

Ing. Evžen PICHLER, CSc., VÚHU, a.s.

Chování nenasycených zemin

Das Verhalten nicht gesättigter Böden

Die Langzeitforschung, die vor allem das Verhalten des Tonsteinschüttgutes zum Ziel hatte, war vom Aufbau eines autonomen Probegerätes abhängig. Zu Beginn der 90er Jahre gelang es die Entwicklung eines Prototyps von Großraumedometern und Hochdruck-rutscheren im VÚHU zu beenden und so die Lösung einer breiten Skala geotechnischer Aufgaben in Angriff zu nehmen.

Auf Grund der erzielten Ergebnisse des Verhaltens nicht gesättigter Erden auf dem Fachgebiet hohen Druckes, ist es real die Struktur was Stabilität und Deformationen betrifft, sowie die Überhöhung alter Versturzsäume zu lösen. Schon im Hinblick auf die gegenwärtigen Kenntnisse der Verformungsprozesse im tonsteinigen Schüttgut ist es möglich und auch real mit der Formung sehr hoher Kippenkörper zu rechnen, die Höhen von 160 m überschreiten.

Aus strukturellen Veränderungen des Schüttgutes in Folge des Grades des Spannungszustandes kann man auch die Entwicklung der Durchlässigkeit der Materiale und deren Anwendbarkeit als Dichtungsschicht ableiten. Durch die, in diesem Beitrag aufgezeigten Ergebnisse sind noch bei weitem nicht die Applikationsmöglichkeiten dieser Prüfstelle erschöpft.

Behaviour of unsaturated soils

Long term research directed above all to behaviour of claystone bulk matter was dependent on building the autonomous testing equipment. At beginning of 90ies it was managed to finish the development of prototype large volume consolidometers and high pressure shearers in VÚHU and so to initiate the solution of broad scale of geotechnical tasks.

On the base of reached results the behaviour of unsaturated soils in the branch of high pressures it is real to solve in

stabilisation and deformation way the construction of high dumps and exaggeration of old dump areas. Already from the view of present knowledge of overforming processes of claystone bulk it is possible really to taken into account also the construction of very high bodies, overreaching the height 160 m.

From structure changes of bulk by the influence of stress condition level it can be derived also the development of soil permeability and their using as sealing strata. By mentioned results in this contribution there are not far drawn out the application possibilities of this testing workplace.

Поведение ненасыщенных грунтов

Долгосрочные исследования, намеренные прежде всего на поведение аргиллитной сыпанной породы, зависели от создания автономной испытательной аппаратуры. В начале 90-ых годов удалось завершить в институте ВУГУ Мост этап развития прототипных крупнообъемных эдометров и срезных приборов высокого давления и таким образом вступить в этап решения широкой шкалы геотехнических заданий.

На основе достигнутых результатов поведения ненасыщенных грунтов в сфере высоких давлений является реальным решить с точки зрения устойчивости и деформации строительство высоких отвалов и превышение старых отвальных пространств. Уже с точки зрения имеющихся сведений процессов деформации аргиллитной сыпанной породы можно совсем реально принимать в учет даже образование сверхвысоких (свыше 160 м) отвальных тел.

Из изменений структуры сыпанной массы под влиянием уровня напряженного состояния можно

вывести также развитие
проницаемости грунтов и их
использование в качестве
уплотняющих слоев. Результатами
приведенными в данной статье
исчерпаны далеко не все прикладные
возможности данного
испытательного рабочего места
института ВУГУ.

Chování nenasycených zemin

Dlouhodobý výzkum, zaměřený především na chování jílovcové sypaniny, byl závislý na vybudování autonomního zkušebního zařízení. Na počátku 90tých let se podařilo ukončit vývoj prototypových velkoobjemových edometrů a vysokotlakých

smykačů ve VÚHU, a tak zahájit řešení široké škály geotechnických úloh.

Na základě dosažených výsledků chování nenasycených zemin v oboru vysokých tlaků je reálné stabilně i deformačně řešit stavbu vysokých výsypek a převyšování starých výsypných prostorů. Již z pohledu současných znalostí přetvárných procesů jílovcové sypaniny, je možné reálné počítat i se stavbou velmi vysokých těles, přesahujících výšku 160 m.

Ze strukturních změn sypaniny vlivem úrovně napjatosti lze odvodit i vývoj propustnosti zemin a jejich použití jako těsnících vrstev. Uvedenými výsledky v tomto příspěvku nejsou zdaleka vyčerpány aplikační možnosti tohoto zkušebního pracoviště.

Geomechanické řešení stabilitních i deformačních úloh je založeno na pevnostních deformačních parametrech zemin, obecně řečeno na jejich konstitučním chování. Chování zemin je tedy definováno stavovými veličinami - napětím, volnou a vázanou vodou, pórovitostí, časem, teplotou aj. V rozpětí těchto nejdůležitějších stavových veličin se struktura zemin značně mění.

Ve Výzkumném ústavu pro hnědé uhlí, a.s. bylo konstituční modelování na konci osmdesátých let s využitím autonomního experimentálního pracoviště se základním vybavením dvěma velkoobjemovými edometry a jedním vysokotlakým smykačem, zprovozněnými v r. 1988, zaměřeno především na:

1. Objasňování změn struktury sypaniny tvořené jílovitými zeminami s původní nebo zvýšenou vlhkostí při napěťových stavech do 6,0 MPa, odpovídající tlakům na výsypkách až 300 m vysokých.
2. Prokázání jevů vedoucích téměř k úplné ztrátě smykové pevnosti za vysokých tlaků do 6,0 MPa, ať již u sypaniny tvořené jílovitými zeminami s původní nebo zvýšenou vlhkostí.

Začátkem devadesátých let byl specifický výzkum chování nenasycených zemin rozšířen s využitím inovovaného autonomního experimentálního pracoviště se čtyřmi velkoobjemovými edometry a dvěma vysokotlakými smykači, které jsou provozovány nepřetržitě od r. 1992, o další aplikace:

1. Kvalitativní testování granulátů a jejich směsí s jílovcovou sypaninou s využitím jako konstrukčních materiálů pro stavbu zemních těles.
2. Ověřování vhodnosti jednotlivých sestav filtračních a drenážních prvků, různé konstrukce (geotextilie typu GTG, GEOFILTEX, VHVD bez i s keramzitovou výplní).

Současný stav poznatků

Nenasycené zeminy a zejména sypanina s počáteční mezerovitostí až 30 % představují trojfázový model partikulárních látek, jehož limitními případy jsou zeminy nenasycené (skelet s pórovým vzduchem) a zeminy nasycené (skelet s pórovou vodou). Z převážně nenasycených zemin jsou budována vysoká výsypková tělesa, zhutňované zemní konstrukce, aktivní zóny stavebních konstrukcí nad hladinou podzemní vody. Je-li zemina trvale nenasycená, jsou její mechanické vlastnosti příznivější, než je-li třeba počítat s nasycením vodou.

