

DP 2918

**Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky**



Diplomová práce

Pórovitost a propustnost modelu jílovité výsypky

Martina Karpíšková

vedoucí práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha, 2009

Poděkování

Chtěla bych poděkovat všem, kteří pomohli vzniku této diplomové práce. Především děkuji Ing. Janu Boháčovi za konzultace a vedení. Dále bych chtěla poděkovat Janu Najserovi za rady a podporu během psaní práce. Diplomová práce vznikla za podpory grantu GAUK 74007

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá pórovitostí materiálu severočeských výsypek, která byla analyzována v laboratoři měření propustnosti v triaxiální komoře a v oedometru. Zemina pro přípravu vzorků byla odebrána z výsypky Pokrok. Byl připraven granulovaný jíl vysušením a podrcením zeminy. Z tohoto materiálu byl připraven jíl požadované zrnitosti, jenž byl konsolidován v centrifuze. Z takto konsolidovaného jílu se připravily vzorky pro měření propustnosti v triaxiální komoře a v oedometru. Ze závislosti součinitele propustnosti na efektivním vertikálním napětí se usuzuje na změny pórovitosti a rozsah tzv. průvzdušné zóny ve výsypce. Experimenty ukazují změnu propustnosti cca mezi 12,5 až 25 m.

Abstract

This diploma thesis is focused on the porosity of the North-Bohemian coal clayey landfills. It was analyzed by laboratory measurement of the permeability with constant hydraulic gradient in the triaxial apparatus, and in the oedometer. The soil for the laboratory tests was taken from Pokrok landfill. The soil was air dried and crushed and sieved to represent the grading of the in situ landfill. The resulting granulated clay was then consolidated in a centrifuge. The specimens for measurements of permeability were prepared from the consolidated clay. The development of hydraulic conductivity and coefficient of consolidation with vertical effective stress was used to look at changes in landfill porosity. Despite the scatter in the measurements it is concluded that macrovoids close at the prototype depths of 12,5 to 25 metres.

Obsah

1. Úvod.....	4
2. Výsypky.....	5
2.1. Materiál výsypek.....	6
2.2. Prostorová heterogenita výsypky.....	7
2.3. Dva typy pórovitosti výsypky.....	10
2.4. Strukturní mechanismy přetváření výsypek.....	11
3. Fyzikální modelování.....	13
3.1. Typy centrifug.....	14
3.2. Principy modelování v centrifuze.....	14
3.3. Měřítkové zákony.....	16
4. Zkoušená zemina.....	19
4.1. Místo odběru.....	19
4.2. Příprava materiálu.....	20
4.3. Příprava vzorku.....	22
4.3.1. Popis centrifugy.....	22
4.3.2. Příprava vzorků pro měření propustnosti.....	23
5. Výsledky.....	27
5.1. Vyhodnocení zkoušek v oedometru.....	27
5.1.1. Metodika měření.....	27
5.1.2. Výsledky.....	30
5.2. Vyhodnocení zkoušek v triaxiální komoře.....	37
5.2.1. Metodika měření.....	37
5.2.2. Výsledky.....	37
6. Diskuze.....	42
7. Závěry.....	44
8. Literatura.....	45

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi jílu s dvojí pórovitostí, který tvoří materiál severočeských výsypek hnědouhelných lomů. Plocha území tvořeného výsypkami překračuje 100 km² a stále roste v důsledku stále probíhající těžby uhlí. Jsou proto požadavky na inženýrské využití výsypek. Tyto antropogenní útvary mají specifické vlastnosti, které při stavebním využití způsobují velké problémy. Základní vlastností ovlivňující jejich mechanické chování je dvojí pórovitost způsobená existencí makropórů mezi jílovými hroudami, které samy mají svojí vnitřní pórovitost. Dvojí pórovitost má za následek obtížně předvídatelnou propustnost výsypky, která je dána kombinací propustnosti makropórů a vlastních jílových hrud. V důsledku konsolidace výsypky dochází k uzavírání makropórů a mění se režim proudění vody ve výsypce.

