

Ing. Zdeněk Formánek CSc., VÚHU:

Rheologické vlastnosti jíly

Ú v o d

Rheologie jíly je celkem obor mladý a v praxi dosud málo běžný, přestože s rheologickými vlastnostmi jíly se setkáváme v řadě oborů. Dva obory, ve kterých jsou rheologické vlastnosti jíly zvláště důležité, jsou keramická technologie a mechanika zemin. Zatímco pro keramickou technologii jsou významné vlastnosti uměle připravovaných těst s poměrně velkým obsahem vody, v mechanice zemin jde hlavně o přirozené jíly s poměrně malou vlhkostí (a značnou pevností).

Mechanika zemin se dosud touto otázkou zabývala velmi málo, spokojovala se měřením pevnostních konstant. Při tom však bylo v praxi známo, že např. u laboratorních zkoušek naměřená hodnota pevnosti značně závisí na rychlosti prováděné zkoušky. Tento poznatek byl respektován dodržováním rychlosti zkoušek. Dvě rheologické zkoušky, převzaté z keramické praxe a v mechanice zemin již dávno používané, jsou stanovení Atterbergových mezí. Tyto zkoušky jsou čistě uzanční a nemají vlastně žádný fyzikálně definovaný význam; přesto jsou velmi dobře reprodukovatelné. Není to však měření vlastností přirozené zeminy, ale zkoumání dvou bodů v závislosti zeminy na vlhkosti.

V praxi je nutno rheologické vlastnosti zemin respektovat, protože např. svah, navržený na hranici stability s koeficientem bezpečnosti blízkým 1 se postupně deformuje, příp. poruší po nějakém čase. Zde se však projevují jak deformace, tak postupné změny vlastností zemin. Také řada přírodních destrukcí svahů začínala plastickou deformací.

Pro skutečně bezpečné výpočty je nutno počítat s koeficientem bezpečnosti, jehož velikost se určuje spíše citem než exaktní úvahou. Rovněž volba metody výpočtu značně ovlivní bezpečnost svahu, protože hodnoty získané různými metodami se dosti liší. Na druhé straně by stačilo navrhnout svahy se stabilitou jen dočasnou (při povrchové těžbě uhlí), protože situace na dole se stále mění a svah, který je na hranici stability, může být další těžbou po čase odlehčen

nebo na jeho stabilitě přestane záležet. Ekonomický význam těchto úvah je značný, protože jde o přemísťování velkých kvant zeminy.

Teoretická část

Rheologie se zabývá změnami tvaru hmoty při časovém působení napětí. Všechny druhy napětí je možno rozložit do dvou na sebe kolmých složek, z nichž jedna je tengenciální a druhá normální. Tangenciální složka způsobuje namáhání smykem; vliv normální složky je v řadě případů menší, někdy dokonce zanedbatelný. Proto se v rheologických rovnicích zpravidla uvažuje pouze smykové napětí. (2, 12, 14, 15, 17)

Smykové napětí je definováno jako síla, působící na jednotku plochy, rovnoběžně se směrem napětí. Další důležitou veličinou je deformace, jež se rovná posunu dvou bodů v hmotě, jejichž vzdálenost ve směru kolmém k deformaci je jednotková. Rychlost deformace je relativní rychlost zmíněných dvou bodů.

Pro nejjednodušší případ hranolu, namáhaného smykem tak, že jedna podstava je upevněna a protilehlá podstava je tažena ve směru hrany, platí, že napětí

$$\tau = \frac{P}{a \cdot b}$$

deformace

$$j = \frac{a'}{c}$$

rychlost deformace

$$\frac{d j}{d t} = \frac{v_a}{c}$$

P = působící síla

τ = napětí

a, b = hrany podstavy hranolu

c = výška hranolu

a' = relativní posunutí horní podstavy

v_a = rychlost posunu horní podstavy

Aby bylo možno popsat chování určitého reálného materiálu, byla vytvořena řada abstraktních ideálních materiálů, jejichž chování je jednoduché. Skládáním prvků z těchto materiálů se lze přiblížit chování skutečného materiálu. Pro větší názornost byly vytvořeny mechanické modely, jejichž vlastnosti jsou obecně známé.

Pružná (Hookova) hmota

U této hmoty je deformace úměrná napětí.

$$j = \frac{\tau}{G}$$

G = modul pružnosti ve smyku

Mechanickým modelem této hmoty je pružina.

Viskózní (Newtonova) kapalina

Každé, sebemenší napětí působí deformaci, jejíž rychlost je úměrná velikosti napětí.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta} \quad \eta = \text{viskozita}$$

$$\gamma = \frac{1}{\eta} \int_0^t \tau dt$$

Při konstantním napětí

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} t$$

Modelem je válec s pístem, který se pohybuje bez tření. Válec je naplněn kapalinou a v pístu je malý otvor.

Plastická (St. Venantova) hmota

Při malých napětích se nedeformuje. Při překročení určité hodnoty napětí - meze toku - nastává nekonečně rychlá deformace.

$$\gamma = 0 / \tau < P_m$$

P_m = mez toku

$$\frac{d\gamma}{dt} = \infty, \tau > P_m$$

Modelem jsou dvě destičky, přitlačované konstantní silou, mezi nimiž působí konstantní tření.

Maxwellova hmota

Je sériovým spojením Newtonovy kapaliny a Hookovy hmoty (v symbolickém označení $M = H - N$) (obr. 1). Deformace obou částí se sčítají, napětí jsou v obou částech stejná.

$$\gamma = \frac{1}{\eta} \int_0^t \tau dt + \frac{\tau}{G}$$

Při konstantním napětí platí:

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} t + \frac{\tau}{G}$$

Hmota se tedy okamžitě pružně zdeformuje a pak teče stálou rychlostí. Po

odlehčení klesne deformace Hookovy části na nulu, deformace Newtonovy části zůstane zachována.

Kelvinova hmota

Je to paralelní kombinace Newtonovy kapaliny s Hookovou hmotou ($K = H/N$) (obr. 2). Deformace v obou částech jsou stejné, napětí se sčítají.

$$\tau = \gamma G + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$$

Pro konstantní napětí platí:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta} t} \right)$$

Při snížení napětí na nulu klesá deformace podle rovnice

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{G}{\eta} t} \quad \gamma_0 = \text{deformace v okamžiku odlehčení}$$

Hmota se chová jako pružná hmota, jejíž pružnost se projevuje se zpožděním, jeví pruživost.

