílá data, ve čtecí jednotce jsou převáděna na digity. Měřené veličiny jsou závislé na teplotě, proto je v sondě umístěn i termistor. Elektrické dráty od snímačů jsou svedeny z každého profilu do sběrného místa, kde se přenosným měřicím přístrojem provádějí pravidelné odečty hodnot tlaku a teploty, které se potom převádějí na hodnoty tlaku. (dle Chyczyiová, 2007)

4.3 Hydrostatické měření sedání

Měření sedání v podloží násypu je prováděno pomocí hydrostatického přístroje pro měření sedání „GLÖTZL, typ IISM 01D“. K tomuto účelu je třeba do sledovaného profilu uložit vodící vodorovnou trubku, ukončenou vně tělesa násypu, při jeho patě, v ochranné rouři. Vodící trubkou je při měření po metrových nebo dvoumetrových měřicích krocích protahována sonda, která měří výškový rozdíl mezi právě proměřovaným bodem a „nulovým“ bodem u ústí vodící trubky. Tak se získá přesný výškový profil celého sledovaného profilu, a to jak co o velikosti, tak časového vývoje. Touto metodou lze sledovat velikost sedání s přesností ± 5 mm. Výškové změny jsou vztahovány k referenčnímu „nulovému“ bodu, který je geodeticky sledován. Tak je možno velikost sedání vyhodnocovat v absolutních výškách.



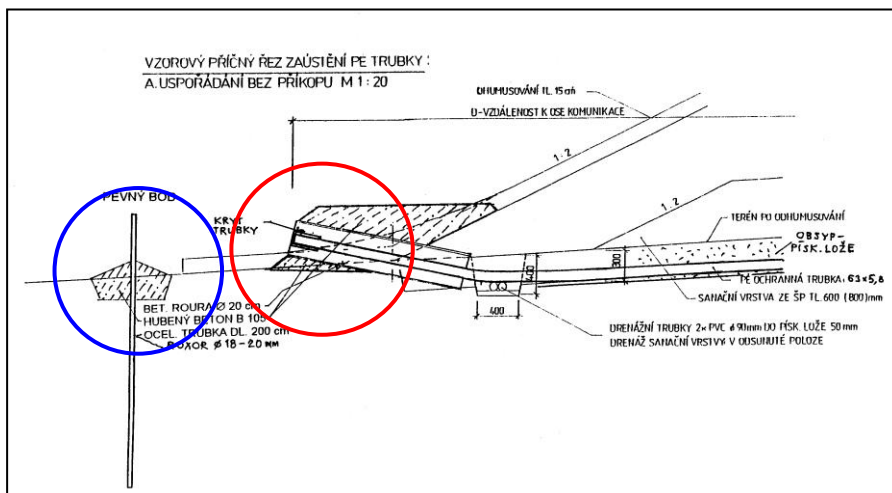
(obr.1 – schéma měřicího profilu – dle Příručky pro měření přístrojem Glötzl)

4.3.1 Požadavky na instalaci

Instalace bude provedena na upravené podložní pláni, před zahájením sypání tělesa silničního násypu. Výškový rozdíl obou stran měřeného úseku nesmí přesáhnout 5m.

Ve vyznačeném profilu provede zhotovitel stavebních prací, podle dispozic zhotovitele monitoringu, rýhu cca 30 cm hlubokou. Do připravené rýhy uloží zhotovitel monitoringu vodící trubku, kterou ukončí v koncových betonových rourách. Poté provede zhotovitel stavebních prací zahrnutí rýhy původním výkopkem.

Zhotovitel stavebních prací, podle dispozic zhotovitele monitoringu, provede instalaci zhlaví monitorovacího systému dle přiloženého nákresu (obr.2)



(obr.2 – příčný řez ústí měřicí trubky dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)



(obr.3 – fotografie ústí měřicí trubky spolu s referenčním bodem, dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)

4.3.2 Požadavky na geodetické měření

Referenční „nulový“ bod musí být nivelován geodety zhotovitele stavebních prací v dohodnutých termínech shodných s prováděním měření sedání, především s ohledem na výškové sedání celého okolí stavby (např. v důsledku snížení hladiny podzemní vody)

4.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Po přepočtení měření pro absolutní výšky je konečným výstupem graf sedání podloží pod konstrukcí. Pro běžné účely lze tento graf vytvořit v jakémkoli tabulkovém procesoru (např. MS Excel, OpenOffice). V praxi se lze setkat i se specializovanými programy (viz. kapitola 4.5)

