

CHANGES OF MECHANICAL PARAMETERS OF SOILS DUE TO GROUNDWATER FLOW - PROCESSES IDENTIFICATION

M. Brouček*, P. Kuklík*

Summary: The paper presents the description of behavior of selected soils subjected to relatively high hydraulic gradients based on experimental results. The influences of all major processes, such as piping, suction elimination, preferential way creation have been tested. It comments the commonly used models for numerical analysis and describes the requirements on the new constitutive equation necessary for description of the soils behavior under certain conditions. The conclusions challenge some of the traditional points of view on the problems of soil degradation. For instance: The relation between the piping precondition and the amount of fine particles in the soil.

1. Úvod

Identifikace procesů působících na zeminy při proudění podzemní vody, jejich matematický popis a empiricky stanovené hodnoty jsou základním předpokladem úspěšné zpětné analýzy příčin poruchy stavby. Zároveň je popis těchto procesů podstatný pro přijetí protipatření ať již z hlediska sanačního, či v návrhu nové stavby.

Cílem příspěvku je představit výsledky experimentů na vybraných zeminách z lokality Veselí nad Lužnicí. V území se nacházejí tři přirozené a jeden umělý vodní tok, který v minulosti vytvářel četná mrtvá ramena. Značná část městské zástavby se nachází v místech zasypaných původních koryt řek či starých stok a kanálů. V důsledku dvou povodňových událostí byla nařízena demolice 38 objektů a řada dalších je podrobena sledování (Kuklík et al., 2006).

2. Testované zeminy a popis experimentů

Celkem bylo dosud testováno 12 vzorků. Klasifikace vzorků proběhla na základě zrnitostního rozboru dle ČSN 73 1001. Vzhledem k vodním tokům, jež mají dominantní vliv na složení horní vrstvy podloží, lze předpokládat obdobné složení zemin v oblasti celého města. Tuto domněnku podporují i starší mapy inženýrsko-geologického průzkumu. Značení tříd zemin testovaných vzorků dle ČSN 73 1001 je shrnuto v tabulce 1.

Prováděné experimenty byly rozděleny do 5 typů. V prvním z nich se jednalo o klasické měření nasycené hydraulické vodivosti na propustoměru s konstantním spádem. Další typ řešil průběh sedání instalovaného závaží při zrušení sání. Třetí typ se zabýval rychlostí sycení zeminy a s tím spojenou změnou hmotnosti.

* Doc. Ing. Pavel Kuklík, CSc., Ing. Miroslav Brouček: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební; Tháškova 7; 166 29 Praha 6; tel.: +420.224 354 472, e-mail: miroslav.broucek@fsv.cvut.cz

Poslední dva typy experimentu zabývající se změnou pórovitosti a sedáním závaží v souvislosti s vyplavováním částic se lišily pouze v hmotnosti použitého závaží. Vzhledem k faktu, že poslední dva typy představovaly majoritní část experimentů, je zde obsažen jejich podrobný popis.

Tab. 1 Označení vybraných tříd zemin dle ČSN 73 1001

Označení třídy	Název třídy
SP	Písek špatně zrněný
S-F	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy
SF	Písek jemnozrnný
FS	Jemnozrnné zeminy písčité
F	Jemnozrnné zeminy

Vzorky byly osazeny do soupravy pro měření klasické propustnosti, které byla odebrána celá horní část, aby bylo umožněno vyplavování jemných částí. Místo horní části propustoměru bylo do středu vzorku umístěno závaží o hmotnosti 21 respektive 5kg, na které byl nainstalován přístroj na měření posunů (hodinky). Proteklá voda, stejně jako vyplavované částice, byla zachycována v nádobě pod propustoměrem. V časových intervalech byla zaznamenávána hodnota proteklého množství a posun závaží. Pro simulaci pohybu hladiny byly zvoleny tři hodnoty spádu (0,87m; 1,17m; 1,47m). Poloha vzorku se měnila skokově po zvolené době. Na závěr byl proveden zrnitostní rozbor vyplavených částic a zbylého vzorku. Po něm byla stanovena objemová hmotnost zrn zeminy.