Chování ne plně nasycených jílu je dáno především mechanickými a fyzikálně-chemickými jevy, probíhajícími v aktivních jílových minerálech v nich obsažených. Pravděpodobně nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje vnitřní strukturu jílovcové sypaniny, jsou negativní tlaky (podíl pórového vzduchu a pórové vody) spojené s kapilárními efekty vody. Při propojování pórů jílovcové sypaniny za vysokých tlaků vykazuje voda relativně vysokou mobilitu. Provedené testy např. v [1] ukazují závislost chování bobtnavěrozhrdávajícího jílu na aplikovaném tlaku. Zkušební vzorky, mající stejnou výchozí vlhkost, v návaznosti na tlakovou bázi mění vlhkostní stav. Pro ilustraci naznačeného chování dilatantních jílu jsou uvedeny na obr. 1 tři linie tlakových změn (L1; L2; L3) a vlhkostních stavů (C1; C2; C3). Malé reversibilní objemové změny se objevují na počátku testů, ale nevratné změny nastanou po překročení určitého přechodového napětí. Vlákenné chování každé látky, tedy i hornin, vzrůstá s tlakem a s teplotou. Vysoké normálové tlaky bortí křehkou strukturu hornin, které se stávají kontraktantními, a tím i tvárnými vláknými, takže při smykovém namáhání se přetvářejí vlákným kluzem. Orientační hodnotou tzv. přechodového napětí σ_p , při kterém se mění dilatantní charakter zeminy na kontraktantní podle [2], je pro :

neogenní jíly $\sigma_p = 0,2 \div 0,4 \text{ MPa}$

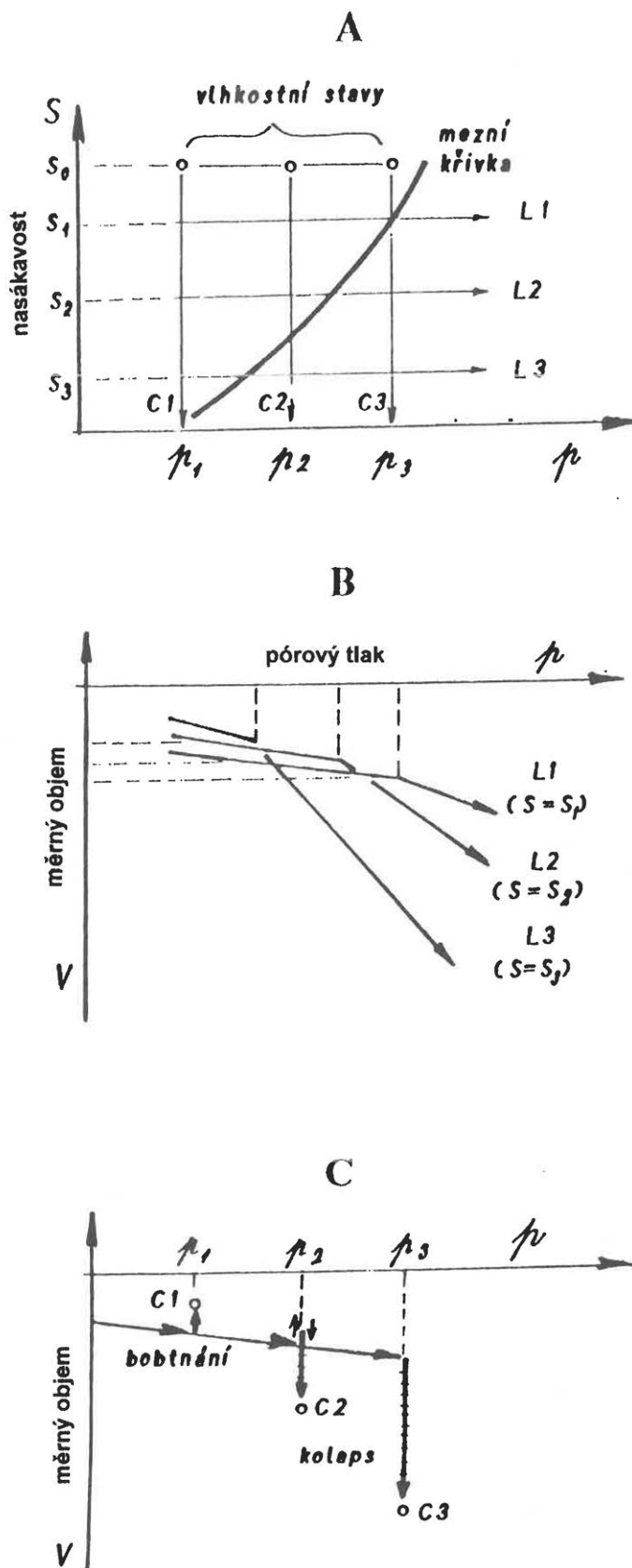
jílovce a břidlice $\sigma_p = 0,5 \div 1,5 \text{ MPa}$

Tento zvláštní charakter zeminy, podmíněný dvojitou strukturou úrovní, se výrazně promítá v uplatňování diferencovaných hodnot smykové pevnosti. Mikrostrukturální úroveň odpovídá chování aktivních jílových minerálů, kde převažují fyzikálně-chemické interakce a zahrnuje tedy kvazikrystalickou strukturu. Prostory pórů jsou tvořeny intramaticovými prostory mezi elementárními částicemi. Makrostrukturální úroveň reprezentuje strukturu větších rozměrů, agregátní uspořádání částic s vnějšími i vnitřními póry a vyjadřuje vzájemné působení těchto kvazikrystalů.

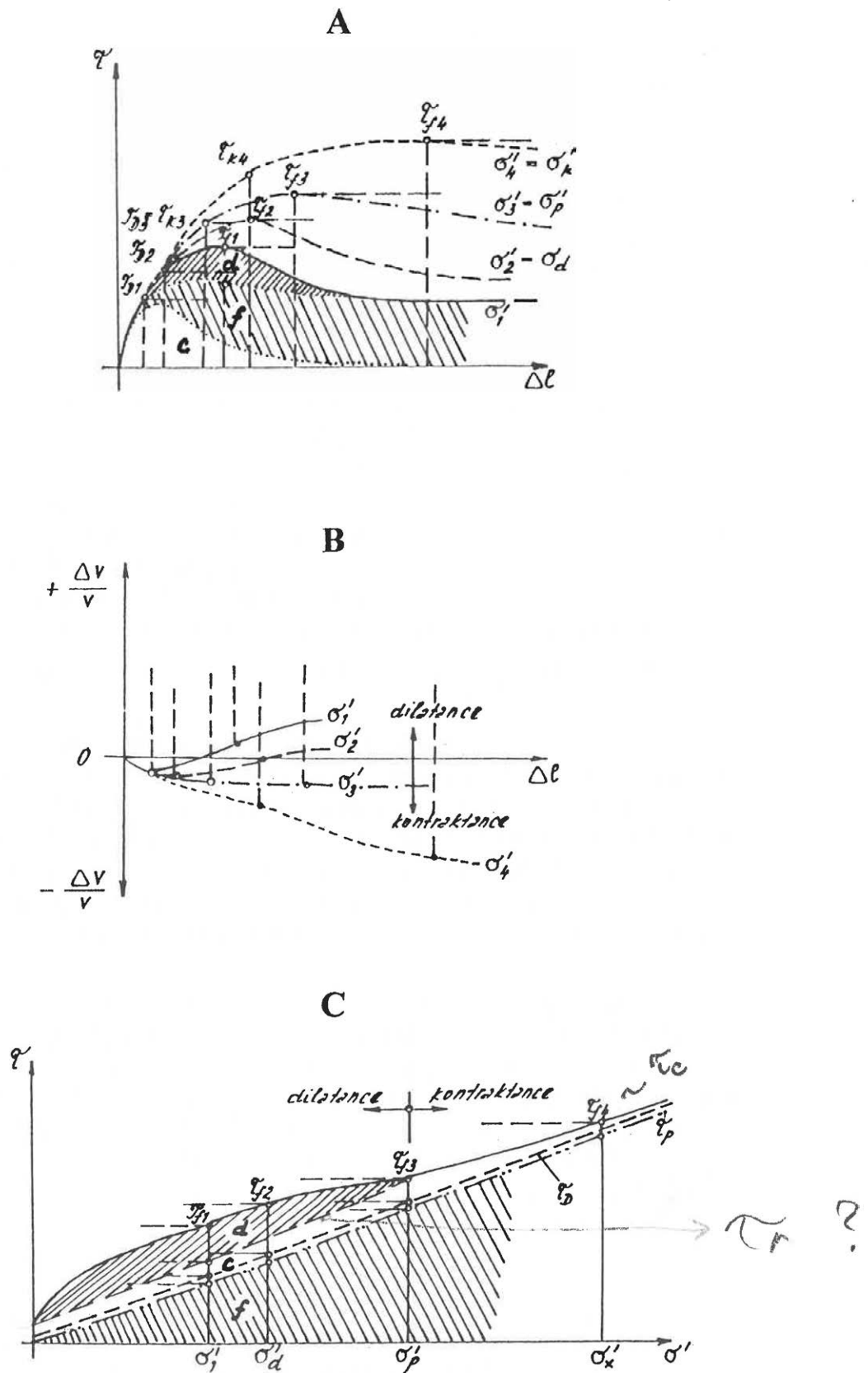
Ze současných poznatků vychází resultát o smykové pevnosti většiny zemin (kromě neulehlých nebo zkonsolidovaných a měkce plastických):