4.3.4 Příklady z realizace a z vyhodnocení měření

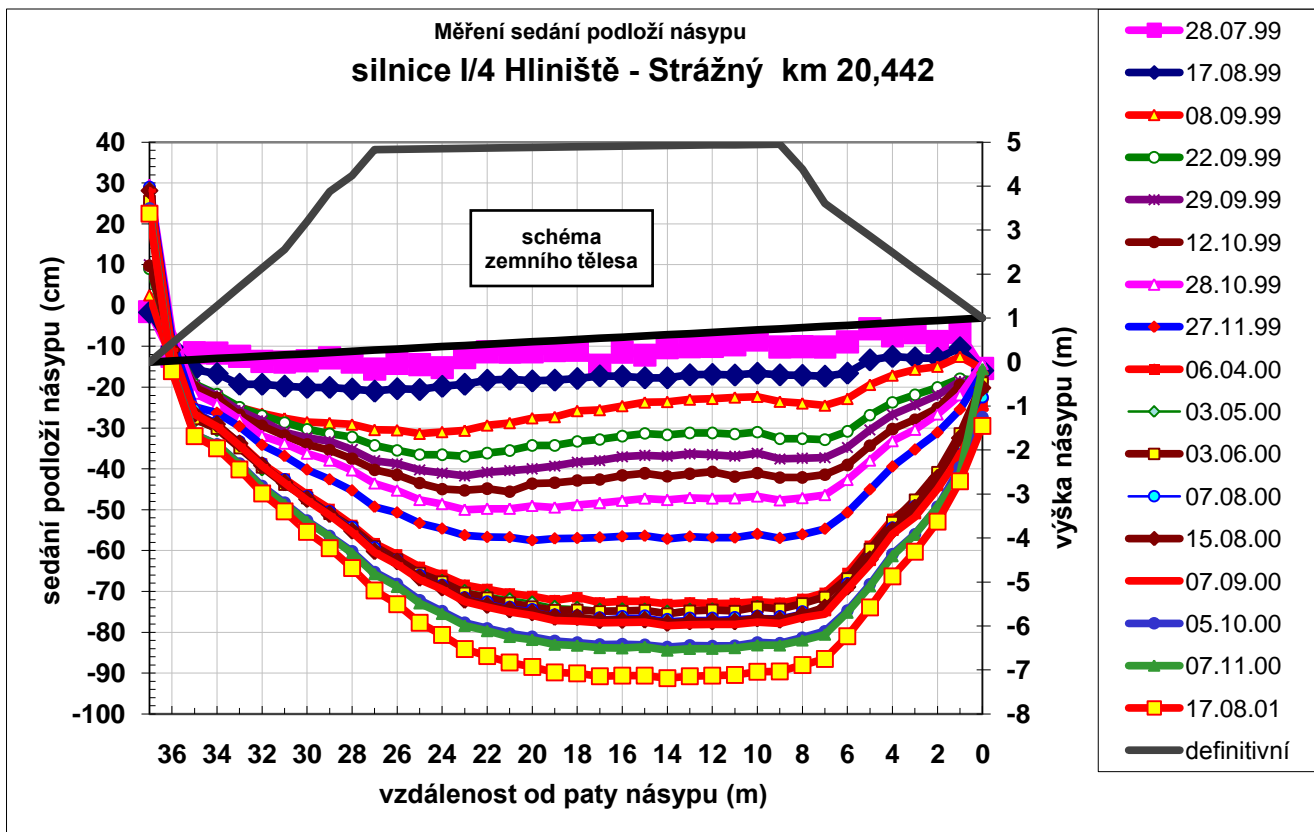
Pokládání měřicího profilu do rýhy provedené do podloží násypu (viz. obr.4) a fotografie již hotového profilu s nadložní vrstvou (součástí je i geotextilie). Vidět lze i referenční bod (betonem vyplněná skruž s ocelovým trnem)(viz. obr.5). Na obr.6 je možné vidět profil s vynesenými hodnotami sedání pro jednotlivá měření, zajímavá je především souvislost snížení sedání u okrajových částí násypu, což je naprosto přesně s předpokladem, že sedání je závislé na zatížení, jenž je na okrajích obecně menší, například protože je menší mocnost násypu.



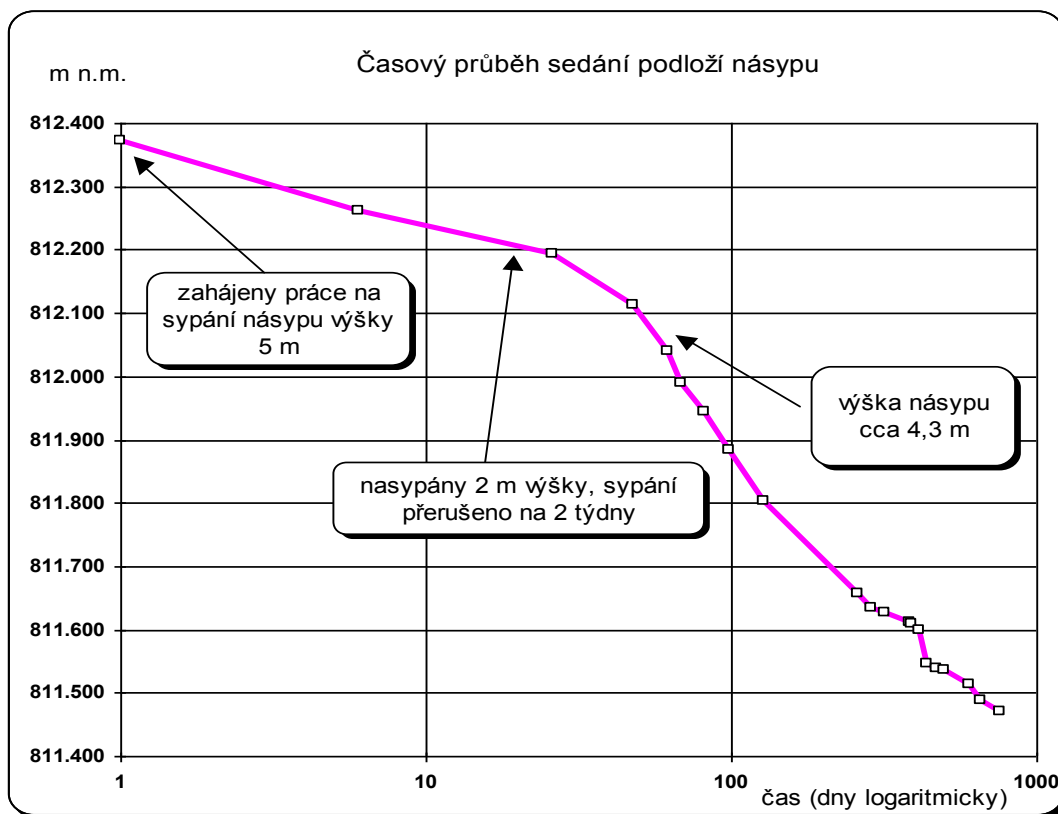
(obr.4 – fotografie při instalaci měřícího profilu, dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)