Je zřejmé, že i přes relativně malý rozdíl hladin je s ohledem na rozměry testovaného vzorku hydraulický gradient vyšší než je tomu v běžných situacích. Pro první tři popsané typy experimentů nemá tento fakt žádný vliv. Pro poslední dva typy je potřeba dodat, že doba působení zvýšených gradientů je však za reálných povodňových situací znatelně delší než je doba trvání experimentu.

3. Vybrané výsledky měření propustnosti

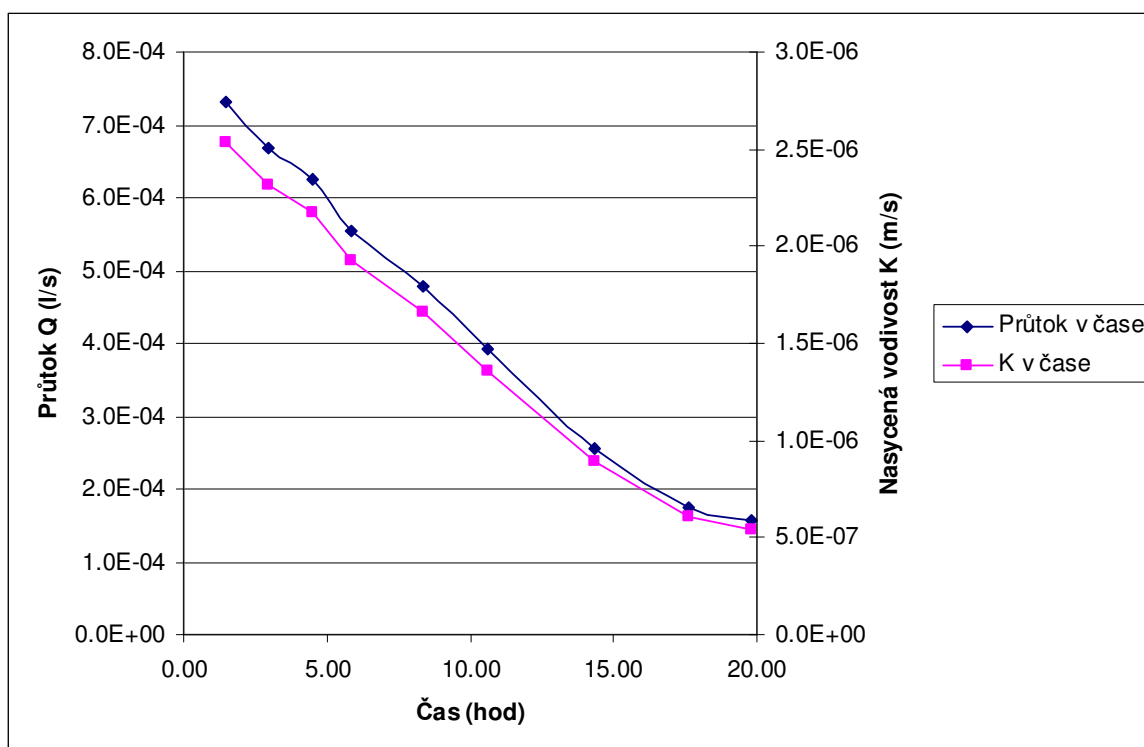
Experiment probíhal za konstantního rozdílu hladin $H = 2,55$ m s krátkými přestávkami pro vylití zachycené proteklé vody. Ze soupravy pro klasické měření propustnosti byla odebrána horní pryžová membrána. Vzhledem k dodržení předpokladů Darcyho zákona bylo možno rovnou vyčíslit nasycenou hydraulickou vodivost K (m/s) dle vzorce:

$$Q = A \cdot K \cdot \frac{\Delta H}{l} \quad (1)$$

kde $A = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$...plocha vzorku kolmá k proudění; K ...nasycená hydraulická vodivost - hledaná veličina; $l = 0,1 \text{ m}$ délka vzorku ve směru toku; $\Delta H = 2,55 \text{ m}$...rozdíl hladin; $Q = V/t$...průtok; V ...objem proteklé vody – měřená veličina; t ...čas – měřená veličina.