- při určitém efektivním zatížení - po dosažení mobilizované hodnoty - tzv. mezní (vrcholové) pevnosti τ_p v průběhu dalšího přetvoření klesá postupně až k minimální hodnotě - tzv. reziduální (zbytkové) pevnosti τ_r (obr. 2). Důležitým znakem křehkého porušování je již zmíněný dilatantní a kontraktantní projev. Na celkové smykové pevnosti zemin je možné vyčlenit energetický podíl jejich složek, které jsou tvořeny soudržností c , třením f a dilatancí d . V závislosti na efektivním normálovém zatížení σ' se však podíl jednotlivých složek smykové pevnosti mění
- s nárůstem σ' podíl tření lineárně vzrůstá, avšak podíl dilatance od určité hodnoty σ'_d již klesá, a při hodnotě σ'_p je již nulový. Podíl soudržnosti lineárně vzrůstá pouze

τ_r ?



Obr. 1 Chování nenasyčených zemin při dosažení určitého stupně nasycení v závislosti na aplikovaném tlaku



Obr. 2 Dilatantní a kontraktantní charakter zeminy při smykovém namáhání

po hodnotu σ'_p , a při vyšších hodnotách $\sigma' > \sigma'_p$ již postupně klesá a asymptoticky se blíží až k hodnotě soudržnosti na mezi vláčnosti, tj. tzv. creepové soudržnosti σ'_k .

- to znamená, že s narůstáním σ' nad σ'_d klesá i stupeň křehkosti I_B namáhaných zemin či hornin, které při hodnotě $\sigma' > \sigma'_p$ již postupně nabývají kontraktantní charakter, který se však uplatní až při hodnotě $\sigma' \geq \sigma'_k$.

Jednotlivé charakteristiky napětí σ' přitom odpovídají:

- σ'_d - *intergramulárnímu napětí - počátku drcení horninových zrn (hlavně jejich hran)*
- σ'_p - *přechodovému napětí, při kterém se mění dilatantní charakter hornin či zemin při smykovém namáhání na kontraktantní*
- σ'_k - *tzv. creepovému napětí, při kterém hornina nabývá plně kontraktantní charakter a při smykovém namáhání se v celém objemu porušuje vláčným kluzem, přičemž odpovídající hodnota τ_{f4} už je blízká mezi vláčnosti horniny, tj. creepové pevnosti τ_c .*

Z uvedené analýzy jasně vyplývá význam uplatnění diferencovaných hodnot smykové pevnosti zemin v závislosti na efektivním normálovém napětí a celkovém přetvoření. Přitom se ukazuje důležitost poznání hodnoty přechodového napětí σ' , protože při hodnotách napětí $\sigma' \leq \sigma'_p$, tj. v oblasti křehkého chování hornin i zemin při smykovém namáhání, je možné podle změny průběhu poměrných objemových změn

$$\frac{\Delta V}{V} \text{ jednoznačně určit jejich smykovou pevnost na mezi dilatance } \tau_D.$$

Dále hodnoty τ_D , zjištěné při různých napětích $\sigma' \leq \sigma'_p$, se jeví jako vhodné kritérium počátečního porušování zemin ve svahu, protože při smykovém namáhání $\tau > \tau_D$ dochází k počátku rozrušování jejich struktury již ve vzniklém zárodku skluzné plochy. Tím je plocha skluzné plochy vyvinuta již dříve než namáhání překročí pevnost zeminy τ_f . Každý přírůstek namáhání už potom využije tohoto oslabení. Následně to znamená, že smyková pevnost zemin na mezi dilatance τ_D je přibližně srovnatelná s creepovou pevností τ_c , která je kritériem počátečního porušování v oblasti vláčného přetváření.

Uvedený poznatek je velmi cenný, protože v geotechnické praxi při stabilitních úlohách připouští vznik zóny vláčného přetváření, což znamená vždy i mimo tuto zónu překročení mezní hodnoty τ_f s jejím následným poklesem až na hodnotu reziduální smykové pevnosti τ_r . V neposlední řadě poznatek $\tau_c = \tau_D$ je využitelný zvláště tehdy, když přímé zjištění creepové pevnosti v původním stavu dilatantních křehkých hornin je již poměrně náročné, vzhledem k dosažení značně vysokých normálových napětí $\sigma' > \sigma'_p$, resp. až $\sigma' \geq \sigma'_k$.

Zkušební zařízení

Pokrok v objasňování stavu a projevu různých typů nenasycených polosoudržných zemin, které synteticky charakterizují jejich pevnostní a deformační chování, naráželo na hranice laboratorního experimentálního zařízení. Proto bylo přistoupeno ke koncepčnímu a metodickému přístupu vybudování autonomního pracoviště velkorozměrových a vysokotlakých zařízení, které by potlačilo parazitní vlivy zejména měřítkového efektu a umožňovalo studovat především kontraktantní chování sypaniny.

Hlavní parametry zkušebních zařízení, provozovaných ve VÚHU, jsou uvedeny v tabulce 1 a 2.

Hlavní parametry edometrů

Tabulka 1

EDOMETRY	Využitelný průměr prstence (mm)	Výška vzorku (mm)	Pracovní plocha (cm ²)	Krok zatěžování (MPa)
1,2	667,6	400	3500,0	po 0,5
3,4	645,0	500	3627,5	po 0,1

Hlavní parametry smykačů

Tabulka 2

SMYKAČE	Rychlost posunu (mm min ⁻¹)	Rozměry krabice (mm)	Pracovní plocha (cm ²)	Krok zatěžování (MPa)
1*	$3 \cdot 10^{-1} - 8 \cdot 10^{-3}$	160.160.160	256,0	plynulý
2	$3,0 - 3 \cdot 10^{-3}$	160.160.160	256,0	po 0,1

*Převodový mechanismus je opatřen tranzistorovým měničem frekvence MINIREG N, který umožňuje plynulé nastavení zrychlení pohonu v poměru 1 : 10 a skokové zpomalení.

Tlakové hladiny (pro edometry 1 až 4) v zemině od 0,5 ÷ 6,0 MPa představují v hydraulickém systému tlaky 1,66 MPa a jeho násobky až do 20 MPa. Hydraulický systém je řešen blokově s výškovým uspořádáním modulových prvků v obvodu s hydropneumatickým akumulátorem s přerušovaným obvodem hydrogenerátorů. Snímače síly a deformací jsou napojeny na měřicí systém M 1000 Mikrotechny a liniové zapisovače TZ 4100.