(obr.5 – fotografie zhotoveného zhlaví, dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)



(obr. 6 – graf sedání násypu – Hlaniště – Strážný, dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)



(obr.7 – časový průběh sedání násypů, dle Instruktažní příručka SG – Geotechnika a.s.)

4.4 Vyhodnocení monitoringu a jeho výpočet pomocí MKP

Samotným výstupem měření jsou zjištěné hodnoty pórových tlaků v daných sondách, poloha hladiny podzemní vody a velikost sedání, odpovídající působícímu přetížení budovaným násypem. Plán frekvence sběru dat je součástí samotného projektu GT monitoringu. V době budování násypu se odvíjí z rychlosti sypání a jeho funkcí je především zajistit bezpečnou stabilitu svahů zemního tělesa. Po skončení sypání se sleduje průběh konsolidace (stanovení sedání z hydrostatické nivelace) a doba zbývající do ukončení konsolidace (z měření pórových tlaků).

4.4.1 Srovnávací výpočet pomocí MKP

Nezávisle na monitoringu je na základě dostupných geotechnických podkladů vypracován srovnávací matematický model ve specializovaném programu např. Plaxis, který používá metodu konečných prvků (MKP) pro prognózu časového průběhu stavu napětí a deformace podle rychlosti výstavby násypu. Dostupná geometrická a geologická data včetně hladiny podzemní vody mohou být optimalizována na základě profilů vrtů, zhotovených pro osazení měřidel pórového tlaku (pokud jsou během výpočtů již k dispozici). Do modelu je nutné zahrnout sanační opatření realizovaná v daném profilu (mají vliv na průběh konsolidace). Výstavba násypu po jednotlivých vrstvách respektuje plán sypání ze stavby (ne vždy je nakonec při skutečném provádění násypu dodržen). Po vyladění matematického modelu je ověřena stabilita zemního tělesa po dosypání a následně určeny referenční pórové tlaky v bodech, které polohově odpovídají osazeným měřidlům, a to pro jednotlivé fáze sypání. Dalším výstupem matematického modelování je stanovení tzv. kritických pórových tlaků, které odpovídají dosažení 1. mezního stavu, tzn. násyp je na pokraji kolapsu. Hodnoty kritického pórového tlaku mají vypovídací schopnost především v mělkých polohách, dotčených potenciální smykovou plochou. Kromě pórových tlaků je možné v každé fázi sypání vyčíslit očekávanou velikost sedání podloží.

(dle Chyczyiová, 2007)

5. Praxe v zahraničí

Sledované tématice se v zahraničí zabývá celá řada specialistů, při podrobnějším hledání jsem našel odborné články především čínských, amerických a evropských geotechniků či vědců. Téma je ovšem v řadě případů jen jedním ze zkoumaných jevů, povětšinou se též zabývají pouze konkrétní stavbou či lokalitou. Z hlediska porovnání metod je nejdůležitějším první níže uvedený.

Zajímavým pohledem na danou tematiku je článek P. Žvanuta – *Measured settlements of the Pesnica high embankment*, ve kterém se snaží shrnout své poznatky o metodách sedání násypů při budování dálnice Pesnica – Šentilj ve Slovinsku. Autor se rovněž zabývá systémem návrhu umístění jednotlivých profilů, specifikuje geotechnické podmínky v rámci stavby (převládají především šedé jíly s vysokou plasticitou, jenž do podloží střídají jíly s organickou příměsí, písky a v podloží je jílovec). Dalším aspektem jeho článku jsou typy měření sedání. Uvádí dvě používané technologie, jde o měřicí plochy a měřicí trubky (hydrostatická nivelace). Postup instalace trubek, tzn. trubky jsou vkládány do 60 cm hluboké rýhy vyhloubené v násypu 1 – 2 metry vysokém. Referenční body pro měřicí přístroj pro hydrostatickou nivelaci jsou upevněny v blocích betonu, které jsou umístěny u ústí trubek. Tyto body jsou geodeticky zaměřeny. Obě metody udávají menší sedání než je skutečnost, neboť jsou měřeny o kousek výše nežli je skutečné rozhraní podloží a násypu.