Binghamova hmota

Hmota je paralelní kombinací Newtonovy a St. Venantovy hmoty, v sérii s nimi je Hookova hmota ($B = (N/StV) - H$) (obr. 3).

Chování této hmoty je třeba popsat pro dvě oblasti odděleně. Pod mezí toku se chová jako Hookova hmota, nad mezí toku jako Maxwellova s tím rozdílem, že u členu "viskozita" se odečítá mez toku, hmota jeví plouživost.

Deformace je součtem deformací St. Venantova a Hookova členu; deformace St. Venantova členu je shodná s deformací Newtonova členu.

Pro $\tau < p_m$ platí

$$\gamma = \frac{\tau}{G}$$

Pro $\tau > p_m$ platí

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau - p_m}{\eta} + \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt}$$

Při konstantním napětí

$$\gamma = \frac{\tau - p_m}{\eta} t + \frac{\tau}{G}$$

Schofield - Scott - Blairova hmota,

nazývaná také Maxwell - Švedov - Kelvinova. Je to hmota, složená z pěti prvků - sériové spojení Binghamovy a Kelvinovy hmoty.

SchScB - B - K = H - (N/Stv) - (N/H) (obr. 4).

Deformace všech tří částí se sčítají, napětí jsou shodná. Při zatížení pod mezí toku se uplatní Hookův a Kelvinův člen - při konstantním napětí

$$\gamma = \tau \left[\frac{1}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t} \right) + \frac{1}{G_2} \right] \quad / \quad \tau < P_m /$$

Při překročení meze toku se uplatní St. Venantův a druhý Newtonův člen

$$^a \gamma = \tau \left[\frac{1}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t} \right) + \frac{1}{G_2} \right] + \frac{\tau - P_m}{\eta_2} t \quad / \quad \tau > P_m /$$

Pod mezí toku se projevuje pružnost a pruživost, nad mezí toku i plouživost.

Při snížení napětí na nulu se nejprve okamžitě sníží na nulu deformace Hookova členu, pak se exponenciálně sníží na nulu deformace Kelvinova členu. Deformace St. Venantova členu zůstane zachována.

Všechny předchozí modely jsou vlastně zvláštní případy Schofield - Scott - Blairova modelu, v němž jsou určité prvky zanedbatelné. Například Maxwellův model vznikne vynecháním Kelvinova a St. Venantova členu ($G_1 = \infty$, $P_m = 0$). Kelvinův model vynecháním Binghamova členu ($P_m = \infty$, $G_2 = \infty$), Binghamův model vynecháním Newtonova členu v Kelvinově části ($\eta_1 = 0$). Tato skutečnost nemá jen teoretický význam - v praxi je možno často popsat určitý jev Schofield - Scott - Blairovým modelem, ale za zvláštních okolností je možno použít jednodušších formulí. Např. u pokusů, jejichž trvání je tak dlouhé, že plastická deformace mnohonásobně překročí ostatní, postačí Binghamův model. Naopak u pokusů velmi rychlých, kde se nestačí rozvinout ostatní druhy deformací, stačí Hookův model.

Uvedené čtyři modely hmoty jsou základní a nejčastěji používané. Pro dosažení vyšší přesnosti byla vypracována řada dalších modelů, které mají jednak dovolit popsat jevy, dříve uvedenými modely nepopsatelné, jednak lépe vystihnout jemné detaily vlastností popsanych látek.

Tyto složité modely sice velmi dobře a názorně vystihují všechny vlastnosti hmoty, ale jejich matematická interpretace je velmi obtížná.

V uvedených modelech i rovnicích se uvažuje dokonalá linearita všech funkcí, libovolně velká deformace vzorku. Ve skutečnosti však v každé hmotě může za určitých okolností dojít k porušení - přerušení souvislosti hmoty. V této oblasti přestávají platit rovnice, odvozené pro menší zatížení a při odvozování je nutné vyznačit rozsah jejich platnosti. Ne zcela exaktním řešením je zařazení St. Venantova prvku do série s modelem. Dosažení meze toku tohoto prvku pak znamená porušení.

Mineralogie jílu, struktura a koloidně chemické vlastnosti jílu

Hlavní složkou jílu jsou jílové minerály - aluminosilikáty s charakteristickou vrstevnatou strukturou s krystaly mikroskopické velikosti. (2, 8)

Základem struktury jílových minerálů jsou tetraedrické skupiny SiO_4 a oktaedrická skupina AlO_6 . Struktura je tvořena různě uspořádanými vrstvami těchto skupin, v nichž některé prvky mohou být substituovány.

Povrch částic je tvořen plochami, obsazenými kyslíkovými atomy, které mají záporný náboj, vzniklý jednak polaritou vazeb, jednak substitucí kationtů nízkovalentních za vícevalentní. Na hranách krystalů, kde jsou přerušené vazby, na něž jsou vázány alkalické kovy nebo kovy žíravých zemín, je soustředěn kladný náboj. Tyto náboje podstatnou měrou ovlivňují chování částic v suspensi nebo v těstě. (18)

Pokud tomu nebrání žádná další okolnost, přitažlivé síly mezi kladně nabitými okraji a záporně nabitými plochami způsobí přitažení a vazbu mezi částicemi - vybudování struktury "domku z karet". Tato struktura je charakterizována velkou pevností i při značném obsahu vody, která je pak v mezích mezi částicemi. (5, 6, 9)

Přirozené jíly jsou však často jednosměrně orientovány - tvoří zřetelné vrstvy, s jejichž směrem jsou rovnoběžné plochy destičkovitých krystalků. Rovněž mechanické i elektrické vlastnosti (pevnost, vodivost) ve směru vrstev se podstatně liší od směru kolmo k nim. Je tedy zřejmé, že pokládat jíl za izotropní materiál je možno jen výjimečně a chyby tím způsobené mohou být značné. Dokonalá anisotropní struktura "domku z karet" není příliš obecnou, skutečné zeminy jsou vždy do určité míry orientovány. (3)

Důležitou roli zde hraje i mineralogický charakter jílu a velikost jeho

částic. Velké a pravidelné částice kaolinitu s poměrně rovnoměrným nábojem a malým počtem přerušovaných vazeb mají menší tendenci ke koagulaci než malé částičky montmorillonitu s relativně velkou povrchovou energií a řadou přerušovaných vazeb. I makroskopickým pozorováním je možno zjistit, že kaolinitické a kaoliniticko-illitické jíly obsahují zpravidla málo vody, jsou pevnější a zřetelně vrstevnaté, kdežto se stoupajícím obsahem montmorillonitu stoupá obsah vody, snižuje se pevnost, stoupá plasticita a vrstevnatost přestává být makroskopicky pozorovatelná.