Snížování hodnoty nasycené hydraulické vodivosti v průběhu experimentu je možné interpretovat několika různými způsoby. Jednou z pravděpodobných možností je zanášení horní části soupravy. Je možné, že docházelo k vyplavování částíček, které nicméně uvízly v horní části soupravy a nepřekonal y 0,2 m převýšení hadičky pro odvod proteklé vody. Další z možností je přesun zrn ve vzorku do polohy, jež snížila propustnost. Pro potvrzení

domněnky, že se hydraulická vodivost asymptoticky blíží určité hodnotě a pro prověření, zda nedocházelo k zanášení soupravy, by bylo zapotřebí prodloužit dobu experimentu.

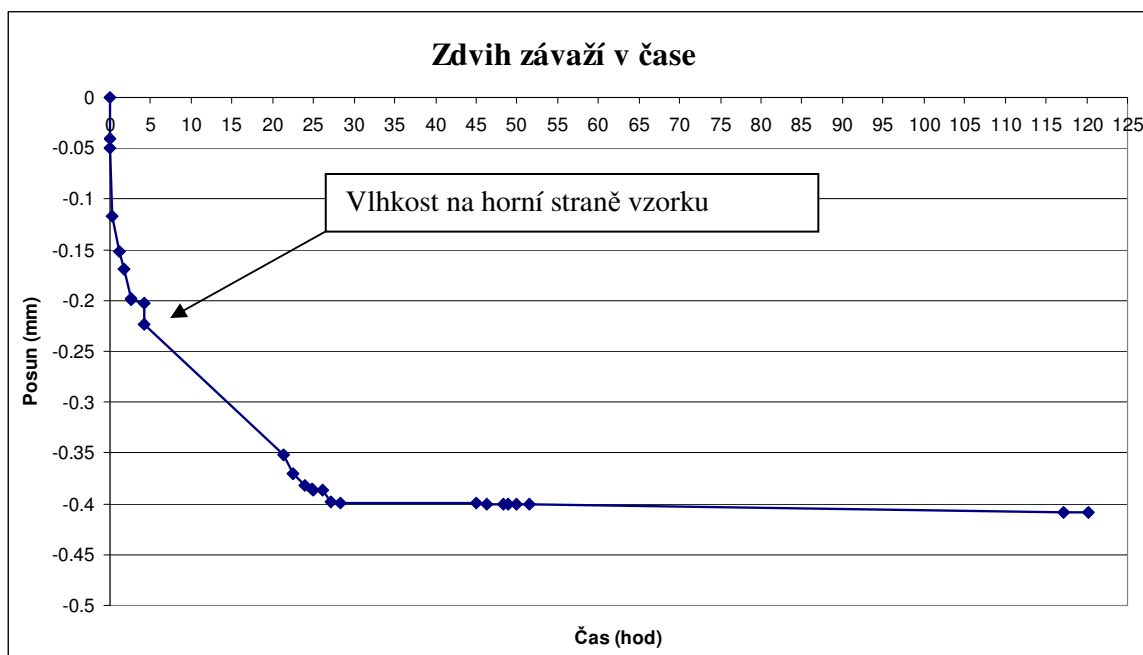


Obr. 1 Naměřené a vypočtené výsledky z měření propustnosti

4. Vybrané výsledky při rušení sání

Vzorek byl osazen do dolní části propustoměru a umístěn do široké nádoby, aby nedocházelo vlivem sycení k poklesu hladiny a okrajové podmínky tak byly konstantní. Sycení probíhalo odspodu. V čase 0 byla úroveň hladiny v nádobě shodná se dnem – dolní stranou vzorku. V okamžiku prvních známek vlhkosti na horní straně vzorku byla hladina v nádobě přibližně v jedné čtvrtině výšky vzorku. Až do času $t = 25$ hod tedy do téměř maximálního sedání nebyla hladina zvyšována. Výsledné hodnoty poklesu závaží v průběhu sycení zeminy třídy S-F jsou patrné z obrázku 2.