Cílem této práce je vyhodnotit pórovitost fyzikálního modelu výsypky. Pórovitost ovlivňuje propustnost výsypky, proto byla analyzována propustnost laboratorními metodami (analýzou oedometrické zkoušky, stanovením propustnosti v triaxiální komoře). Propustnost byla měřena na vzorcích granulovaného jílu, reprezentujících výsypku s redukovanými rozměry. Před vlastním měřením propustnosti byl granulovaný jíl konsolidován při různých vertikálních napětích v centrifuze.

Centrifuga v této práci sloužila pouze jako nástroj pro přípravu vzorků k měření součinitele propustnosti. Cílem laboratorních zkoušek bylo porovnání propustnosti vzorků zkonsolidovaných při různém normálovém napětí. Tyto vzorky představují zmenšený model výsypky v různých hloubkách. Předpokládá se, že v závislosti na hloubce (vertikálním efektivním napětí) se postupně zmenšuje intergranulární pórovitost (uzavírání mezer mezi hroudami). V důsledku toho dochází k významnému snížení celkové propustnosti zeminy. Tento fenomén měly laboratorní zkoušky charakterizovat.

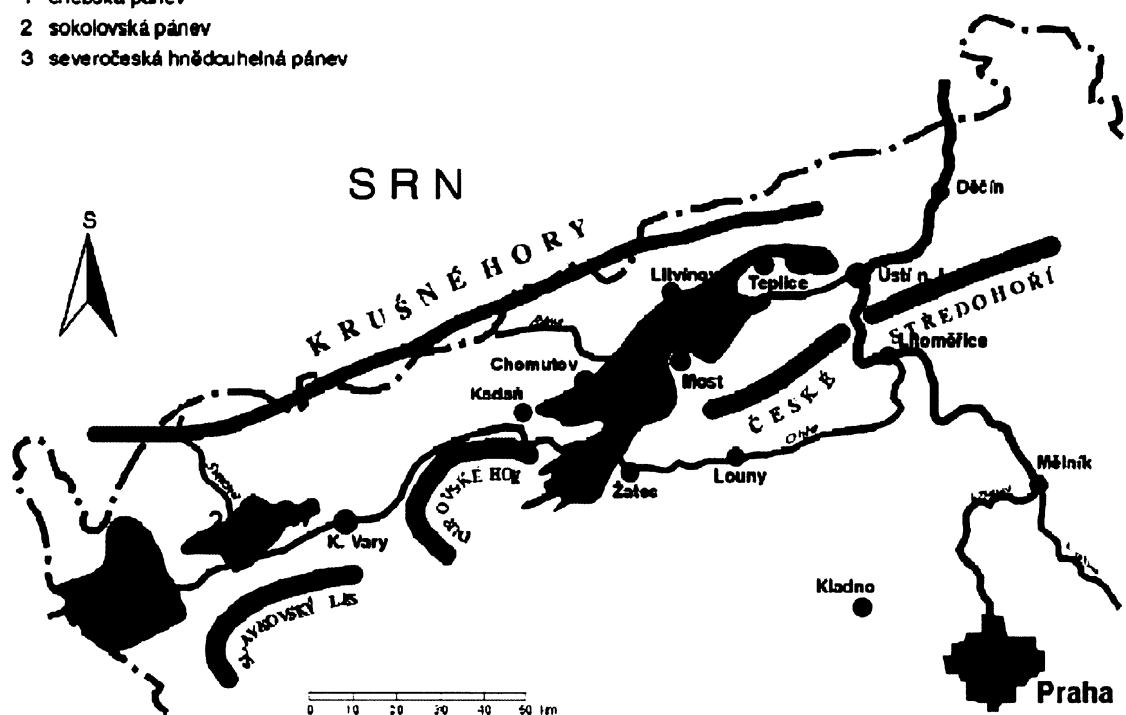
V celé práci se užívá termín „součinitel propustnosti“ pro konstantu Darcyho zákona, tj. pro hydraulickou vodivost. Důvodem je převládající terminologie v geotechnice.