Dalším článkem, jenž mne při hledání materiálů a podkladů zaujal, je odborný článek *Mechanism and calculation method of rheological settlement of high-filled embankment od Wanga, Lua a Tanga* kteří se zabývají metodami výpočtu reologického sedání. Podle tradičních metod (Terzaghiho konsolidační teorie a 3D Biotova konsolidační teorie) se sedání dá dělit na tři části $S = S_d + S_c + S_s$, kde konsolidace, sedání je deformace způsobená disipací pórových tlaků. Sekundární konsolidace je při návrhu

zanebývána, jelikož je malá, ale její existence ukazuje nedokonalost současných modelů. S využitím běžného reologického Kelvinova modelu se autoři snaží docílit postupu výpočtu optimalizovaného pro navržený schématický diagram. Do tohoto výpočtu zasahují γ_s - objemová tíha vyplňované zeminy před kompakcí, γ_d - objemová tíha suché zeminy, k_c - průměrný stupeň kompakce a V (resp. V') objemy před a po kompakci. Vzorec je stanoven $\gamma_s \cdot V = k_c \cdot \gamma_d \cdot V'$. Celý článek je zakončen tím, že autoři shledávají svoje poznatky správnými, avšak pro budoucí problémy spojené s třídímním nehomogenním nelineárním sedáním jsou spíše pro vhodný model počítaný metodou konečných prvků (MKP).

V příspěvku s názvem *Monitoring and analysis of settlement and stability of an embankment dam constructed in stages on soft ground* od autorů Al-Homouda a Tanashe, která poskytuje informace o monitoringu a předpovědi sedání na sypané vodní nádrži Wadi Mallaha na řece Jordán v Jordánsku. Pro nás poskytuje informace zajímavé především pro velikost celé stavby a výšky nasypaného materiálu, rovněž obsahuje hodnoty pórových tlaků pod takovouto mohutnou stavbou. Zajímavé je porovnání předpokládaného sedání a skutečnosti.

6. Metodika zpracování dat

Nashromážděná data byla převedena do tabulkového procesoru, jednotlivé sloupce byly tvořeny v průběhu samotného sběru dat a to především z důvodu značně rozdílných možností přístupu k informacím u jednotlivých lokalit (měřených profilů). Tabulka obsahuje tyto sloupce: název stavby (nejbližší obec či obce v případě delších staveb), výšku násypu (v metrech), délku měřeného profilu (v metrech), datum tzv. nultého měření (počátek měření), datum posledního vyhodnoceného měření, celkové sedání (v centimetrech), počet dní měření (počet dní mezi nultým a posledním měřením), počet dní potřebných na 90% konsolidaci (hodnoceno na základě vyhodnocených měření a rozdílu mezi měřeními – dle ustalující se tendence), zařazení do inženýrsko-geologického regionu (dle Paška, 1982), zařazení do skupiny dle mocnosti konsolidované vrstvy, kdy I. skupina do 3 m, II. skupina rozmezí 3-5 m, III. skupina mezi 5-10 m a IV. skupina je >10 m (více v příloze číslo 1) další hodnotou je vlhká objemová hmotnost zeminy z níž je konstruovaný násyp stavěn, posledním sloupcem je zatížení podložením násypem (spočteno na základě objemové hmotnosti a výšce násypu) *)

Tyto data byla čerpána ze zdrojů archivu společnosti Arcadis – Geotechnika a.s., internetových mapových aplikací České geologické služby a ústní konzultace se školitelem.

Z těchto dat byly vytvořeny grafy závislostí zatížení versus sedání, zatížení versus čas potřebný na 90% konsolidaci pro jednotlivé regiony a skupiny. Čas je uváděn jako přirozený logaritmus, neboli metodou dle Taylora. Tyto grafy mají potvrdit či vyvrátit výše uvedenou domněnku.

*) Násyp byl uvažován jako homogenní těleso, hodnoty objemové hmotnosti byly předpokládány dle obvyklých materiálů pro danou oblast.

6.1 Zařazení do inženýrsko-geologického regionu

Jednou z hlavních myšlenek této bakalářské práce bylo porovnání výsledků měření v různých geologických podmínkách v rámci České republiky. Pro tuto práci jsem vybral rozdělení Českého masivu na inženýrsko-geologické regiony a oblasti (podle J. Paška, 1982) Pašek rozděluje území naší republiky podle kritéria stejnorodosti geotektonického vývoje a geologické stavby na šest inženýrsko-geologických regionů.

A – Region krystalinika, a – hornatin krystalinika (svislá šrafa), b – vrchovin krystalinika (šikmá šrafa)

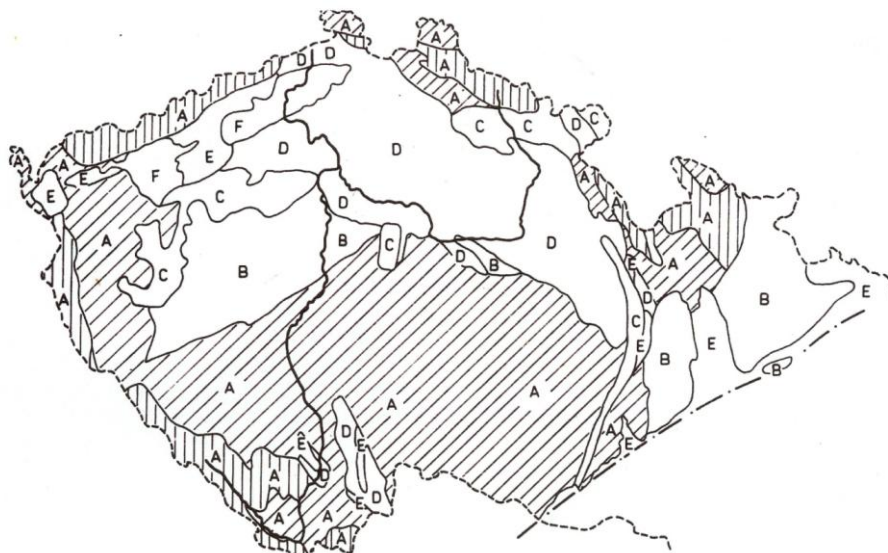
B – Region nemetamorfovaného předvariského podkladu

C – Region permokarbonských pánví

D – Region křídových pánví

E – Region terciérních depresí

F – Region neovulkanitů



(obr. 8 - upraveno z J. Pašek – Schéma rozdělení Českého masivu na regiony, 1982)

Předchozí uvedené oblasti se liší jak geologickou minulostí, tak i horninami v podloží či při povrchu. V námi sledované problematice je toto rozdělení potřebné pro jisté zjednodušení geologických podmínek na uváděných stavbách.