Dalším faktorem, uplatňujícím se ve vazbě jílových částic, je voda. Její přítomnost podstatně mění pevnost jílu; se vzrůstajícím obsahem vody klesá pevnost, jíl se stává plastickým.

Důležitým faktorem je různost náboje na povrchu částice: elektrokinetický potenciál částice, vypočtený z elektrokinetických jevů, je průměrnou hodnotou celé částice. Ve skutečnosti je však částice nabitá v různých místech různě, plochy jsou zpravidla záporné, hrany kladné. Proto je elektrostatické pole v jejich blízkosti silně deformováno a řada siločar se uzavírá zpět k částici. Velmi názorně ukazují význam kapaliny, vůči níž jsou částice hydrofilní, pokusy Rosenquista, který zmrazil plastický jíl a pak jej ve vakuu vysušil. Za těchto podmínek nenastalo obvyklé smrštění sušením, přestože voda byla odstraněna. Pevnost vzorku se vysušením prakticky nezměnila, ale plasticité vlastnosti zmizely. Když byl vzorek nasycen vodou, plasticita se obnovila, kdežto při nasycení nepolární kapalinou (CCl_4) byl dále křehký. Z toho vyplývá, že vazby mezi částicemi jsou tvořeny přímými nebo téměř přímými dotyky mezi nimi a že přítomnost vody umožňuje posuvy částic a uvolnění struktury. (2, 13, 16, 18)

Shrneme-li všechny vlivy, působící na částice ve vodním prostředí, získáme následující přehled:

- 1/ Van der Waalsovy síly: jsou přitažlivé, neselektivní a působí jen na malé vzdálenosti.
- 2/ Elektrostatické síly: jsou přitažlivé nebo odpudivé, působí na poměrně velkou vzdálenost. U jílových minerálů se na větší vzdálenosti projevují odpudivé síly; jestliže se částice přiblíží, mohou se projevit nehomogenity pole a různost lokálních nábojů a může nastat přitahování.
- 3/ Adsorpční síly: voda se adsorbuje na povrchu částic a tvoří poměrně silný film. Vlastnosti vodního filmu se podstatně liší od vlastností nor -

mální vody - jeho specifická hmota se blíží hodnotě 2 g/cm^3 , dielektrická konstanta klesá na 3. (7, 16)

- 4/ Vliv iontů rozpuštěných ve vodě; výměnnou adsorpcí na částech jílu mění přímo náboj částic. Zvlášť výrazně se uplatňují hydroxylové ionty, které se přednostně adsorbují, náboj částice tedy závisí zejména na pH. (81)
- 5/ Povrchové napětí vody: jeho vliv je z hlediska novějších výzkumů pravděpodobně zanedbatelný. (11)

U většiny jílových materiálů je pozorována thixotropie - zvyšování pevnosti suspenze nebo pasty, je-li ponechána v klidu. Jev je značně výrazný zejména u bentonitových suspenzí a je možno jej číselně vyjádřit koeficientem thixotropie, který je definován rovnicí

$$K_t = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\min}}$$

P_{\max} - maximální pevnost po dlouhém čase

P_{\min} - minimální pevnost při zcela porušené struktuře

Vysvětluje se konečnou rychlostí tvorby vazeb mezi částicemi, které se po porušení postupně obnovují.

Druhý jev příbuzný thixotropii je senzitivita - snížení pevnosti při - rozeného jílu porušením jeho struktury. Kvantitativním vyjádřením je poměr mezi pevností "rostlého" a porušeného jílu. Tento jev je - podobně jako thixotropie - reverzibilní a pevnost uměle připraveného vzorku s časem stoupá. Je to proces déle trvající než thixotropie, kde vytvoření struktury trvá několik hodin, zatímco porušený vzorek jílu zvyšuje svou pevnost po mnoho let. (3) Naopak při dlouhodobém namáhání pevnost zemin klesá v důsledku postupného porušování struktury. (1, 10)

Zpevnění jílu může nastat i v důsledku cementace - stmelení částic vlivem sloučeniny, která vzniká mezi sedimentujícími nebo již sedimentovanými částicemi jílu.

Vlastností jílu nejsou tedy stabilní a mění se jednak samovolně stárnutím, jednak v důsledku umělého zásahu. Viskozita zemin se mění v důsledku zatížení a podle tvaru závislosti viskozity na napětí jsou pak popisovány jako hmoty relativně plastické (takové, které jeví mez toku) a strukturované kapaliny (nejeví mez toku). Zda se systém chová jako strukturovaná

kapalina nebo jako plastická hmota, záleží na všech faktorech, které ovlivňují tloušťku elektrické dvojvrstvy a elektrokinetický potenciál částic, na obsahu vody v systému, na velikosti částic a kvalitě jílu a dalších faktorech, kterých je mnoho a jejichž vlivy se natolik překrývají, že spolehlivé údaje o vlastnostech jílu je možno získat zatím pouze experimentálně.

Experimentální část

Pro rheologické zkoušky nejsou vhodné všechny přístroje, určené pro měření mechanických vlastností zemín.

Např. při měření pevnosti v prostém tlaku je možno stanovit koeficient viskozity, tento koeficient však nelze použít pro výpočty při toku, protože k tomu účelu je nutný údaj viskozity při smykovém namáhání. Přepočít nelze provést bez znalosti dalších konstant (modul pružnosti a viskozita při objemovém stlačování). Podobně při smykání na krabíčovém smykači nedochází k definované deformaci vzorku, protože čelisti se posunují bezprostředně po sobě, vzdálenost smykajících se rovin je nulová a rheologické chování by se nemělo vůbec projevit. Jestliže se přesto zemina před porušením napřed deformuje, znamená to (zanedbáme-li nepřesnosti aparatury, vůle apod.), že k porušení dochází ve hmotě kolem smykové plochy, jejíž objem však není znám. U penetrační, vrtulkové a podobných zkoušek je napětí ve vzorku silně nehomogenní a metody proto nejsou pro rheologická měření rovněž vhodné.