U zemin značně stlačitelných, jako jsou výsypkové zeminy, s menšími pevnostmi a plastickými projevy, dochází k výraznému zmenšování jejich objemu. Jakmile se dosáhne maximálního stlačení, tj. minimálního objemu, není již další komprimace možná a dále by docházelo při zvětšujícím se zatěžování k výraznému porušování struktury. Toto porušování však nemůže probíhat v edometru, neboť nedovoluje příčné deformace vzorku.

Na vysokotlakém translačním smykovém přístroji jsou zkoumány především zeminy se změněnou strukturou fragmentováním a síťováním, aby velikost zrn nepřesahovala zpravidla 20 mm. V zásadě je však možné zkoušet i zeminy původní neporušené struktury. V případě zkoušení rostlého vzorku zeminy je výška vzorku omezena manipulačním prostorem mezi pěchem při jeho maximálním zdvihu a příčnickem s pevnou smykovou krabicí. S malými doplňky lze zkoušet jak sypké, tak soudržné zeminy konzistence tuhé až pevné.

Během smykových zkoušek jsou snímány a registrovány počítačem tyto hodnoty:

- *normálové napětí (přítlak) působící na umístěný vzorek v krabici tenzometrickými snímači se jmenovitou silou 100 kN a 200 kN*
- *smykové napětí působící na vzorek zeminy tenzometrickými snímači se jmenovitou silou 20 kN a 100 kN*
- *kontraktance nebo dilatance indukčními snímači deformace v rozmezí ± 10 mm*
- *smykové posunutí posun čelisti smykové krabice indukčním snímačem dráhy, posunem v rozmezí ± 20 mm.*

Všechny snímané údaje působící přítlačné síly, smykové síly, normálové deformace a smykového posunutí, jsou zesíleny šestikanálovým měřicím zařízením zesilovačem KVS 3020, registrovány zapisovači typu TZ 4620 a dále vyhodnocovány.

V devadesátých letech byly provedeny změny na mechanické, elektrické a snímací části zkušebních zařízení vysokotlakého smykače i edometrů, kterými byla vylepšována funkčnost prototypových zařízení [3]. Smykače byly doplněny měřicí pórových tlaků vody a edometr č. 1 snímačem bočního tlaku a plášťového tření mezi horním (vůči prstenci se pohybujícím) pístem a spodní deskou s otvory [4; 5].

Konstrukční uspořádání zkušebních zařízení a ukázkou zkoumaných vzorků zemin uvádíme na fotografiích (obr. 3).

Analýza procesu přetváření sypaniny při kompresním stavu napjatosti

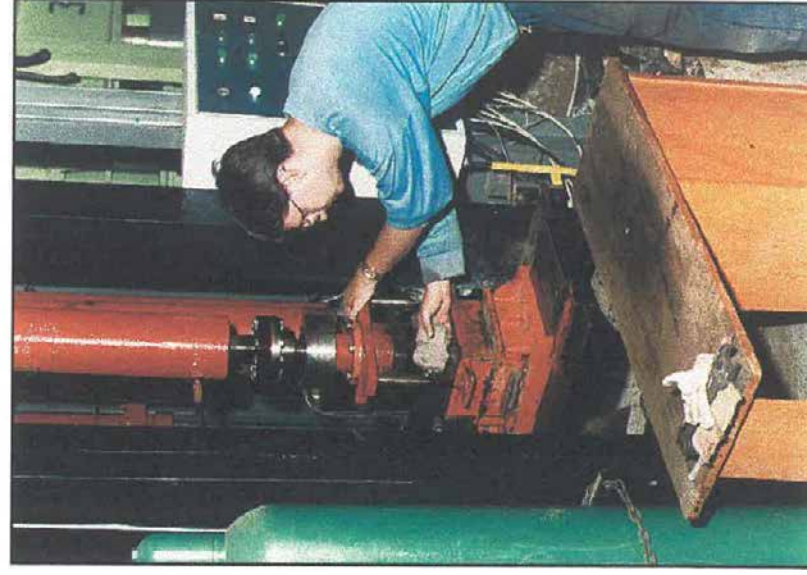
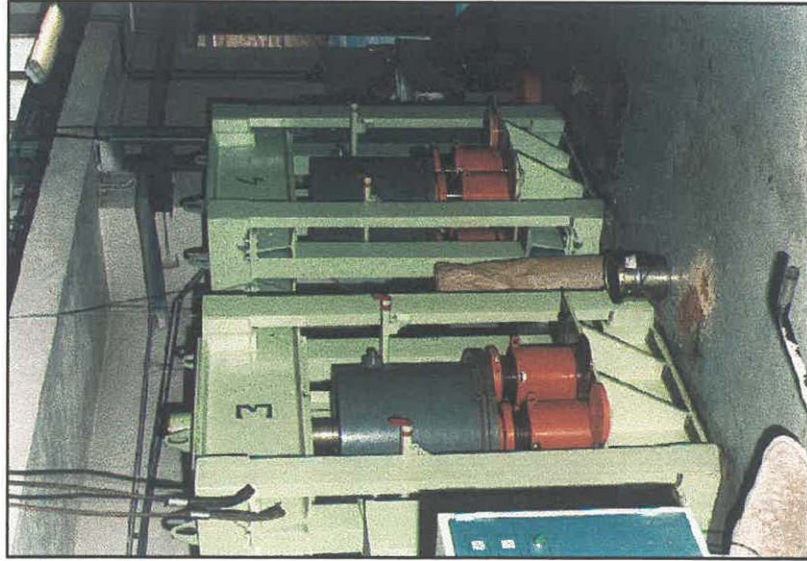
Při stlačování kusovitých zemin s upravenou frakcí < 40 mm ve velkoobjemových edometrech, je možné z edometrických zkoušek získat závislost deformace na efektivním napětí. Z této závislosti při znalosti okrajových podmínek w , ρ , e lze určit několik typů deformačních charakteristik, které jsou nejvíce používány, např. edometrický modul deformace a součinitel stlačitelnosti. Zásadně však byly zkoumány zeminy s nižší vlhkostí než index plasticity, tedy s takovým průběhem zkoušky, kdy pórový tlak se blížil nule. U přivlhčených vzorků se další zatěžovací stupeň nanášel až po vytlačení vody ze vzorku (po ustálení pórových tlaků).

Edometrické zkoušky měly charakter odvodněných zkoušek. Celkové vytlačené množství vody u sycených vzorků se přibližně rovnalo hodnotě hmotnostního zvlhčení před zkouškou. Z petrografického hlediska byly zkoumány stejné zeminy, rozdíl fyzikálních vlastností mohl být způsoben pouze záměrným zvětráním po dobu 3 měsíců, napodobující stavy in situ.

Proměnlivost objemové hmotnosti sypaniny při úložní vlhkosti lze pro nadložní komplex jílovců podle výsledků zkoušek vyjádřit:

$$\rho_n = \frac{\rho_o \rho_\infty}{\rho_o + (\rho_\infty - \rho_o) e^{-\lambda h}}$$

λ se určí z funkce $q = f(\rho_n)$
 h - hloubka uložení



Obr. 3 Konstrukční uspořádání zkušebních zařízení s ukázkou struktury zkoumaných vzorků

Pro vyjádření změny objemového přetvoření na efektivním napětí vyhovuje rovnice:

$$e_v = e_v^{\infty} [1 - e^{-\lambda \sigma_v}]$$

přičemž objemový modul α_v můžeme vyjádřit rovnicí:

$$\alpha_v = \frac{d \sigma_v}{d e_v} = \frac{1}{e_v^{\infty \lambda}} \cdot e^{\lambda \sigma_v}$$

Součinitel λ určíme z průběhu funkce $q = f(\rho_n)$.