Pokles závaží o $0,4$ mm představuje deformaci vzorku ve svislém směru $4 \cdot 10^{-3}$. Jedná se o hodnotu přibližně 2-4x větší, než je spočtena podle teorie jednoosé stlačitelnosti. Vzhledem k tomu, že zeminy třídy S-F obsahují pouze 5-15% jemných částic, a k faktu, že vliv sání stoupá se zvyšujícím se obsahem jemných částic, je výsledná hodnota potvrzením nutnosti s jevem kalkulovat. Zejména pro jemnější zeminy bude vliv zrušení sání na celkové sedání zřejmě značný.



Obr. 2 Pokles závaží vlivem zrušení sání u zeminy třídy S-F

5. Vybrané výsledky testů vyplavování částic

Pro experiment na vyplavování částic bylo použito 5 vzorků třídy S-F (2 vzorky nebyly před experimentem nasyceny vodou), dále 1 vzorek třídy SP, 1 vzorek třídy SF a konečně 2 vzorky třídy FS. Experimenty probíhaly dle postupu popsaného v kapitole 2.

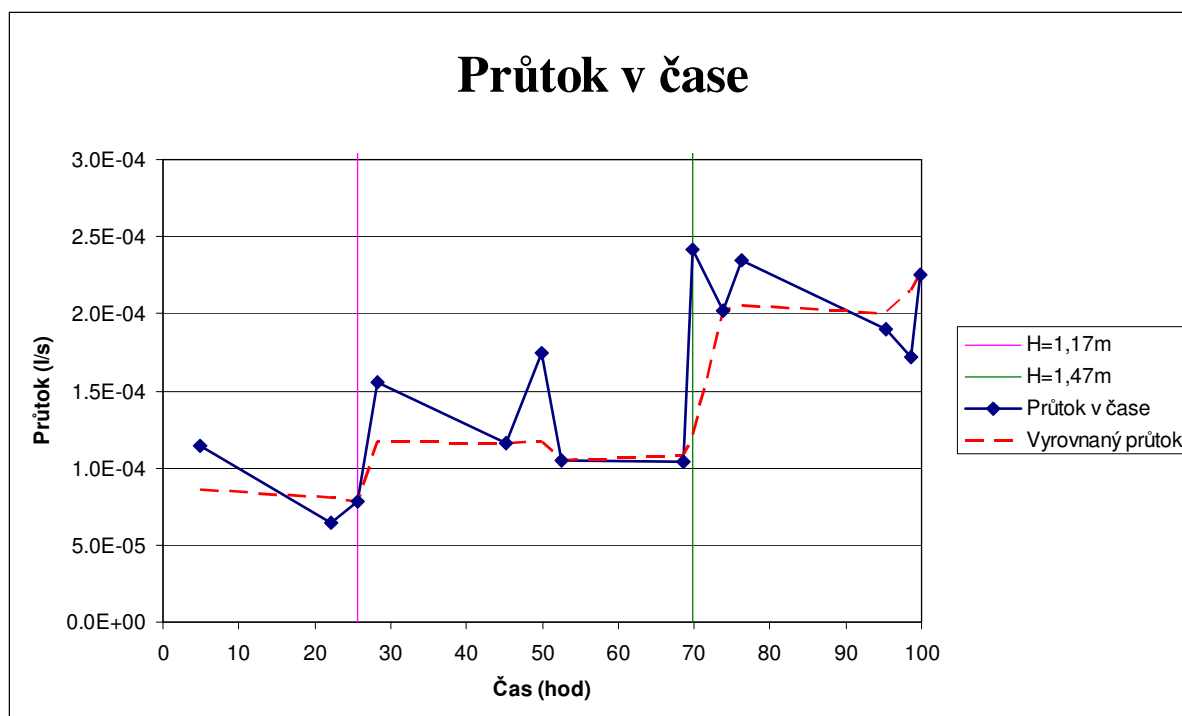
Následující tabulka shrnuje hodnoty sedání na konci experimentu. V případě, že došlo ke kolapsu zeminy a značnému vyplavování, bylo nezbytné experiment zastavit. Důvodem bylo naklánění závaží a riziko jeho pádu. Příklad vyhodnocení nárůstu proteklého množství v čase se nachází na obrázku 3.