Jediná z běžně používaných aparatur, která je vhodná pro rheologická měření, je Hvorslevův mezikruhový smykač, jehož princip spočívá v tom, že vzorek ve tvaru nízkého dutého válce je pomocí čelistí, přitlačovaných na podstavci, namáhán v krutu. Při vhodně volených rozměrech vzorku (velký průměr při malé tloušťce a výšce) je napětí přibližně homogenní a deformace vzorku jsou přesně definovatelné. Slabinou metody je přenášení síly na vzorek, kde může dojít k prokluzování čelistí a dále tření vzorku o stěny válců, mezi nimiž je umístěn. (4)

Pro praktické pokusy byla zvolena speciální konstrukce smykače, která umožňovala provádět smykové zkoušky s minimem nepřesností.

Vzorek ve tvaru nízkého válce byl umístěn mezi čelisti podobného tvaru. Spojení bylo zajištěno lepením epoxidovým lepidlem. Pro dosažení spolehlivého spojení byly čelisti i vzorek rýhovány kolmo ke směru smyku.

Vzorek byl chráněn gumovou membránou, natřenou silikonovým tukem a celý byl umístěn do tlakové komory, vyrobené z umaplexu, ve které mohl být rtuťovým sloupcem vyvozen tlak až 3 atp.

Dolní čelist byla upevněna, horní byla volná a pomocí třmenu a tyčky byl na ni vyvozován tlak přesně v rovině jejího styku se vzorkem. Tyčka procházela speciálně upravenou průchodkou ve stěně tlakové komory, takže při dokonalé těsnosti systému nebylo tření větší než 40 p. Tlak na tyčku byl vyvozován závažím pomocí pákového mechanismu a měřením posuvů tyčky byla stanovena deformace vzorku (obr. 5).

Pro pokusy bylo použito jednak umělých vzorků, připravených z braňanského bentonitu, jednak přirozených vzorků. Umělé vzorky byly použity pro snadnost výroby řady dokonale shodných vzorků přesně definovaného složení a byly připraveny konsolidací mokrých jílových vzorků po dobu 6 týdnů pod stálým tlakem.

Při první sérii měření byl volen různý konsolidační tlak pro zjištění závislosti mezi vlhkostí a konsolidačním tlakem, ve druhé sérii byly vzorky konsolidovány pod stálým tlakem 2 kp/cm^2 .

Třetí série měření byla provedena s přirozeným vzorkem odebraným z dolu Obránců míru. Byl plastické konsistence, o soudržnosti $c = 0,17 \text{ kp/cm}^2$ a úhlu vnitřního tření $\varphi = 18^\circ$. Jeho složení, stanovené semikvantitativně s rtg-difraktoqramu, bylo: kaolinit - illit - montmorillonit - křemen, v poměru přibližně 1:1:1:1.

Vzorky byly namáhány konstantním smykovým napětím, které bylo zvyšováno o $0,05 \text{ kp/cm}^2$ u prvních dvou sérií vždy po 48 hodinách, u třetí po 72 hodinách.

U první série bylo normální napětí nulové, u druhé a třetí byly voleny stupně 0; 0,5; 1 a 2 kp/cm^2 .

Naměřené deformace byly vyneseny do grafů v závislosti na čase, z grafů byly zjištěny moduly pružnosti okamžité i kelvinovské, viskozita toku i kelvinovská a mez toku. Vypočtené hodnoty byly vyneseny do dalších grafů, sledujících závislosti mezi viskozitou, smykovým napětím a normálním napětím. Byly vyvozeny následující závěry: (obr. 6, 7, 8, 9)

1/ Vlastnosti všech vzorků jsou v podstatě stejné, závislost deformace na napětí a čase lze vyjádřit stejnými rovnicemi, podle charakteru vzorku a způsobu konsolidace se mění příslušné konstanty.

- 2/ Jíl se při smykovém namáhání chová jako pružnovazká hmota, část pružné deformace nastává okamžitě, část se vyvíjí se zpožděním, dále dochází k pomalé trvalé deformaci charakteru toku, při čemž mez toku je poměrně nízká a přímo úměrná normálnímu napětí.
- 3/ Při nulovém normálním napětí je mez toku nulová, hmota se chová jako kapalina.
- 4/ Viskozita při toku stoupá s normálním tlakem přibližně lineárně podle rovnice $\eta = A + B\sigma$.
- 5/ Moduly pružnosti ani perioda relaxace se normálním tlakem měřitelně nemění.
- 6/ K porušení dochází při smykovém napětí, rovném přibližně 0,8 pevnosti, naměřené za stejných podmínek na krabicovém smykači. Obdobný jev byl pozorován při dlouhodobém namáhání zemin v tlaku (1) nebo ve smyku (10).
- 7/ Rovnice, popisující závislost deformace na čase při konstantním, smykovém i normálním napětí, má tvar

$$\gamma = \tau \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\eta} \cdot t} \right) \right] + \frac{\tau - K\sigma}{A + B\sigma} \cdot t,$$

kde konstanty mají následující hodnoty:

Symbol	Konstanta	Rozměr	Hodnota	
			přir. vz.	umělý vz.
G_1	modul pružnosti okamž.	kp/cm ²	125	35
		dyn/cm ²	1,23.10 ⁸	3,46.10 ⁷
G_2	modul pružnosti kelvin.	kp/cm ²	125	35
		dyn/cm ²	1,23.10 ⁸	3,46.10 ⁷
η_2	viskozita dopružování	poise	1,3.10 ¹²	3,8.10 ¹¹
K	konstanta úměrnosti meze toku	1	8,75.10 ⁻²	6,25.10 ⁻²
A	viskozita při nulovém σ	poise	1,1.10 ¹³	8,5.10 ¹²
B	konstanta úměrnosti viskozity	poise.kp/cm ²	6,3.10 ¹²	1,86.10 ¹³
		poise/dyn.cm ²	6,42.10 ⁶	1,9.10 ⁷

Platnost rovnice není obecná, neplatí při malém a velkém smykovém namáhání. Rozsah platnosti je individuální, např. u přirozeného vzorku odpovídala rovnice skutečnosti v rozsahu 0,1 - 0,7 pevnosti, u umělého konsolidovaného při 10 kp/cm² byl rozsah platnosti stejný, u vzorků konsolidovaných při nižších tlacích se zužoval až na 0,3 - 0,6 pevnosti vzorku, konsolidovaného při 1 kp/cm². Obecně je možno říci, že čím je vzorek plastičtější, tím je užší rozsah platnosti rovnice.