2. Výsypky

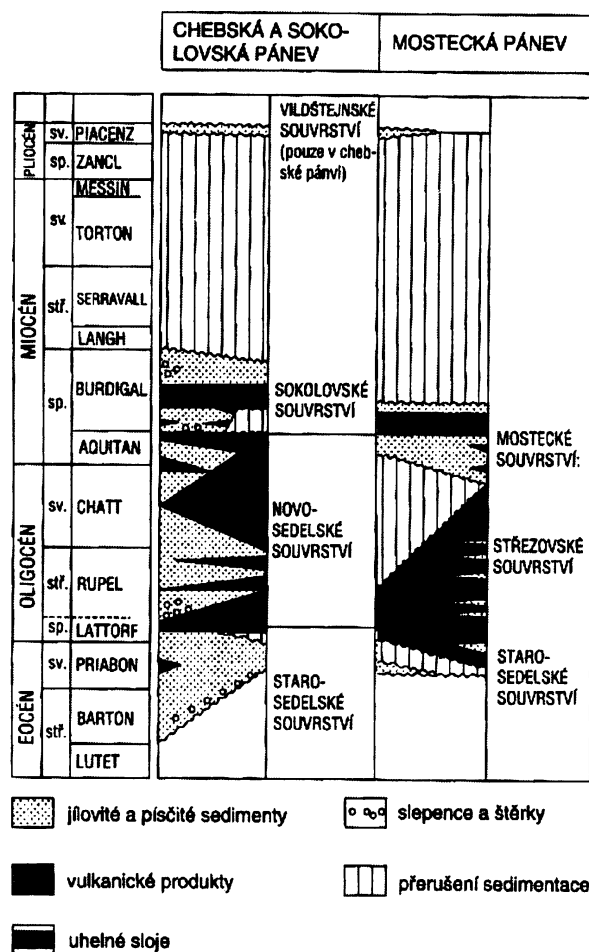
V severních Čechách jsou v podkrušnohorských pánvích uloženy velké zásoby hnědého uhlí. Tyto pánve vznikly v terciéru v důsledku alpínského vrásnění. Mezi podkrušnohorské pánve patří pánev chebská, pánev sokolovská, pánev mostecká obr. 1 a pánev žitavská. Stratigrafický sled chebské, sokolovské a mostecké pánve je uveden na obr. 2. Střídá se ukládání jemnozrnných a písčitých zemin s vložkami hnědouhelných slojí. V nadloží slojí je uložen jílovec převážně miocénního stáří.

Severočeské pánve se formovaly v několika etapách. První sedimentační etapa probíhala v eocénu a odpovídá jí starosedelské souvrství, které má mocnost kolem 40 m a je složené převážně z dobře vyříděných říčních sedimentů. Druhá sedimentační etapa probíhala od oligocénu do spodního miocénu. V té době sedimentoval až 350 m mocný vulkanosedimentární komplex. V sokolovské pánvi k tomuto komplexu patří souvrství sloje Josef. V poslední etapě došlo k usazení kolem 40 m mocného cyprisového souvrství,

- 1 chebská pánev
- 2 sokolovská pánev
- 3 severočeská hnědouhelná pánev



Obr. 1: Situování podkrušnohorských hnědouhelných pánví, Valeš (2003).



Obr. 2: Stratigrafické schéma terciérních pánví v severních Čechách, Chlupáč et al. (2002)

2.1. Materiál výsypek

Výsypka je tvořena cca z 80 % terciérními jíly, písky, štěrky a jejich směsmi. Zbytek tvoří nebilanční uhlí, horniny sutí, proplástky pískovců, sideritů, různé druhy tzv. podsypových materiálů, škvára, porcelanit a také zbytky ze stavebních demolic. Terciérní jíl je především kaolinický a illitický. Velikost fragmentů jílu se pohybuje od několika centimetrů po několik desítek centimetrů.

Doba konsolidace výsypek, kde přetváření způsobuje jen vlastní hmotnost, povětrnostní podmínky a pozvolný rozpad kusovitého materiálu, je velmi dlouhá. Podle geodetických pozorování se uvádí přibližný odhad, že výsypka konsoliduje tolik roků, kolik metrů je mocná.

kteří je složené především z jílovců.