Tímto způsobem podle [6] jsme dostali trilineární vyjádření edometrické komprese sypaniny s těmito fázemi strukturní deformace :

1. f á z e - mezi kontaktními vazbami se mobilizuje strukturní pevnost < 30 kPa
2. f á z e - probíhá intenzivní zhutňování, kdy se vzájemně posouvají zrna
3. f á z e - dosahuje se stavu porézního jílu a kontakty zrn jsou fixovány.

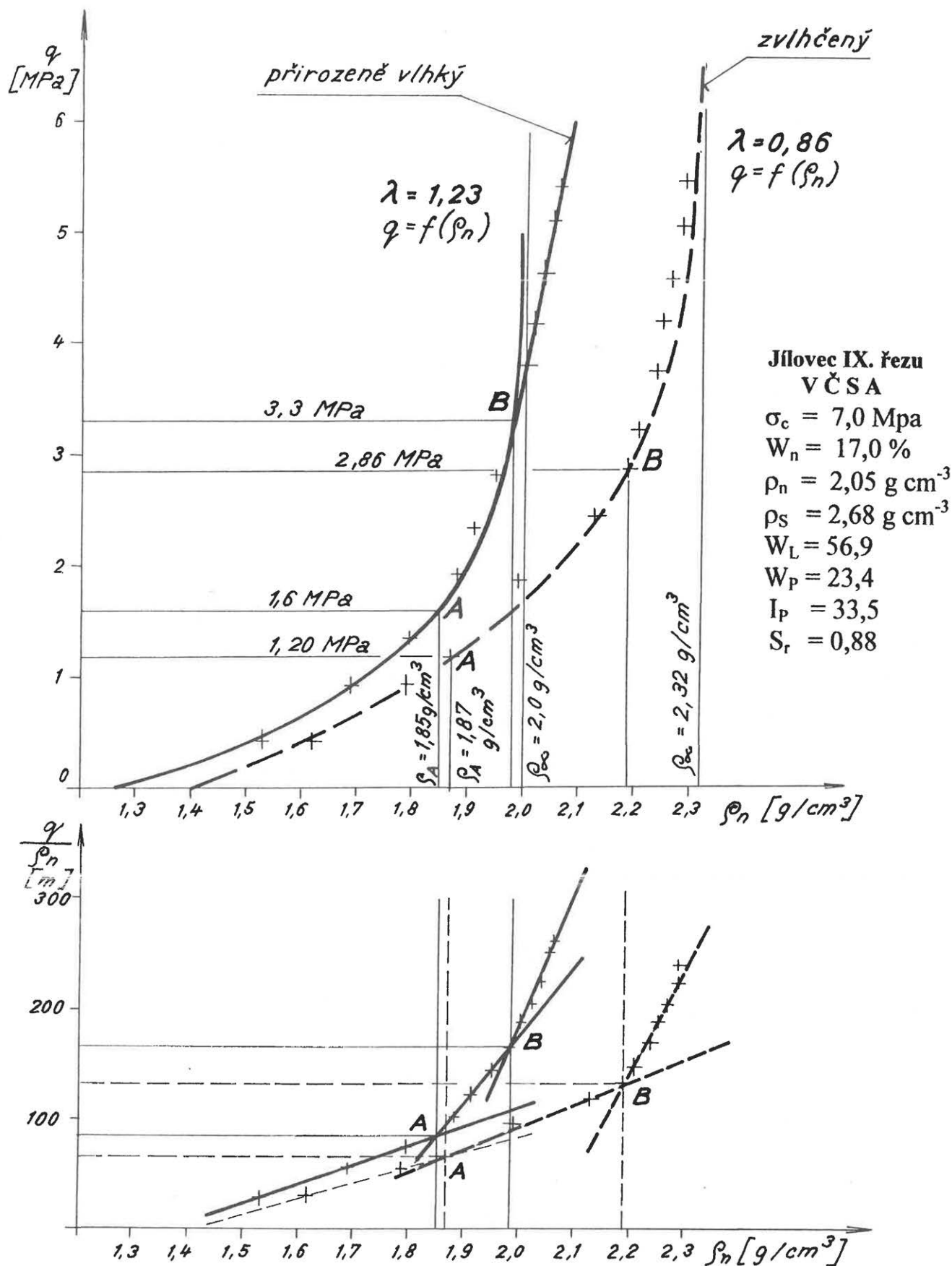
Dílčí výsledky z provedených experimentů na jílovci z IX. skrývkového řezu VČSA demonstrujeme na obr. 4.

Výsledky přetvárných procesů jílovcové sypaniny na velkoobjemových edometrech za vysokých tlaků dokumentují dlouhodobý proces konsolidace. Stanovená doba pro konsolidaci vzorku 100 ÷ 200 hodin prakticky postačovala k úplnému stlačení vzorku. Edometrický modul deformace, až na některé výjimky, narůstá se zvyšujícím se zatížením vzorku. Hroucení struktury je zřejmě avizováno nárůstem edometrického modulu od tlakové hladiny 1,5 ÷ 2,0 MPa u zeminy s vlhkostí výrazně podkračující mez plasticity. Přetváření zpevněných jílovců je plynulé a ani při nejvyšších tlakových hladinách nebylo pozorováno vytlačování zeminy z prstence edometru. Po ukončení série zkoušek se nacházel stlačený vzorek v kompaktním stavu. U částečně zvětralého vzorku po dobu 3 měsíců se poněkud zrychluje proces konsolidace a hroucení struktury.

Experimentální ověřování vhodnosti použití geotextilií ve formě vertikálních a plošných drénů

Jako další praktická aplikace edometrických zkoušek byla ve VÚHU uplatněna možnost použití dostupných filtrů pro plošné drénování výsypek. Princip konfigurace vertikálních i horizontálních drénů spočívá ve zkrácení dráhy prosakující vody málo propustnou až nepropustnou zeminou. Průtočným profilem prefabrikovaných konsolidačních drénů je pórová voda odváděna do sběrného drenážního systému.

Před zahájením vlastních zkoušek s drenážními filtry v edometrech byla zkoušena průtočnost samotné jílovcové sypaniny, tj. bez vloženého filtru. Z takto změřených hodnot denních průtoků byly vypočteny filtrační koeficienty, počáteční a konečný pro jílovcovou sypaninu a filtr GTG 80 v uspořádání ve tvaru písmene "Z" s dvojitou vrstvou plastového jádra.



Obr. 4 Trilineární vyjádření edometrické komprese sypaniny

Referenční měření $k_{\max, \min}$ jílovcové sypaniny

Tabulka 3

Zatížení (Mpa)	ΔH (cm)	D (cm)	$V_{\max}$ (ml)	$V_{\min}$ (ml)	$k_{\max}$ (m.s^{-1})	$k_{\min}$ (m.s^{-1})
0,4	36	27,98	350	100	$2,16 \cdot 10^{-8}$	$6,18 \cdot 10^{-9}$
0,9	36	26,66	120	20	$7,06 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$
1,3	36	25,96	60	20	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$1,15 \cdot 10^{-9}$
1,8	36	25,35	50	20	$2,80 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$
2,3	36	24,92	50	20	$2,75 \cdot 10^{-9}$	$1,10 \cdot 10^{-9}$
2,65	36	24,62	80	20	$4,35 \cdot 10^{-9}$	$1,09 \cdot 10^{-9}$

GTG 80 - dvojitá plastová vrstva, tvaru " Z "