Ve zvláštních případech, když určité členy rovnice jsou proti ostatním zanedbatelné, je možno ji zjednodušit jejich vynecháním.

Při krátkodobých měřeních je zanedbatelný poslední člen a rovnice má tvar

$$\gamma = \tau / G_1 + \frac{1}{G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t}) /$$

při měření, trvajícím jen několik vteřin je možno dále zjednodušit až na tvar

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1}$$

tedy Hookovu rovnici.

Naopak při dlouhodobých měřeních a vyšším smykovém napětí naroste poslední člen rovnice natolik, že první je možno zanedbat a platí upravená Binghamova rovnice

$$\gamma = \frac{\tau - K\sigma}{A + B\sigma} \cdot t$$

K ověření, zda uvedená zjištění platí i při dlouhodobém zatížení, byl vzorek kaoliniticko-illitického jílu zatížen smykovou silou 0,05 kp/cm² při nulovém normálním zatížení po dobu 720 hodin. Grafem průběhu deformace byla čára, jejíž průběh již po 10 hodinách bylo možno pokládat za přímkový, rychlost deformace odpovídala viskozitě 1,5.10¹⁴ poise, jejíž hodnota byla dokonale neproměnná. I u takto odlišného vzorku poměrně málo namáhaného se tedy projevil ustálený tok.

Z á v ě r

U jílu, namáhaných ve smyku se již hluboko pod mezí pevnosti projevují trvalé deformace, jíl se chová jako pružnovazká kapalina s viskozitou řádu 10¹²-10¹¹ poise. Při normálním zatížení se objevuje mez toku a viskozita roste

při nulovém normálním tlaku je viskozita minimální, mez toku je nulová.

Se stoupajícím smykovým napětím viskozita klesá, při poklesu na hodnotu řádu 10^{10} poise dochází k porušení. Doba, ve které dojde k porušení, je závislá na mnoha faktorech a v této práci nebyl pro ni nalezen jednoznačný vztah.

Praktický dosah tohoto zjištění je značný, protože vrstva zeminy o viskozitě 10^{14} poise a tloušťce 1 m se při smykovém napětí 1 kp/cm^2 deformuje rychlostí 0,035 mm/hod., tedy 0,31 m/rok. Při výpočtech svahů a zejména hrází je nutno s takovou deformací počítat, protože může podstatně změnit rozložení napětí v díle.

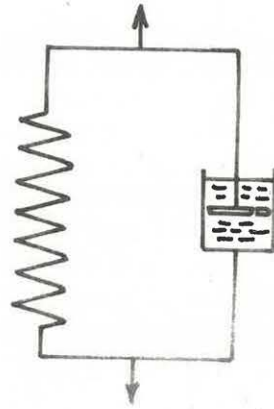
Vzhledem k tomu, že běžná a normovaná laboratorní metodika nedává dostatečný obraz o rheologickém chování zemin, bude nutno ji doplnit o speciální rheologické zkoušky, aby výpočty mohly být prováděny na skutečně exaktním podkladě.

L i t e r a t u r a

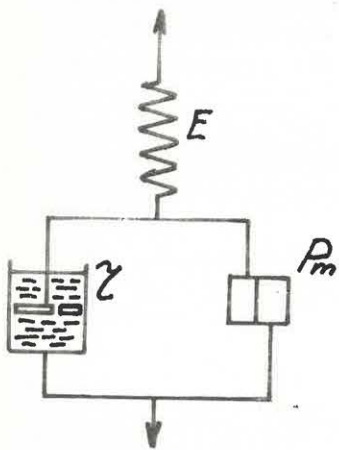
- 1/ Bishop A.W.: Géotechnique 16 (2), 91 (1966)
- 2/ Bouček B.: Zpráva ÚTAM 1961 - Praha
- 3/ Grawford C.B.: Géotechnique 13, (2), 132 (1963)
- 4/ Gouze E.C.W.A. - Tan T.K.: Proc. 2nd Congr. on Rheology (1953) - London 1954
- 5/ Gorkova I.M.: Koll. Ž. 11 (2), 63 (1949)
- 6/ Gorkova I.M.: Teoretičeskije osnovy ocenki osadočnych porod v inženěrnno - geologičeskich čeljach, Moskva 1966
- 7/ Istomina V.S.: Koll. Ž. 12 (4), 279 (1950)
- 8/ Konta J.: Jíllové minerály Československa - Praha 1957
- 9/ Marschall C.E.: The Physical Chemistry and Mineralogy of Soils - vol. 1, New York 1964
- 10/ Mesčjan S.R.: D.A.N. Armjanskij SSR 32, 31 (1961)
- 11/ Norton F.H.: Ceramic Fabrication Processes, New York 1958
- 12/ Persoz M.: Introduction á l'étude de la rhéologie Praha 1960
- 13/ Rebinděr P.A.: Fíziko-chimičeskaja mechanika - novaja oblast' znanija - Moskva 1958
- 14/ Reiner M.: Twelve Lectures on Theoretical Rheology - Amsterdam 1949
- 15/ Reiner M.: Deformation, Strain and Flow (ruský překlad) - Moskva 1963