Hnědé uhlí z těchto pánví bylo těženo především povrchovým způsobem. V nadloží slojí hnědého uhlí se ukládal jílový materiál. Ten byl postupně zpevněn až na charakter poloskalní horniny. Nadložní zemina se před zahájením těžby odstraňuje a ukládá na haldy ve formě jílových hrud, čímž vznikají výsypky. Ty se rozdělují podle místa ukládání materiálu na výsypky vnější a výsypky vnitřní. Typická výška vnějších výsypek se pohybuje mezi 30 a 50 m, u vnitřních výsypek bývá vyšší, aby došlo k zasypání těžební jámy.

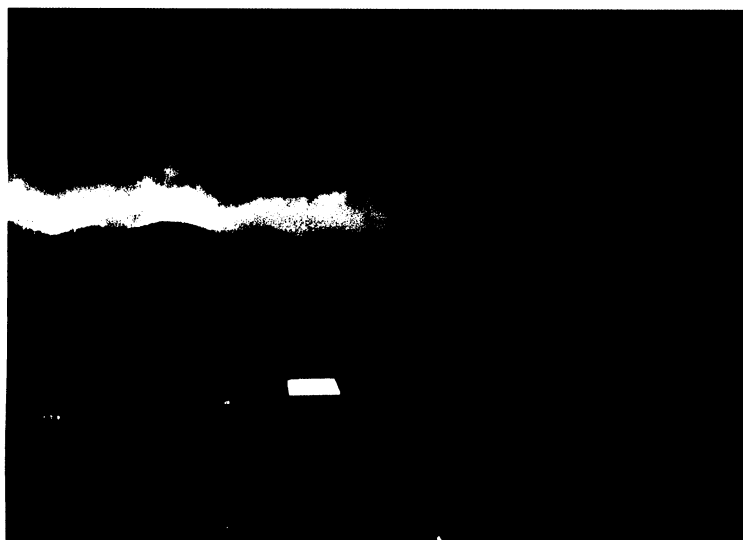


Obr. 3: Na obrázku je zachyceno ukládání materiálu na výsypku Pokrok. Jedná se o satelitní snímek z www.mapy.cz (2009).

Podle Konečného (1999) existuje podstatný rozdíl geotechnických poměrů mezi výsypkou vnější a vnitřní, pokud je jí již vyplněn uhelný lom. U obou typů výsypek se na povrchu po určité době vytvoří zpevněná krusta v důsledku antropogenních vlivů – rekultivační práce; i přirozených vlivů – mráz, vysychání. Mocnost krusty se pohybuje od 1 do 3 metrů. Únosnost krusty s hloubkou prudce klesá, až dosáhne relativního minima. U vnější výsypky se podle Konečného (1999) projevoval nárůst „ulehlosti“ s hloubkou (se značným rozptylem). U vnitřní výsypky, již opuštěného a zasypaného lomu, docházelo po provrtání povrchové krusty k samovolnému propadu vrtného nářadí, protože pod touto krustou se nacházela jen kašovitá zemní hmota, která se samovolně vytlačela až na povrch. Zatímco u vnější výsypky únosnost s rostoucí hloubkou dále dle zákon geostatiky narůstá, u vnitřní výsypky zpravidla nenarůstá a někdy ještě naopak klesá.

2.2 Prostorová heterogenita výsypky

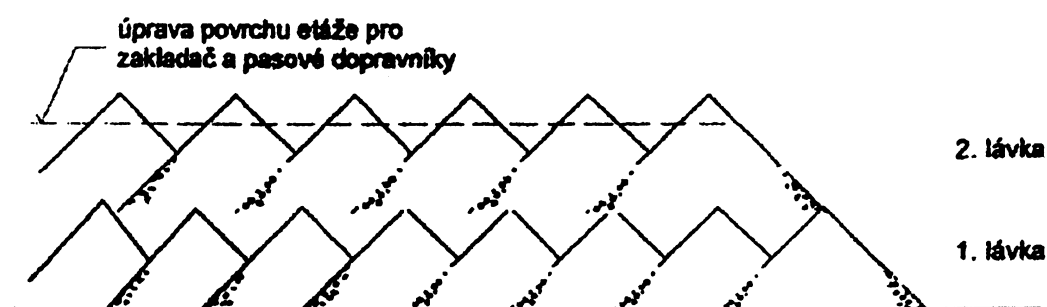
Na vlastnosti výsypek má také vliv způsob sypání jílových hrud (obr. 3). Ukládání na lánce je pak ve formě překrývajících se tzv. hřebenů (obr. 5). Na obr. 4 je fotografie z výsypky Pokrok.