Tab. 2 Průměrné sedání jednotlivých vzorků v třídách dle ČSN 73 10 01

Třída	Průměrné sedání (mm)	Kolaps – kritický gradient
SP	2,052	$i = 14,7$; 2,18 hod
S-F (syceno)	0,134	NE
S-F (nesyceno)	1,727	NE
SF	1,885	$i = 11,7$; 7,68 hod
FS	1,181	$i = 8,7$; 0,95 hod a $i = 11,7$; 0,48 hod

Závaží vyvozuje tlak rovný 26,7kPa. Při výpočtu jednoosé stlačitelnosti, jíž se prováděný experiment velmi blíží, metodou matematické pružnosti je hodnota sedání rovna 0,15 – 0,4 mm. Rozsah je uveden z důvodů různých parametrů jednotlivých tříd zemín.

Důvodem značného kolísání hodnot je značná nepřesnost v měření proteklého množství. Nádoba na zachycování proteklé vody je vybavena ryskami po 5 litrech. Pokud měření vyrovnáme změnami v odečtených hodnotách do 0,5 litru, dostaneme červenou čárkovanou čáru, která více odpovídá průměrným hodnotám.



Obr. 3 Průběh proteklého množství v čase pro zeminu třídy S-F

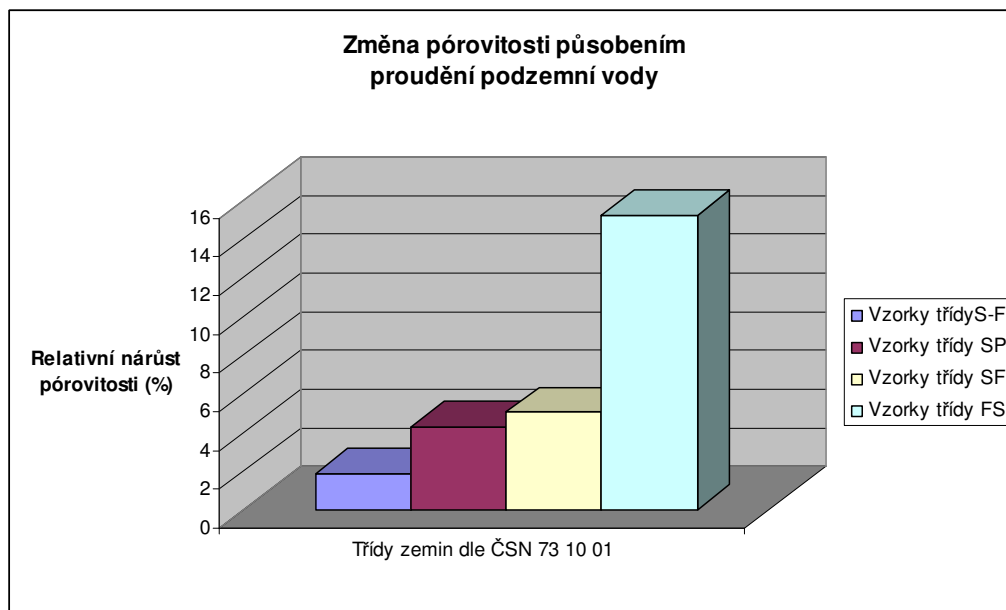
Zeminy třídy S-F prokázaly značnou odolnost proti působení proudění podzemní vody. Nenasycené vzorky sedaly více, nicméně v tomto případě se jedná o potvrzující teorii, neboť v praxi – v podmínkách ČR – není zemina vystavena takto vysokým gradientům, aniž by byla předtím nasycena. Hodnoty v tabulce u ostatních tříd je zapotřebí uvažovat pouze jako informativní, jelikož se jedná o poslední naměřené hodnoty před kolapsem vzorku.