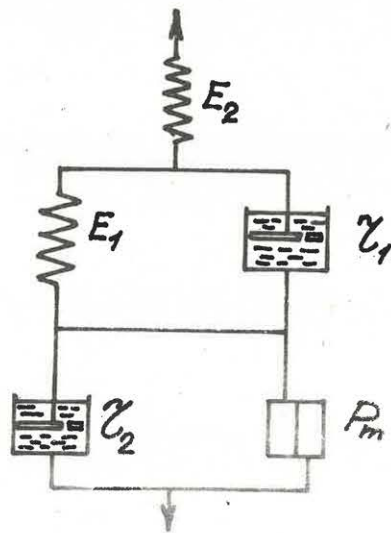
Obr. 1 - schema
Maxwellovy hmoty



Obr. 2 - schema
Kelvinovy hmoty



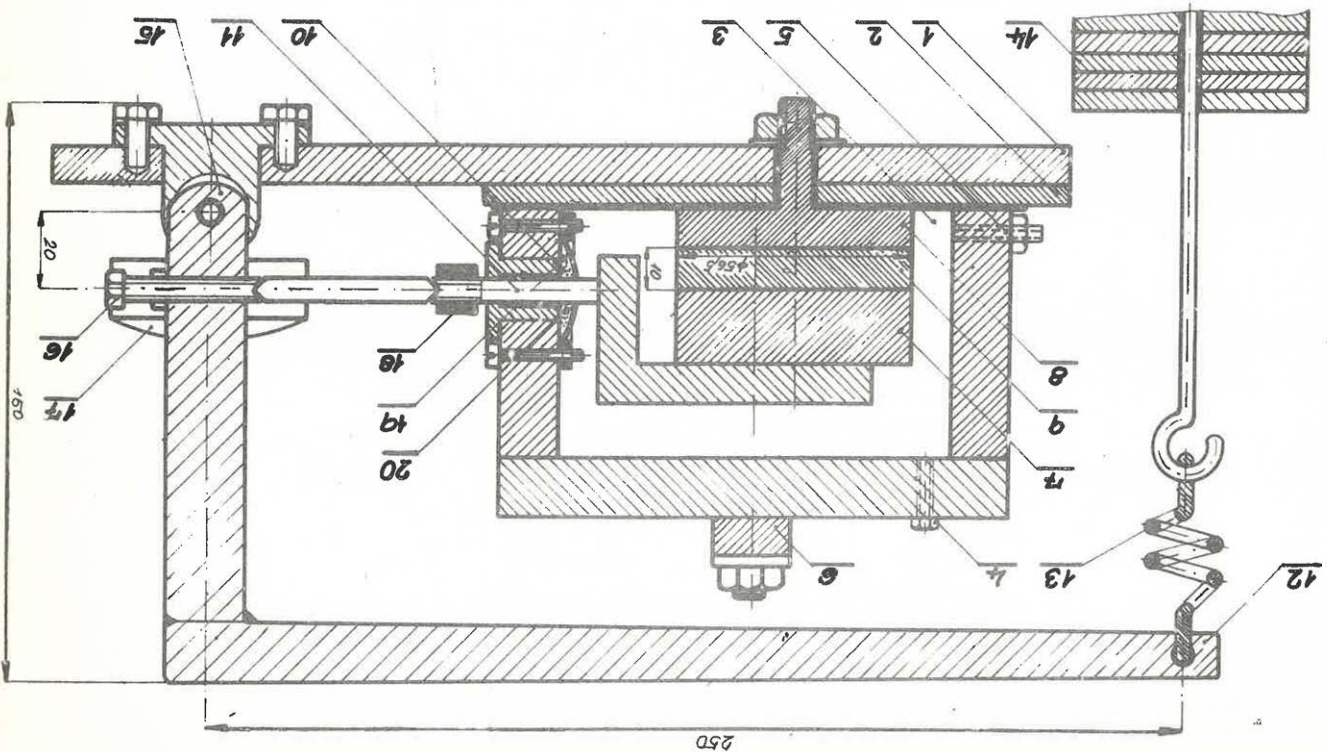
Obr. 3 - schema
Binghamovy hmoty

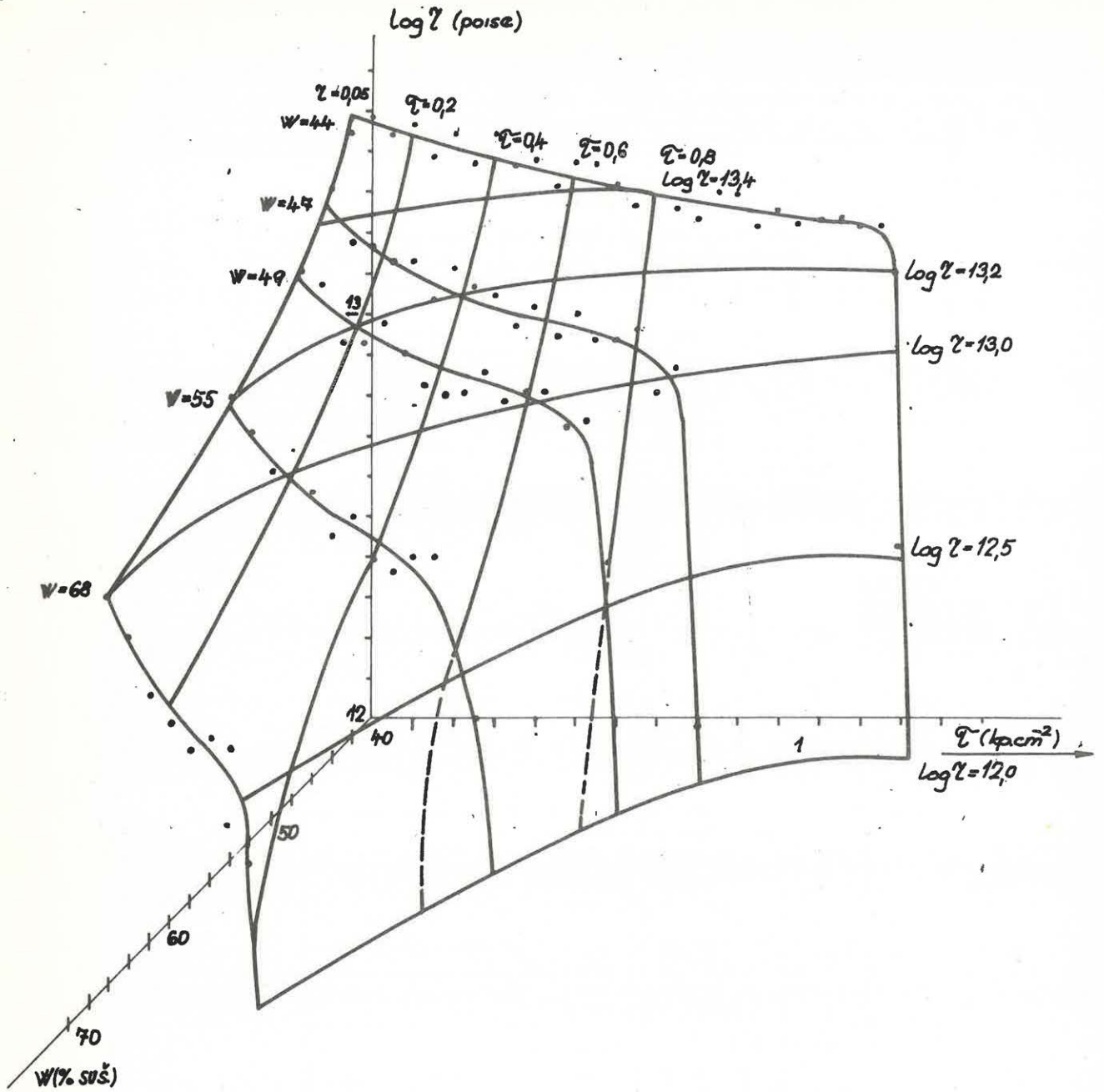


Obr. 4 - schema Schofield
Scott - Blairovy hmoty

Obr. 5 - řez rheologickým smykačem

1	základová deska
2	umaplex. vložka
3	tlaková komora
4	odvzdušňovací sroub
5	nátrubek
6	přiločný třmen
7	horní calist
8	dolní calist
9	vzorok
10	průchodka
11	tyčka
12	zátěžovací rameno
13	pružina
14	závazí
15	kloub
16	stavací sroub
17	úchytkoměr
18	průsečí raménko
19	pryžová folie
20	lůžnici vassling