Tabulka 4

Zatížení (Mpa)	ΔH (cm)	D (cm)	$V_{\max}$ (ml)	$V_{\min}$ (ml)	$k_{\max}$ (m.s^{-1})	$k_{\min}$ (m.s^{-1})
0,4	50	94	7,6	0,325	$8,27 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-6}$
0,9	48	94	0,96	0,11	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$
1,3	47	94	0,32	0,06	$4,63 \cdot 10^{-6}$	$8,68 \cdot 10^{-7}$
1,8	45	94	0,15	0,05	$2,27 \cdot 10^{-6}$	$7,56 \cdot 10^{-7}$
2,3	45	94	0,088	0,35	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$5,29 \cdot 10^{-7}$
2,65	44	94	0,065	0,04	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$6,18 \cdot 10^{-7}$

kde ΔH - je rozdíl hladin před vtokem a po výtoku z pórové zeminy

D - délka dráhy vody ve funkční části zeminy nebo filtru

$V_{\max, \min}$ - objem proteklé vody na začátku a na konci experimentu

$k_{\max, \min}$ - koeficienty filtrace na začátku a na konci experimentu

Byly zkoušeny jen vybrané charakteristiky zkoušených filtrů a geotextilií a fiktivní koeficienty filtrace při zatížení systému sypanina/filtr 2,3 MPa a nízkém hydraulickém spádu:

GTG - 80 $k = 1,22 \cdot 10^{-5} \div 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$

podle uspořádání kombinací geotextilie/plast a tvaru filtrů v zemině při měření (délka a šířka byla u zkoušených filtrů přibližně stejná)

GEOTEXTILIE E 63 - 250 $k = 10 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$

podle počtu vrstev (1 ÷ 8) a tvaru filtru při jeho uložení v zemině

GTG - 80 s keramzitem $k = 2,13 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

GEOFILTEX E 250 s keramzitem $k = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Filtry VHVD 90, 91 a 93 $k = 1,1 \cdot 10^{-4} \div 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Zkoušené typy a druhy drenážních filtrů ukázaly rozdílnost hydraulických charakteristik v širokém měřítku podle jednotlivých typů a druhů o 1 ÷ 3 řády. Podle očekávání se pro odvodňování výsypky v žádné technicky aplikovatelné úpravě nehodí geotextilie GEOFILTEX. Tyto textilie jsou pro svou vysokou pevnost v tahu vhodné pro plošnou aplikaci na komunikacích, pro zpevnění podloží cest a vozovek, tj. pro případy odvodňování resp. vysušování relativně tenké vrstvy zeminy.

Filtry typu GTG s plastovým jádrem (pletivo z polyetylenového granulátu BRALEN S A a poměrně tenké ochranné kalandrované textilie GEOMEL), lze po určité úpravě, která spočívá v násobném (min. dvojnásobném) vrstvení jádra, navrhnout k praktické aplikaci. Zvláště dobré výsledky v průtočnosti poskytují podle očekávání uměle vytvořené drenážní filtry s náplní jemného keramzitu. V tomto případě lze jako ochranného obalu použít buďto textilie GEOMEL (použitých u filtrů typu GTG - 80) nebo geotextilií GEOFILTEX E 250.

Filtry nové konstrukce typu VHVD mají ze všech zkoušených typů největší měrnou průtokovou kapacitu a nejlepší časovou stálost hydraulické propustnosti. Vnitřní plastová vrstva má zvláštní (tzv. žabkovitou) strukturu, která i po stlačení v zemině neztrácí svoji propustnost pro vodu. "Žabkovité" prolisy tohoto plastového jádra zřejmě po stlačení okolní plastickou zeminou nedovolí plošné snížení vnitřního volného průřezu. Filtry nové konstrukce VHVD - 91 byly navrženy k aplikaci pro odvodňování pracovních plošin a etáží výsypek a byly doporučeny k provoznímu ověřování [7].

Vývoj parametrů smykové pevnosti zemin při hroucení struktury

V období existence vysokotlakých smykačů se podařilo hlouběji proniknout do dominantní oblasti výpočetních parametrů pro stabilitní výpočty. Bylo prokázáno zvláštní vláčné chování sypaniny doprovázené přetvárnými procesy za vysokých normálových napětí. Dosud publikované výsledky prací jiných pracovišť v tomto vědním oboru se pohybují v napětíovém pásmu zpravidla nepřekračujícím hodnotu 1,0 MPa.

Při smykových zkouškách na vysokotlakém smykači jsou dobře rozpoznatelné velké objemové změny. Vláčné chování je podmíněno velikostí normálového napětí a stupněm zpevnění zemin v původním uložení v zemním masívu, které zvláště v podmínkách severočeské pánve se mění v širokých mezích. Při slabém stupni zpevnění s hmotnostní vlhkostí nad 30 % se přetváří sypanina za tlaků odpovídajících nízkým výsypkovým tělesům s $H \leq 35,0 \text{ m}$. Největší podíl zemin vykazuje v původním uložení střední zpevnění a při zakládání do výsypky jsou omezeně využitelné pro stavbu vysokých výsypek s $H \leq 160,0 \text{ m}$. U zemin vykazujících vysoké zpevnění, tedy s pevností v prostém tlaku větším než 6,0 MPa, již nedochází k podstatné redukci smykové pevnosti jako u předešlých typů [8].

Typickým projevem strukturní metastability, nazývaným hroucením struktury sypaniny, je prudká redukce úhlu vnitřního tření. Při naprosto převažujícím

kontraktantním charakteru smykového namáhání nemůže být prakticky využito vrcholové smykové pevnosti.

Poloha skluzné plochy ve výsypce je tedy předurčena vždy dříve než smykové napětí překročí vrcholovou pevnost zeminy. Dalším přírůstkem smykového namáhání je využíváno počátečního oslabení a v zóně přetváření zaznamenáváme pokles vrcholové pevnosti na povrchovou a posléze reziduální.

Popisované progresivní porušování jílovců je demonstrováno na přímé smykové zkoušce s konstantním přírůstkem napětí v rozsahu $0,6 \div 6,0$ MPa při rychlosti posunu $0,05 \text{ mm min}^{-1}$ na jílovcí ze IV. řezu VČSA (obr. 5).