A - Krystalinikum

Do oblasti krystalinika lze zařadit horniny granitů, granodioritů, syenitů, dioritů, granulitů, migmatitů, amfibolitů, eklogitů a durbachtitů. V některých částech krystalinika je možno nalézt i jiné horniny, avšak z hlediska našeho pozorování je lze zanedbat. Zvětralinový plášť krystalinika představují písčité hlíny s úlomky, na granitoidních horninách hrubě písčité eluvia, v hornatých oblastech se nacházejí hrubé svahové uloženiny až balvanité sutě. Můžeme se též setkat s relikty fluvialních uloženin – písčité štěrky s občasnými valouny pevnějších hornin. Nejmladší sedimenty jsou výplně dna řek a potoků, zrnitost se liší v průběhu toku – na horním toku hrubší klasty na spodním toku především jemně zrnité náplavy, občasné povodňové hlíny. V pokryvných útvarech metamorfitů jsou zastoupeny zvětralinové jílovitiny s jílovitou příměsí a jsou tedy velmi málo propustné ($k = 10^{-8}$ až 10^{-9} m.s⁻¹). Granitoidy jsou mnohem hydrogeologicky příznivější, jelikož sutě a písčité pokryvy dovolují infiltraci srážek.

B - Region nemetamorfovaného předvariského podkladu

Česká část - horninové prostředí je zastoupeno jílovitými a drobovými břidlicemi s vložkami drob, slepenců, silicitů (bulžníků) a vyvřelin. Starší horniny jsou zastoupeny pískovci, drobami,

křemenné porfyry, tufy, vyskytují se i vápence. Fluviální sedimenty teras jsou většinou zahliněné a znehodnocené obsahem navětralých valounů – jde o písčité štěrky. Propustnost v rámci celého území je značně rozdílná od $k = 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$ u hrubého štěrku až po 10^{-7} m.s^{-1} u jílovité hlíny s úlomky břidlic.

Moravská část – horniny vyskytující se v této oblasti jsou především vápence, slepence, pískovce někdy až břidlice, občas se objevují i projevy vulkanismu – diabas, spilit. Oblasti neobsahují příliš vydatné zdroje vody.

C - Region permokarbonských pánví

Výplně pánví jsou tvořeny především střídajícími se cykly slepenců, arkóz, drob, pískovců, jílovců, prachovců a uhlí. Ojedinele se ve svrchních polohách vyskytují čočky vápenců. Četnější jsou polohy vulkanitů povahy křemenných porfyrů, melafyrů, tufů a tufitů. Eluviální sedimenty odpovídají povaze podložní matečné horniny, fluviální sedimenty jsou zastoupeny především hlinito-písčitymi náplavy.

D - Region křídových pánví

Křídové sedimenty jsou na našem území zastoupeny ve dvou oddělených územích, v severní polovině Čech a na části severozápadní Moravě tvoří Českou křídovou pánev, v jižních Čechách dnes dvě oddělené jihočeské pánve. Sedimenty jsou uloženy téměř horizontálně, povětšinou jde o jíly, jílovce, silty, siltovce, slíny, slínovce a pískovce. Propustnost $k = 10^{-3}$ až 10^{-7} m.s^{-1} . Česká křídová pánev je hydrogeologicky velmi důležitá pro svůj velký zádržný objem, oblasti křídý obsahují velké množství pramenů s velkými vydatnostmi.

E - Region terciérních depresí

Deprese jsou vyplněny písky, štěrky, jíly, jílovcí. Vyskytují se rovněž uhelné sloje a vulkanický materiál v podobě tufů a tufitů. Střídání propustných a nepropustných poloh nevytváří příliš významné prostředí pro zadržení vody.

F - Region neovulkanitů

V tomto regionu se vyskytují trachyty – světle šedé až zelenošedé horniny porfyrické nebo trachytické struktury s dutinami vyplněnými zeolity. Rozkládají se na jílovito-písčitou zvětralínu s vysokým obsahem alkálií. Dále se vyskytují čediče, bazalty i různé tefrity, bazanity, nefelinity. (dle Mísař, 1983; Matula, Pašek, 1986)

7. Diskuze

Výsledkem této bakalářské práce mělo být srovnání dat sedání při určitém zatížení a daném inženýrsko-geologickém regionu, respektive skupiny dle mocnosti konsolidované vrstvy.