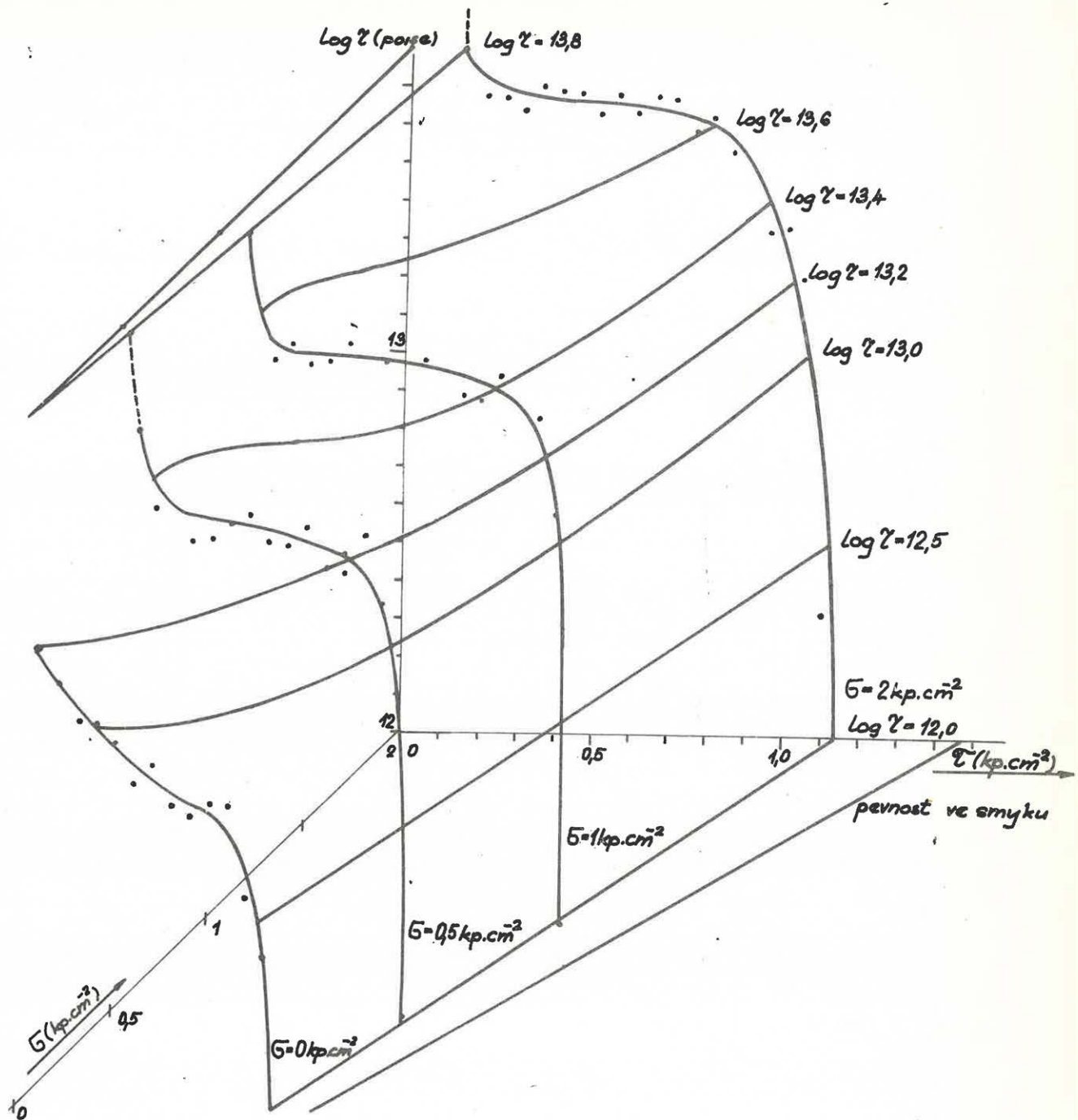




Závislost viskosity na smykovém napětí a vlhkosti vzorku

Bentonit Braňany

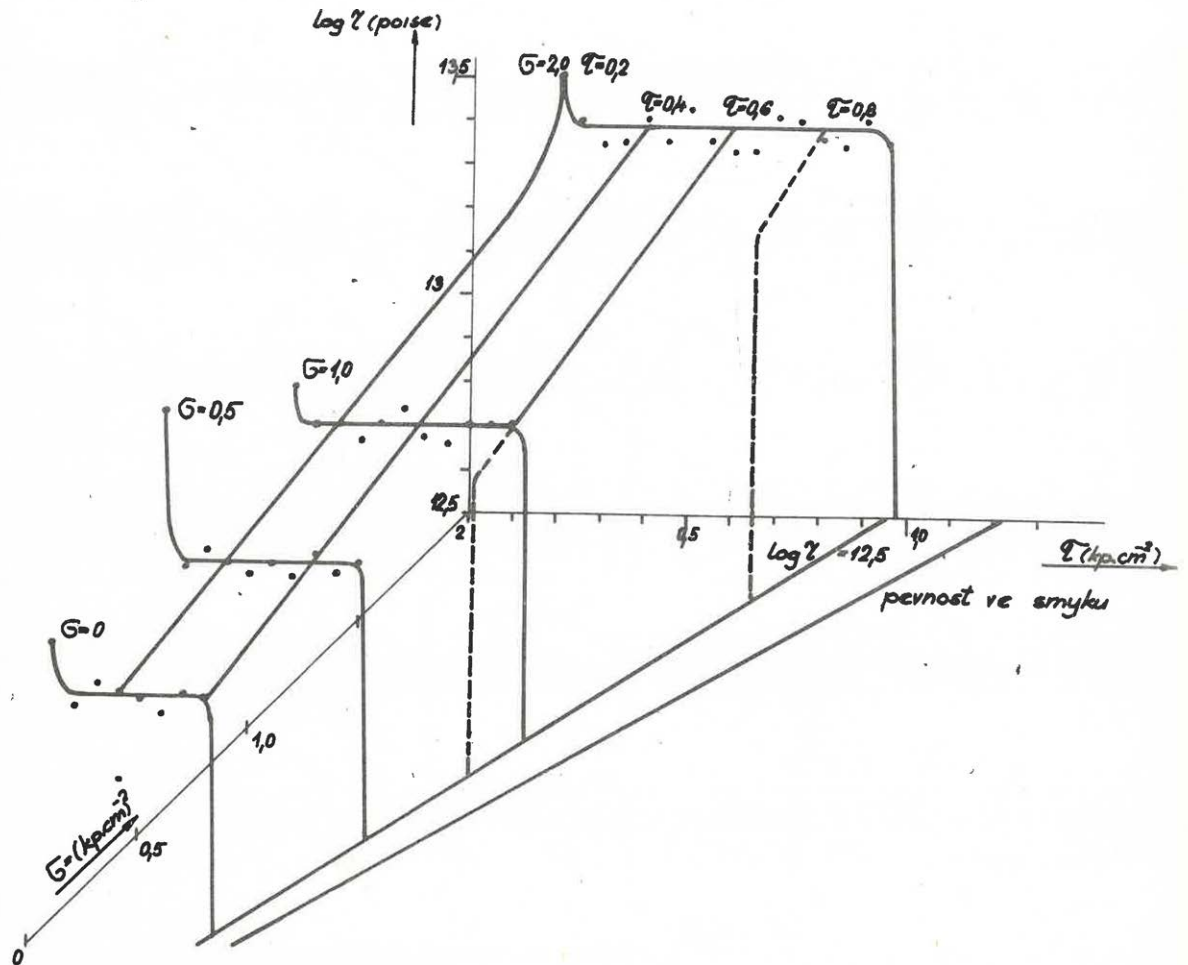
Dbr. 6



Žávislost viskosity na normálném a smykovém napětí

Bentonit Braňany konsolidován silou 2 kp.cm^{-2}