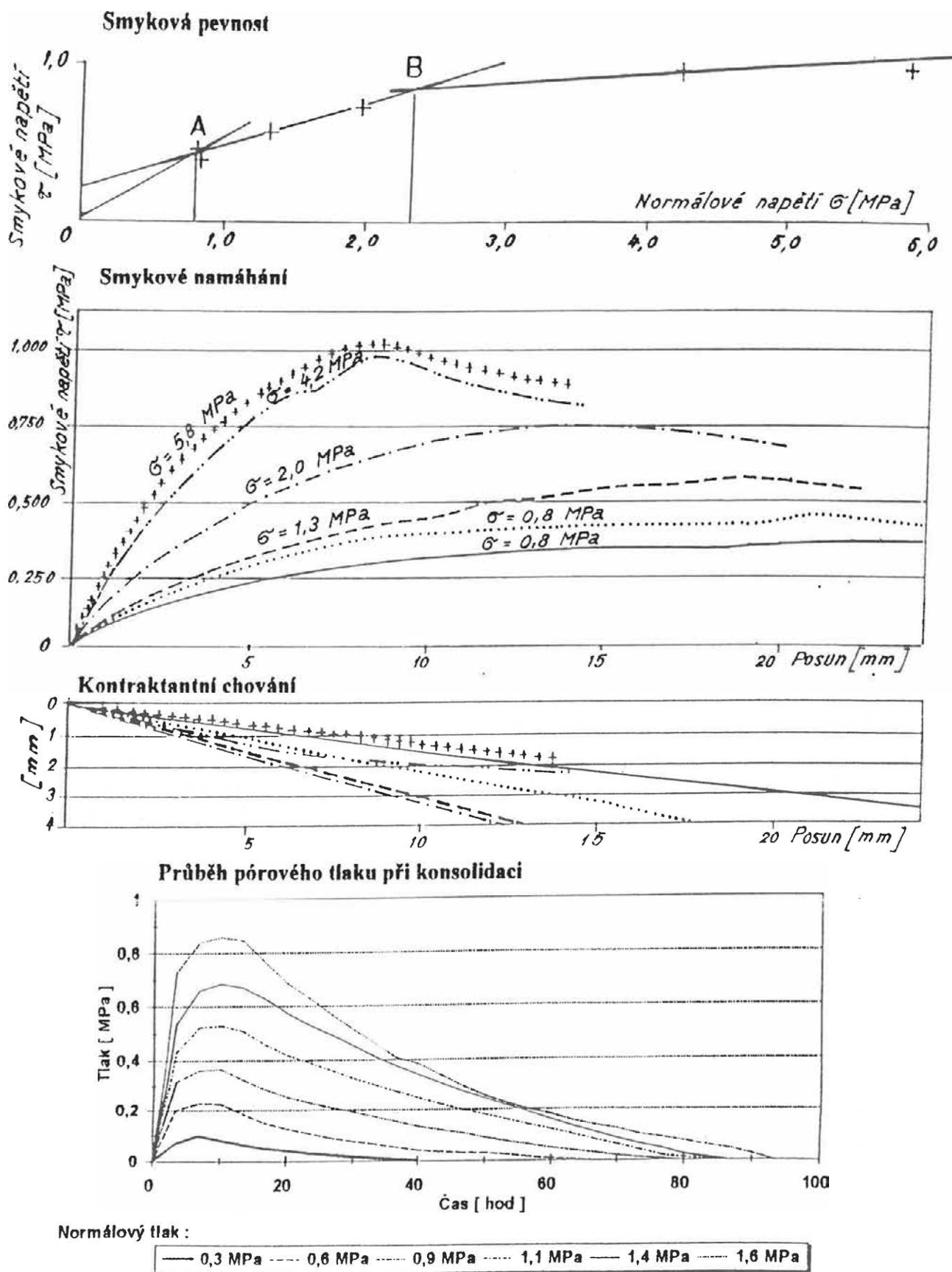
Obálky smykové pevnosti provedených experimentů zřetelně prokazují počáteční i konečný stav hroucení struktury. Vizualní vytlačování zeminy spárami smykových krabic bylo pozorováno až v oblasti normálového napětí $2,6 \div 6,0$ MPa. Objem vzorku se tedy během experimentů zmenšoval jen v této oblasti, kterou zároveň považujeme za mezní dosažitelnou výšku výsypky, přibližně 128,0 m. Grafy smykového namáhání a deformace nejsou vždy tak vyhlazené jako na vybraném obr. 5. V této oblasti před vrcholovým usmyknutím bývá tvar křivek plynulý, ale v oblasti zbytkové pevnosti má často vlnitý tvar, svědčící o vývoji porušování dočasných vazeb mezi částicemi a tudíž hroucení struktury namáhané zeminy.

Porovnáním výsledků krabicových smykových zkoušek na vysokotlakých smykačích VÚHU, a.s. Most s prostorovým snímačem tlaku in situ STAVEBNÍ GEOLOGIE - Geotechnika, a.s. byla shledána shoda v reziduálních parametrech pevnosti. Při vysokých tlacích se zemina chová jako ideálně plastická, tj. nezpevňuje se. Také výsledky triaxiálních zkoušek, tak jak jsou prezentovány v [9] potvrzují v oboru nižších komorových tlaků $\sigma_r \leq 0,7 \text{ MPa}$, že jde o zkoušky otevřeného systému, tj. totální napětí jsou rovna efektivním. V oboru $\sigma_r \geq 0,7 \text{ MPa}$ mohou mít zkoušky charakter neodvodněného či částečně odvodněného vzorku. O tomto charakteru zkoušky v analyzovaných podmínkách nerozhodují jenom zvolené okrajové podmínky, ale spontánní transformace struktury vzorku v průběhu přetvárného procesu.

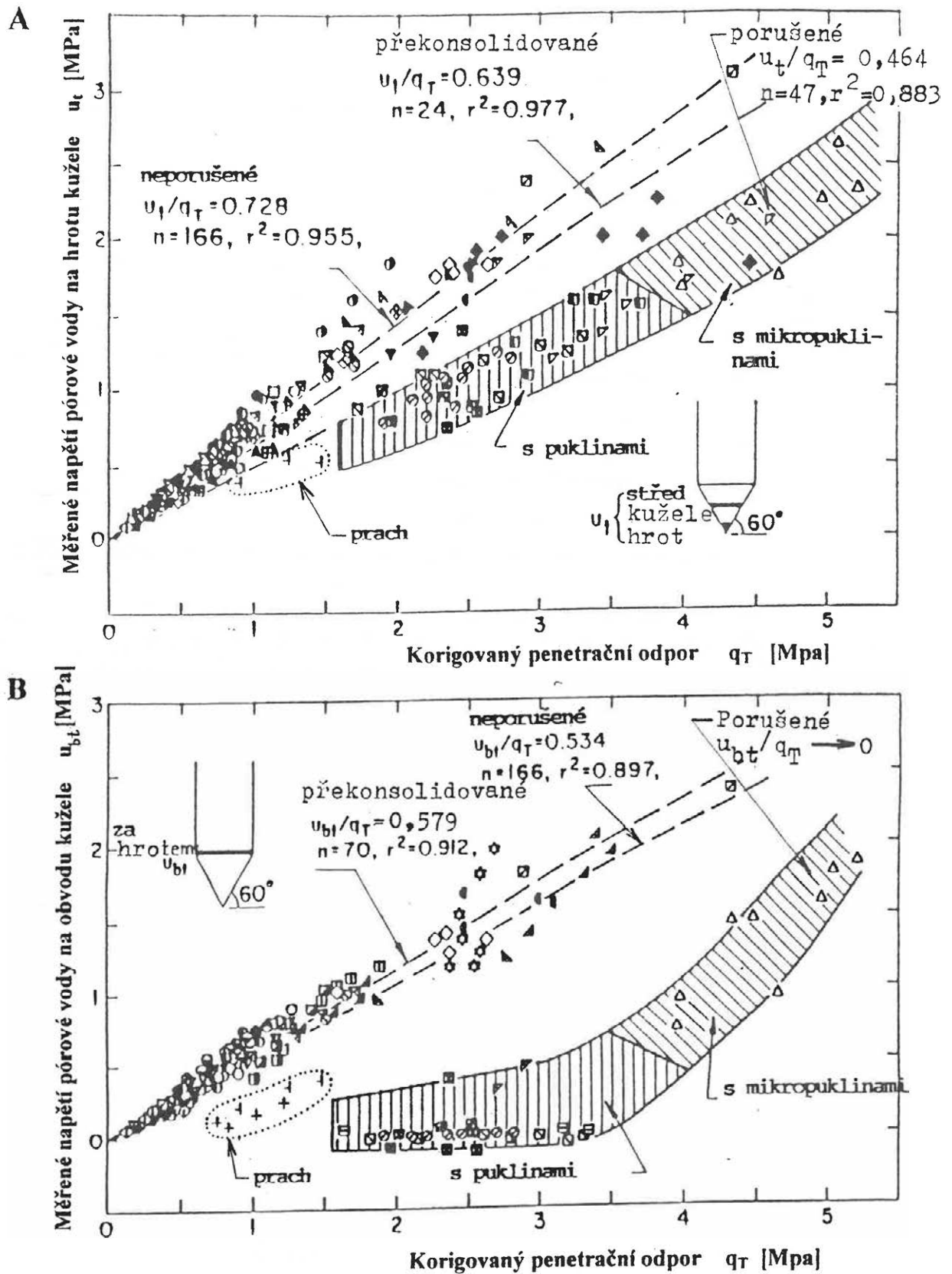
Vývoj pórového tlaku vody

Měření pórového tlaku vody v jílovitých zeminách jsou ovlivňována pozicí snímače, hydrostatickým tlakem a indukovaným normálovým napětím v zemině při smykové zkoušce. Průběh pórového tlaku v podstatě závisí na drenáži vzorku, která může být jednostranná nebo vícestranná. Ve smykové krabici dochází k roznášení pórových tlaků směrem k místům s nižšími tlaky do spodních a okrajových částí krabice. Vůči skutečným konsolidačním procesům ve výsypkovém tělese jsou modelované časové průběhy ve smykačích i edometrech nesrovnatelné, ale naměřené hodnoty pórových tlaků se přibližují skutečným in situ.