7.1 Grafy závislosti zatížení versus sedání

V grafu, jenž vystihuje závislosti zatížení a sedání pro inženýrsko-geologický region A, tzn. pro region krystalinik si můžeme povšimnout jistých trendů pro jednotlivé skupiny. Do tohoto grafu byla vybrána data pouze ze skupiny I. a II., ve III. skupině je uvedena lokalita Nová Houžná – Hliniště, jenž je velmi specifická složením svého podloží, neboť ji tvoří rašelina, která obsahuje značné množství vody a je proto z hlediska chování konsolidace (sedání) velmi těžko zařaditelná mezi běžná podloží. Po vyřazení

této lokality by ve III. skupině zbyla jen jediná lokalita a tudíž by bylo nesmyslné ji uvádět do grafu. Z podobného důvodu byla z II. skupiny odstraněna lokalita Blažejovice, kde se rovněž v podloží vyskytuje rašelina. Pokud ovšem tyto dvě lokality spojíme do jedné skupiny, tak dostáváme vcelku zajímavou závislost pro rašeliny a zatížení. Hodnota spolehlivosti lineární regrese R^2 se pro tento region blíží hodnotě 0,3, což je možné považovat za velmi dobrý informativní odhad hodnot. Kupříkladu lze z grafu určit rozsah sedání při zatížení 100 kPa, které pro tuto hodnotu bude 1-6 cm pro I. skupinu a 3-8 cm pro II. skupinu, avšak pro podloží tvořené rašelinou lze očekávat sedání větší než 50 cm.

Graf pro region B, region nemetamorfovaného předvariského podkladu je již podle prvního pohledu velmi chudý na získaná data, konkrétně jde o dvě lokality. Právě z tohoto hlediska nelze brát přímkou lineární spojnice trendu za příliš důvěryhodnou, hodnota spolehlivosti R^2 je cca 0,14. Pokud budeme porovnávat sedání s regionem A, pak pro zatížení 100 kPa dostaneme rozsah 6-9 cm oproti výše uvedenému 3-8 cm. Porovnání platí pro II. skupinu obou regionů.

Obdobné informace, jenž byly napsány pro předcházející region platí rovněž pro region C, permokarbonské pánve. Z tohoto grafu byla vyňata lokalita Dobřany, neboť u ní panují pochybnosti o relevanci dat, jelikož naměřené sedání několikanásobně přesahuje ostatní lokality i při mnohem menším zatížení – nechceme posouvat graf velmi odchýlenou hodnotou. Graf je ovlivněn rovněž nestejnorodým sedáním téhož zatížení na téže lokalitě, navíc další lokalita „sedá“ méně při větším zatížení (přímkou trendu je nesmyslně klesající, což je naprosto proti logickému úsudku). Možným důvodem je též zařazení lehčených násypů k běžným (více kapitola 7.3).

Nejlépe z pohledu úkolu práce vypadá graf pro region D, křídové pánve. Z grafu byla vyřazena lokalita Úžín, jenž obsahuje velmi rozporuplné výsledky monitoringu (stejné parametry a různé hodnoty), které by navíc negativně ovlivňovaly přesnost přímkou trendu. V tomto regionu lze najít dvě skupiny, III. a IV. skupinu. Ve III. skupině lze vyzorovat relativně lineární trend závislosti zatížení a sedání, hodnota spolehlivosti R^2 je přibližně 0,3, tedy poměrně relevantní odhad rozsahu hodnot. Pro porovnání s předchozími regiony, pro zatížení 100 kPa je očekávaná hodnota sedání v rozsahu 3-10 cm, což relativně koresponduje s předchozími daty, faktem ovšem je, že jde o porovnání různých skupin (D – III a A – II). Pro IV. skupinu je hodnota spolehlivosti mírně menší, avšak i tak vyjadřuje jistou tendenci sedání a zatížení, např. zatížení 100 kPa odpovídá sedání mezi 7-13 cm.

Posledním regionem (region F se v datech nevyskytuje) k diskuzi je region E, terciérních depresí. V regionu se vyskytují data ze skupin III. a IV., závislosti zatížení na sedání se dají vysledovat u obou skupin. U III. skupiny přímkou lineárního trendu má spolehlivost 0,5 což je již velmi dobrá hodnota odhadu hodnot. Například pro zatížení 150 kPa lze očekávat 20-25 cm. U IV. skupiny je spolehlivost menší a to přibližně 0,3, a proto je u zatížení 150 kPa rozmezí 10-35 cm což je při dolní hranici proti logice v porovnání se skupinou třetí. Obě dvě skupiny jsou ovšem velmi málo reprezentativní z hlediska jiných terciérních depresí v České republice, především IV. skupina, neboť z většiny obsahují deprese Karpatské předhlubně či sedimenty Hornomoravského úvalu a tak se mohou podmínky v podloží (mineralogie, petrologie) významně lišit. III. skupina obsahuje lehčené násypy, jenž mohou hrát rovněž roli při přesnosti odhadu.

7.2 Grafy závislosti zatížení a logaritmu času pro 90% konsolidaci

Při pohledu na grafy závislosti zatížení a logaritmu času pro 90% konsolidaci je patrné, že jednotlivé grafy postrádají více bodů (dat). Během sběru dat se bohužel ukázal problém, že u mnoha násypů se měří především v průběhu sypání násypu, kdy dochází k postupnému sedání násypu. Z tohoto

důvodu je velmi problematické určovat čas 90% konsolidace z grafu monitoringu, mnohdy je totiž již ustalující se křivka opět „oživena“ přetížením a celý proces začíná znovu. Poté dochází k tomu, že rozsah monitorovaného období je příliš krátký na určení tohoto stupně. I přes tuto překážku byly nalezeny lokality (profily) u nichž se lze dle křivky domnívat, že již proběhla 90% konsolidace.