6. Změny pórovitosti v závislosti na vyplavování

Stejně jako v případě sedání i změny pórovitosti byly nejmenší pro vzorky třídy S-F. Shrnuté výsledky poměrných změn pórovitosti vůči počáteční hodnotě před začátkem experimentu shrnuje obrázek 4. Kladné hodnoty znamenají, že se jedná o nárůst pórovitosti i přes to, že po celou dobu dochází k zatlačování závaží.

Pórovitost je obvykle spojována s hodnotou nasycené hydraulické vodivosti. Vzhledem k tomu, že experiment svým uspořádáním neumožňuje přímou aplikaci Darcyho zákona, nebylo zatím přistoupeno k vyčíslování hodnot $K(n)$. Na druhé straně je možné předpokládat, že dochází-li v průběhu experimentu ke změnám v proteklém množství, jedná se o zřejmý vliv vyplavování, neboť mezi hydraulickým gradientem a proteklým množstvím panuje přímá úměra. Pokud je tedy nárůst průtočného množství větší než nárůst gradientu, lze rozdíl přiřknout efektu vyplavování, či zanášení.

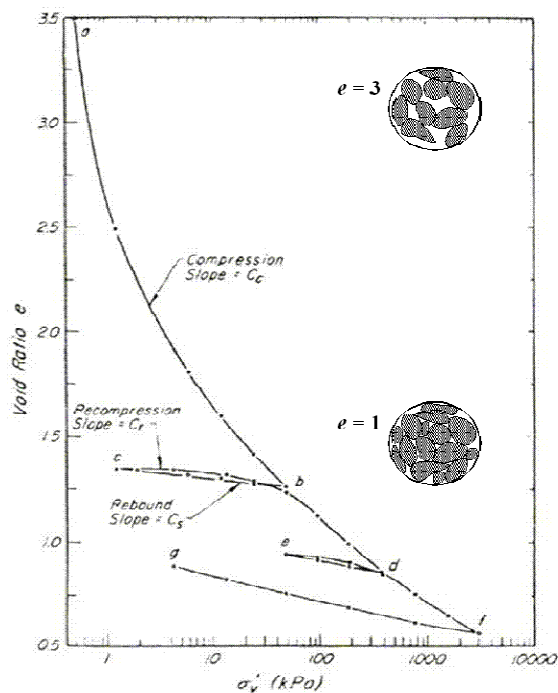
Množství vyplavených částic se pohybovalo od 0 do 24% hmotnosti vzorku a korelovalo úzce se změnou pórovitosti. Přestože změny pórovitosti byly ve třídě S-F nejmenší, některé vzorky vykázaly až o 50% větší nárůst proteklého množství, než by měli v případě bez vyplavování. Zatímco zeminy, u nichž došlo ke kolapsu a masivnímu vyplavování spíše zmenšovaly proteklé množství.



Obr. 4 Relativní změny pórovitosti v souvislosti s proběhlým experimentem

7. Matematické modely obsahující pórovitost

Pro popis zeminového prostředí jsou rozšířeny modely kritického stavu, obsahující číslo pórovitosti. Například modifikovaný Cam-clay model (Šejnoha & Janda, 2006). Umožňují dobře vystihnout chování zejména jemnozrnných zemin i v případech překonsolidace. Závislost mezi strukturální pevností, překonsolidací a číslem pórovitosti je na obrázku 5 (Terzaghi et al., 1996)



Obr. 5 Závislost strukturální pevnosti na zhutnění.