Ve smykačích je pórový tlak snímán tlakovými čidly fy BELLE HOWELL. Čidlo je složeno z filtrového kamene $\varnothing 14 \text{ mm}$ upevněného do válcového nosiče s podložkou vyplňující spodní část pohyblivé smykové krabice. V podložce je vyfrézována drážka, ve které je volně vedena kapilára k tlakovému snímači upevněnému mimo smykovou krabici. Průběh naměřených pórových tlaků při konsolidaci vzorku uvádíme na obr. 5.



Obr. 5 Přímá smyková zkouška s konstantním přírůstkem napětí a deformace



Obr. 6 Závislosti mezi u_t a u_{bt} a korigovaným penetračním odporem

Provedené experimenty potvrdily, že i při částečně odvodněných zkouškách došlo k rozptýlení pórových tlaků při konsolidaci a při vlastním smykání se již nepatrně uplatňují. Při uspořádání zkoušek jako konsolidovaných a částečně odvodněných se výsledné naměřené hodnoty smykové pevnosti přibližují hodnotám efektivním.

Z uvedených výsledků je patrné, že při $\sigma = 0,3$ MPa byla naměřena hodnota pórového tlaku $u = 95$ kPa, tj., že voda přenášela 31,6 % konsolidačního zatížení. Při $\sigma = 1,6$ MPa však dosáhl pórový tlak max. hodnoty $u = 846$ kPa, tj. 52,9 % konsolidačního zatížení [10].

Na velkém souboru provedených zkoušek na různých typech jílu a při sledování vývoje pórových tlaků statickým penetračním sondováním, publikovaných v [11], byly potvrzeny obdobné výsledky. Kromě penetračního odporu na hrotu sondy q_c a plášťového tření f_s byl měřen pórový tlak na špici u_t i na obvodu u_{bt} zatlačovaného hrotu. Měří se souhrnný pórový tlak

$$\Delta u_m = \Delta u_{oct} + \Delta u_s + u_o$$

kde Δu_{oct} - je oktaedrické napětí

Δu_s - napětí způsobené smykem

u_o - hydrostatické napětí

Výsledky uváděných měření se vztahují na neporušené a porušené puklinaté jílly.

Na posledním obr. 6 je uveden přehled těchto velmi cenných údajů v závislosti na korigovaném penetračním odporu. U puklinových porušených jílu se docílil přibližně pórový tlak na hrotu u_t 46 % měřeného penetračního odporu. Neporušené jílly při měření pórového tlaku na obvodu kužele vykazovaly u_{bt} 53 % měřeného penetračního odporu.

Závěr

Uvedené vybrané experimenty s jílovcovou sypaninou vystihují její hlavní charakteristické vlastnosti. Všechny provedené zkoušky prokazují výraznou závislost na úrovni napětí a její metastabilní stav se mění z trojfázového, kdy se rovnají totální a efektivní napětí, na dvojfázový. Chování nasycené struktury sypaniny má výrazné kontraktantní chování. Analýza souboru parametrů o vlivu jednotlivých geomechanických vlastností na proces přetváření, umožňuje determinovat rozhodující prvky, ovlivňující vláčné chování sypaniny.

Provedené experimenty poskytly chybějící výpočetní hodnoty fyzikálních, mechanických a hydraulických parametrů sypaniny pro racionální řešení geotechnických úloh. Např. byly zkoumány závislosti síly zatlačování penetračního hrotu na napěťovém stavu vzorku zeminy v edometru. Na základě edometrických zkoušek, pokud nejsou k dispozici geodetická sledování deformací, je možné vyšetřovat hlavní složky sedání povrchu výsypek. Kromě pevnostních a deformačních charakteristik je možné stanovit i rozhodující technologické vlastnosti zemin pro určování dobývací a dopravní výkonnosti těžební technologie.

Z praktických aplikací, využívajících dosažené poznatky v chování nenasyčených zemin, uvádíme:

- stavbu převyšovaných vnějších výsypek, zejména Podkrušnohorské a Radovesické výsypky s limitovaným výsypným prostorem

- využití výsypných prostorů pro společné a separátní zakládání granulátů - upravených produktů spalování energetických a teplárenských zdrojů na vnitřní výsypce lomu J. Šverma a Libouš
- rozsáhlou stavební činnost na vnějších výsypkách MUS, a.s.
- sanace zbytkových jam výsypkovými tělesy, využívaných jako vodní nádrže na lokalitách Michal, Boden a Vrbenský.

Velké uznání patří Sokolovské uhelné, a.s., Severočeským dolům, a.s. a Mostecké uhelné společnosti, a.s. za podporu autonomního výzkumu horninového masívu podkrušnohorských pánví, který nesporně zvyšuje úroveň spolehlivosti rozhodování v provozní báňské činnosti.

Literatura

1. Geus, A., Alonso, E.E.: Základní pohled na chování nenasycených dilatantních jílu. Canadian Geotechnical Journal, 2/1992.
2. Fusganger, E.: Klasifikace a geomechanické posuzování různých typů svahových pohybů a poruch. Kandidátská disertační práce, 1986.
3. Pichler, E., Marušák, M., Štembera, P.: Výzkum přetvárných a pevnostních charakteristik výsypkových zemin. Výzkumná zpráva VÚHU, 12/1990.
4. Dykast, J., Lang, T.: Aplikace snímače bočního tlaku a plášťového tření. Dílčí zpráva VÚHU, 8/1994.
5. Šmíd, J. : Výpočet namáhání a deformace měrného členu snímače tlaku a plášťového tření v edometru. Zpráva 8/1993.
6. Radl, A.: Analýza procesu přetváření jílovité sypaniny v závislosti na geotechnických vlastnostech. Výzkumná zpráva, 8/1992.
7. Žďárský, J., Dykast, J.: Aktuální opatření na podloží a tělese vnitřní výsypky lomu Jiří. Odborný posudek VÚHU, 4/1994.
8. Pichler, E., Štembera, P., Křivan, Z., Marušák, M.: Prokázání hroutení struktury a textury sypaniny smykovými zkouškami. Výzkumná zpráva VÚHU, 12/1989 a 5/1990.
9. Feda, J., Herle, I.: Mechanické chování jílové sypaniny. Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV, 11/1992.
10. Lang, T., Schmidt, P.: Vývoj parametrů smykové pevnosti lomu Libouš. Výsledky lab. testování VÚHU, 6/1996.
11. Mayne, P.W., Kulhang, F.H.: Sledování vývoje napětí pórové vody během penetračního sondování v jílovitých zeminách. Canadian Geotechnical Journal, 4/1990.