U grafu pro region A si lze povšimnout „nezávislosti“ u II. skupiny, kdy je i spolehlivost R^2 rovna téměř 0, což značí špatnou míru. U I. skupiny je to číslo větší, tj. 0,12. Pro zatížení 150 kPa je pro 90% konsolidaci potřeba čas 2,3 dne v logaritmickém měřítku (přibližně 200 dní) pro II. skupinu a 2,5 dne v logaritmickém měřítku (přibližně 320 dní) pro I. skupinu. Pro jiné skupiny v regionu A nebyl čas 90% konsolidace stanoven.

Jelikož regiony B a C neobsahovaly lokality, kde byl čas 90% konsolidace určen přistoupíme k regionu D. Hodnoty spolehlivosti jsou 0,05 pro II. skupinu, 0,01 pro IV. a III. skupinu shodně. Pro zatížení 100 kPa je zapotřebí alespoň 1,8 logaritmického měřítka času (přibližně 60 dní) u II. skupiny, 2,7 (přibližně 500 dní) pro IV. skupinu a nakonec 2,75 (570 dní) pro III. skupinu. I. skupina se nepodařila z grafů sedání určit.

Posledním regionem je region E, u něhož jsme dokázali určit skupiny III. a IV. , kdy III. skupina má spolehlivost 0,13 a IV. 0,04. Pro zatížení 150 kPa je doba potřebná ke konsolidaci 2,6 logaritmického měřítka (400 dní) u III. skupiny a 3 (1150 dní) u IV. skupiny.

7.3 Zhodnocení grafů a další možné směry pro zpřesnění výsledků

Z výše uvedených částí této práce je patrné, že výsledky pro jednotlivé regiony, skupiny jsou značně kvalitativně rozdílné. Prvním důvodem je malé zastoupení některých regionů, skupin. Nicméně pokud bychom chtěli dosáhnout lepších výsledků či zpřesnění rozsahu hodnot pro jednotlivé grafy, tak je nutné získat mnohem více dat, nejlépe z mnoha různých lokalit. Zlepšení by se rovněž dostavilo při delších rozsazích měřených období, obzvláště z hlediska postupného přisýpání násypu během monitoringu, které znemožňuje určit spolehlivě čas pro 90% konsolidaci, velkým, nicméně nereálným krokem ke zpřesnění je rovněž větší počet měření v průběhu stavby, mnohdy jsou prodlevy mezi měřeními větší než 3 měsíce a v jejich průběhu mohlo již dojít ke dřívější 90% konsolidaci, než se z měřených dat zdá. Přesnější data by byly rovněž při podrobnějších datech týkajících se stavby, především jde o objemovou hmotnost vrstev násypu (v práci je uvažován jako homogenní těleso), čímž by se podařilo zpřesnit zatížení. Z geologického průzkumu bychom rovněž ocenili zpřesnění poměrů pod násypem, mocnost konsolidované vrstvy atd. Objektivně je potřeba přiznat, že při podrobnějším členění do skupin bychom mohli dostat rovněž přesnější výsledky, avšak rozdělení bylo vytvořeno tak, abychom nedostali skupinu s jednou či dvěma položkami.

8. Závěr

S výsledky této práce lze vyjádřit částečnou spokojenost, protože se v několika případech potvrdila domněnka, že existuje jistá spojitost mezi hodnotami sedání a zařazení do příslušných inženýrsko-geologických regionů, respektive skupin dle mocnosti konsolidované vrstvy. Jako nejhodnověrnější výsledek bych považoval region A pro závislosti sedání na zatížení, avšak čas na 90% konsolidaci není přesný, jelikož potřebná doba povětšinou přesáhla rozsah monitoringu. Během práce se naskytly problémy vyjmenované v předcházející kapitole, po jejich případném vyřešení lze očekávat ještě kvalitnější hodnoty.