Tento popis se však jen málo hodí pro chování zeminy ovlivněné prouděním podzemní vody. Zemina v průběhu vyplavování zvětšuje své číslo pórovitosti aniž by docházelo k zmenšení efektivního napětí. Naopak lze předpokládat, že dochází k jeho nárůstu, neboť zároveň s vyplavováním dochází k dalším deformacím.

Další možností je použití modelu rozptylu pórovitosti (Papamichos & Vardoulakis, 2005) či obecného Einstein-Sakthivadiveliho erozního modelu (Vardoulakis et al., 1995). Oba modely nacházejí uplatnění zejména v oblasti naftařského průmyslu při modelování produkce písků při těžbě ropy.

Shrnutí matematických popisů hlavních procesů, které se účastní změn deformačních charakteristik zemin při změnách v jinak kvazi-ustáleném stavu hladiny podzemní vody je možné nalézt v (Kuklík & Brouček, 2006).

Matematický popis shrnující všechny působící procesy do jednoho konstitutivního vztahu v současnosti není k dispozici. Možností je kombinace oddělených problémů hydrauliky podzemní vody, geomechaniky a erozních modelů. Další možností je použití pouze metod mechaniky a ostatní jevy zahrnout jinými způsoby. Například eliminace prvků v průběhu výpočtu na experimentálně určených drahách, které mají modelovat vznik preferenčních cest.

8. Závěr

Experimentální měření prokázala změny ve struktuře zeminy, které mají vliv na mechanické a hydraulické vlastnosti respektive na sedání a průtočné množství.

Obecnou domněnku, že jako první dochází k vyplavování jemné frakce lze z naměřených hodnot zpochybnit. Zrnitostní rozbory vyplaveného materiálu jsou sice zpravidla o třídu blíže jemnozrnným zeminám, ale nelze tvrdit, že by se ze vzorku vyplavila zrna pouze do určité velikosti. Lze to přisuzovat vzniku preferenčních cest v proudění, kde je unášecí rychlost velmi vysoká a může tedy vyplavovat téměř všechny frakce vzorku.

Dalším ze závěrů vyplývajících z naměřených hodnot je popření domněnky, že čím je obsah jemných částic větší, tím je zemina náchylnější na sufozi. Špatně zrněný písek prokázal menší odolnost než písek s příměsí jemnozrnné zeminy.

Pro zhodnocení dalších tříd zemin jakožto i pro verifikaci stávajících závěrů je zapotřebí dalšího testování.

9. Poděkování

Autoři děkují za poskytnutou podporu v rámci VZ č.1 - MSM 680770001 a dále za podporu poskytnutou v rámci grantu GAČR 106/05/2618

10. Literatura

Kuklík P., Brouček M (2006) Dopady extrémních povodní na podloží a možné preventivní přístupy, *Zpravodaj WTA*cz, 2006, roč. 6, č. 1-2, s. 19-22. ISSN 1213-7308

- Kuklík P. & Brouček M., (2006) Důsledky změn hladiny podzemní vody v podloží a následné dopady na vrchní stavbu, *Staticko-konštrukčné a stavebno-fyzikálne problémy stavebných konštrukcií*, 2006 CPRESS, Košice, ISBN 80-8073-678-2
- Papamichos E., Vardoulakis I., (2005) Sand erosion with a porosity diffusion law; *Computers and geotechnics*, Vol. 32, 2005, p. 47-58
- Šejnoha, M. and Janda, T. : Formulation of generalized Cam clay model, *Engineering Mechanics*, 2006, vol. 13, no. 5, s. 367-384. ISSN 1210-2717
- Terzaghi K., Peck Ralph and Gholamreza Mesri, (1996) Soil Mechanics in Engineering practice, *John Wiley & Sons*, ISBN 0-471-08658-4