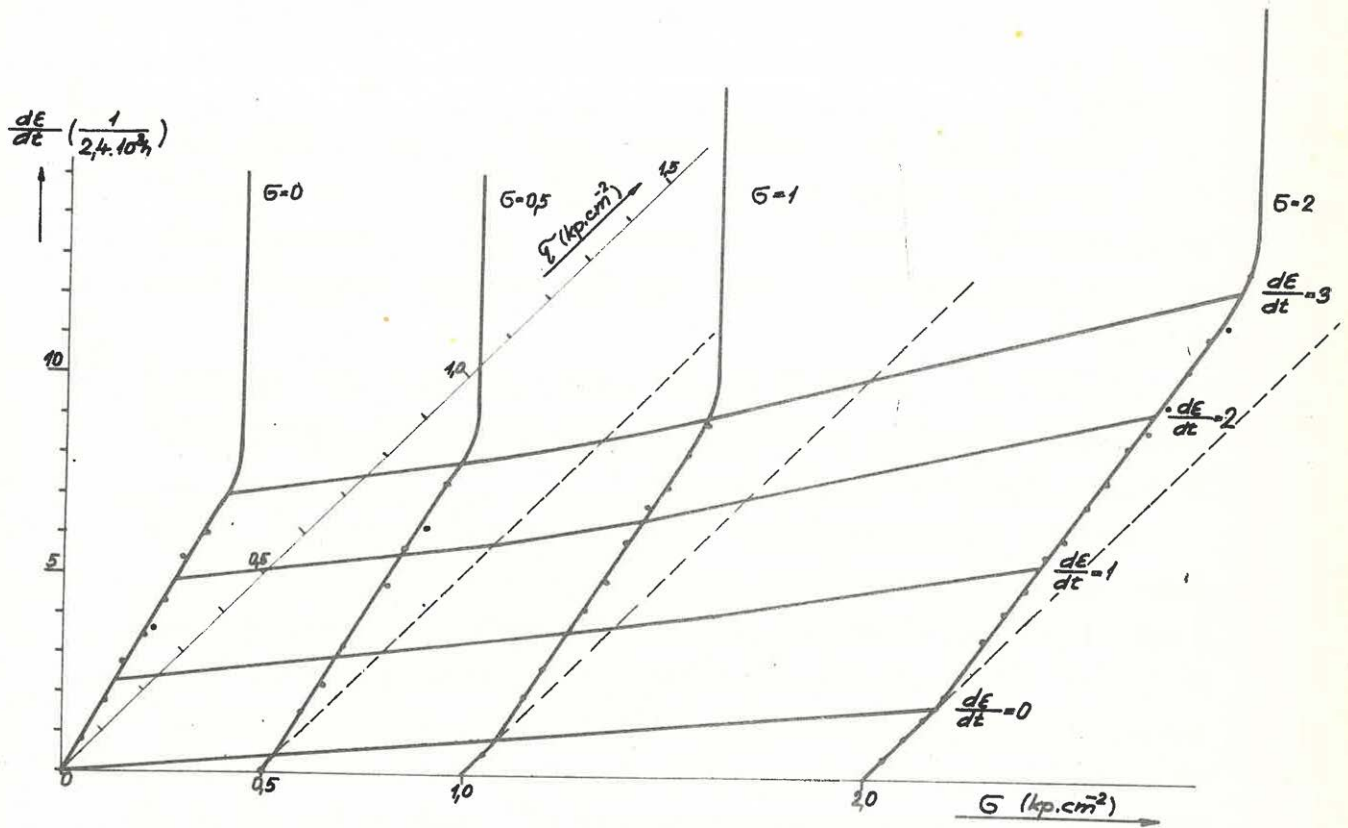
Obr. 7



Žávislost viskozity na normálním a smykovém napětí

Přirozený vzorek

Obr. 8



Závislost rychlosti tečení na smykovém napětí při různém normálním napětí

Přirozený vzorek

Obr. 9