České Budějovice, 29.8.2010

Karlín Petr

9. Seznam použitých zdrojů

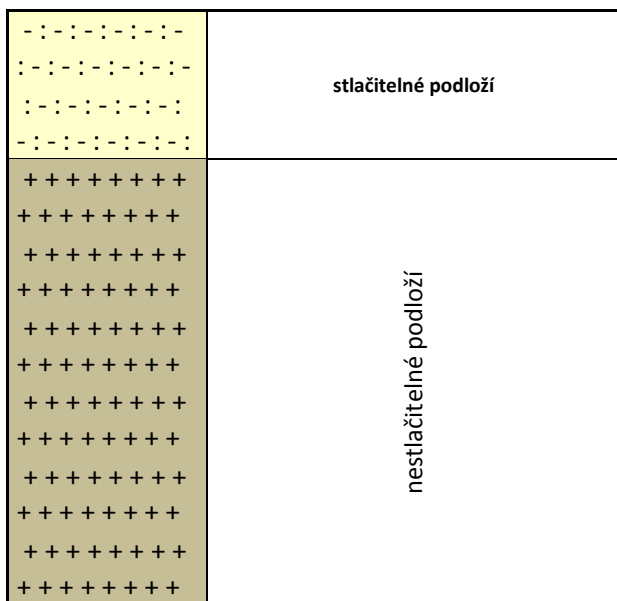
- 1) AL-HOMOUD, A.S.; TANASH, N. - Monitoring and analysis of settlement and stability of an embankment dam constructed in stages on soft ground, Bulletin of engineering geology and the environment, volume 59, number 4, str. 259 – 284, 2001
- 2) archiv společnosti ARCADIS Geotechnika a.s.
- 3) ATKINSON, John – The Mechanics of Soils and Foundations , Taylor & Francis (2007) – second edition
- 4) BOHÁČ, Jan – Mechanika zemin I – soubor přednášek pro posluchače oboru geologie na Univerzitě Karlově v Praze, 2008
- 5) EICHLER, Jaroslav; MACEKOVÁ, Věra – Mechanika zemin a zakládání staveb, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1996
- 6) Geologická mapa – mapový server České geologické služby, měřítko 1:50 000
- 7) CHYCYIOVÁ, Renáta – Sledování pórových tlaků v podloží vysokých násypů, Junior Stav 2007, VUT Brno
- 8) Instruktažní příručka společnosti SG Geotechnika a.s. pro hydrostatickou nivelaci
- 9) MATULA, Milan; PAŠEK, Jaroslav – Regionálna inžinierska geológia ČSSR, ALFA Bratislava & SNTL Praha (1986)
- 10) MÍSAŘ, Zdeněk et. al. – Geologie ČSSR I. Český masív, Státní pedagogické nakladatelství, 1983
- 11) Příručka společnosti Glötzl – Měření s přístrojem GLÖTZL, typ IISM 01D
- 12) VANÍČEK, Ivan – Mechanika zemin , ČVUT v Praze (1987) – vydání druhé
- 13) WANG, Zhi-chao; LUO, Ying-she; TANG, Song-hua – Mechanism and calculation method of rheological settlement of high-filled embankment, Journal of Central South university of technology, volume 15, supplement 1, 2008
- 14) ŽVANUT, Pavel – Measured settlements of the Pesnica high embankment, Journal of 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, 2008

Přílohy :

- 1) legenda k řazení do skupin
- 2) tabulka nashromážděných dat
- 3) grafy závislosti zatížení x sedání
- 4) grafy závislosti zatížení x log času na 90% konsolidaci

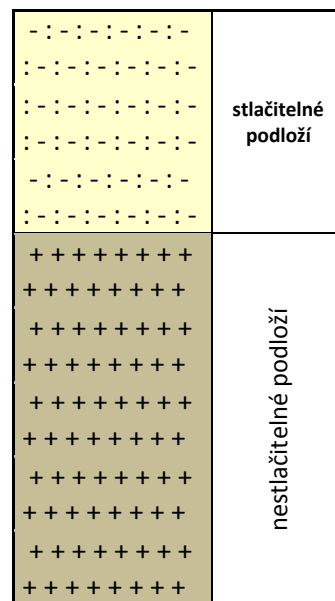
Příloha č.1 - Rozdělení do jednotlivých skupin dle mocnosti konsolidovaného podloží

I)



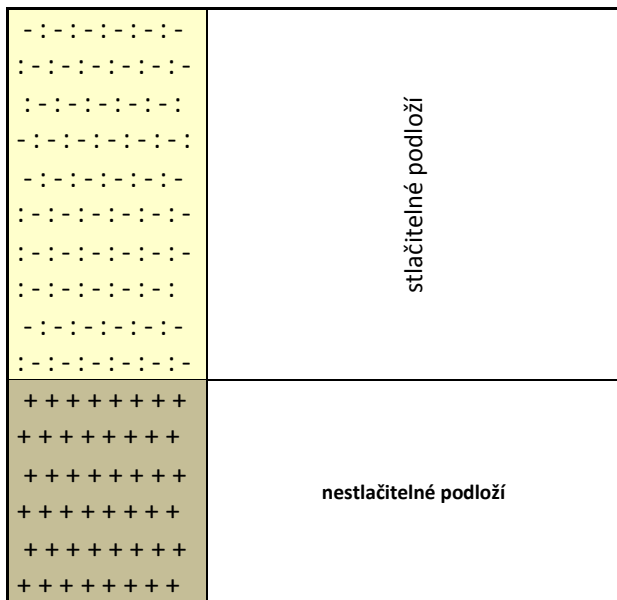
- mocnost do 3 m

II)



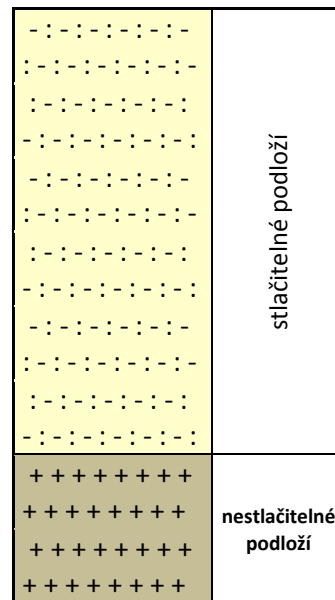
- mocnost 3-5 m

III)



- mocnost 5-10 m

IV)



- mocnost větší než 10 m

Poznámka : Tyto skupiny jsou použity pro všechny regiony v České republice, avšak jejich interpretace se napříč regiony mění. Například pro region krystalinika značí nestlačitelné podloží tvrdou horninu (ruly, granity, syenity atd.), kde se již konsolidace neprojevuje, avšak v regionech křídových a terciérních pánví se podloží může stlačovat i pod touto hranicí (jílovce, prachovce, slíny).

Příloha č.2 – Tabulka nashromážděných dat