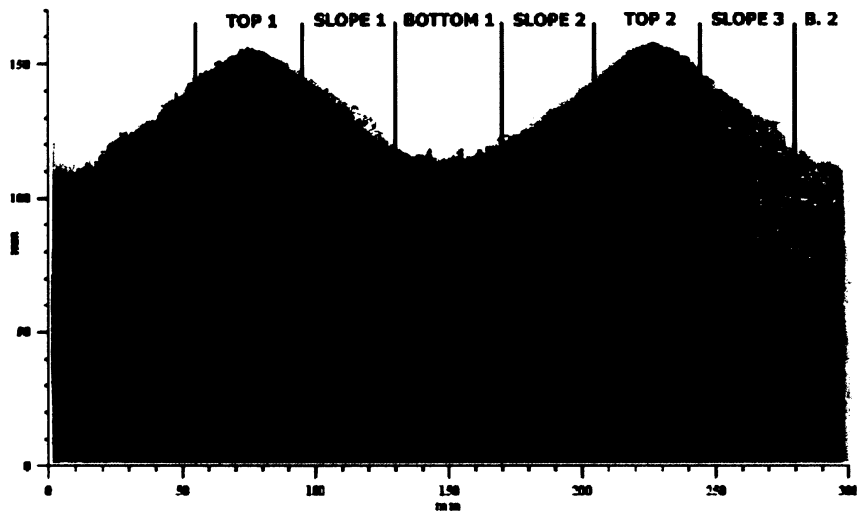
Obr. 4: Vzájemně se překrývající hřebeny výsyvky Pokrok (fotografie z června 2007)

Během sypání dochází k částečnému roztřídění zeminy podle zrnitosti. Najser (2009) v laboratorních podmínkách demonstruje vliv segregace jílových hrud. Na fotografii zmenšeného modelu výsyvky (obr. 6) je patrné roztřídění částic na jemnější a hrubší zrnitostní frakci. Hrubší frakce se usazuje u paty svahu, na

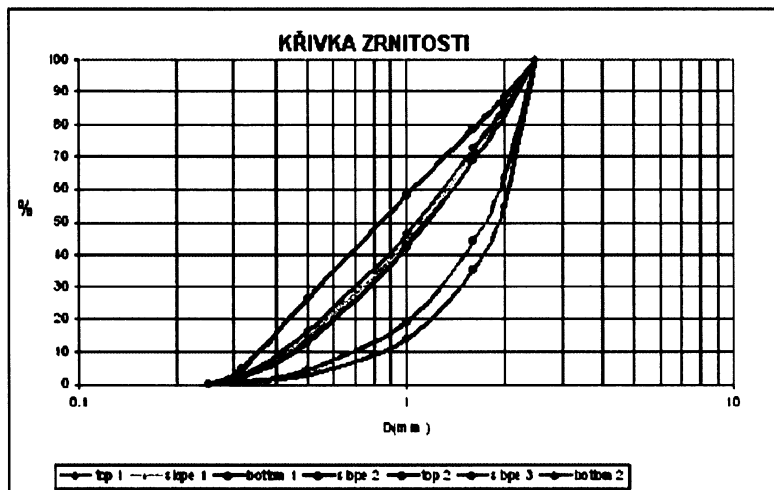
vrcholu násypových kuželů je zemina jemnozrnější. Na obr. 7 jsou křivky zrnitosti pro část pod vrcholem, pod patou a na svahu nasypaného kužele. Způsob ukládání materiálu na výsyvky je v terénu složitější, přesto k segregaci jílových hrud podle velikosti dochází.



Obr. 5: Řez hřebeny výsypkových lávek sypaných zakladačem (Herštus, 2003)



Obr. 6: Model výsypky (Najser, 2009)



Obr. 7: Křivky zrnitosti pro části výsypky označené na obr. 6 (Najser, 2009)

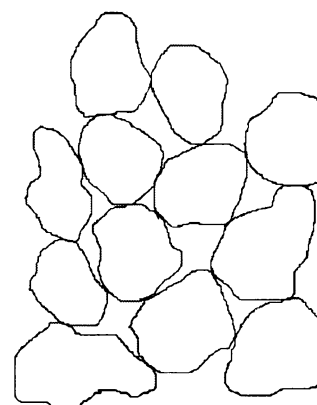
Výsypky jsou tedy heterogenní tělesa. Na jejich nesterodnost má vliv několik faktorů, ke kterým patří způsob ukládání. Dalšími faktory je struktura těžené horniny, která je již sama heterogenní, vliv nesterodného rozvolnění během těžby, nebo konsolidace vlastní tíhou i atmosférické vlivy. Výsledkem je pak nehomogenní těleso, jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru.

2.3. Dva typy pórovitosti výsypky

Pro popis chování výsypkového materiálu, je třeba uvažovat dvojí pórovitost. Dvojí pórovitost je nejdůležitějším rysem, ovlivňujícím mechanické chování výsypku. Celkovou pórovitost je možné rozdělit na pórovitost původního materiálu, který tvoří hroudy, a pórovitost mezi těmito hroudami. Kompaktní jíl má pórovitost v rozmezí od 20 do 40 %. Ta je označována jako intragranulární. Mezi jednotlivými hroudami jsou mezery tvořící intergranulární pórovitost (makropóry).

Na obr. 8 je zjednodušeně ukázána struktura materiálu tvořícího výsypku.

jílové hrudky + mezery



Obr. 8: Schematizovaný materiál s dvojí pórovitostí

Celková pórovitost je dána vztahem (Fedá, 1998):

$$n_t = n_i (1 - n_e) + n_e \quad (2.1)$$

n_i ... pórovitost intragranulární

n_e ... pórovitost intergranulární

popř.

$$e_t = e_i (1 + e_e) + e_e \quad (2.2)$$

e_i ... číslo pórovitosti intragranulární

e_e ... číslo pórovitosti intergranulární

Podle Herštuse (1999) lze těleso výsypky rozdělit na dvě základní zóny.

- zóna se zachováním spojitě mezerovitosti sypaniny – průvzdušná zóna
- zóna bez spojitě mezerovitosti.

Průvzdušnost zjišťoval v hloubkách po 2 m krocích. Na výsypce Merkur se hloubka, kde je již těleso neprůvzdušné, pohybovala od 16 do 22 metrů. Na Libouši pak od 10 do 22 metrů a na lokalitě Stodola od 8 do 12 metrů. V průvzdušné zóně se ale mohou vyskytovat lokální neprůvzdušné mezipolohy. Naopak v hlubší neprůvzdušné poloze se lokálně vyskytují čocky průvzdušného materiálu.

V téže práci je popsána zkouška propustnosti v triaxiální komoře na neporušeném vzorku odebraném z výsypky Libouš. Autor takto zjistil, že se zemina stává téměř neprůvzdušnou při napětí odpovídajícím hloubce 24 m. V tabulce 1 jsou pak uvedeny součinitele propustnosti pro některé výsypky (Herštus, 1999).

lokalita	součinitel propustnosti	
	průvzdušná	neprůvzdušná
Merkur - Letiště	$6 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-9}$
Libouš 3. oblast	$8 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-9}$
Libouš - Stodola	$3 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$

Tab. 1: Součinitel propustnosti k pro průvzdušnou a neprůvzdušnou zónu podle Herštuse (1999)

2.4. Strukturní mechanismy přetváření výsypek

Feda (1998) uvádí následující mechanismy pro přechod zeminy s dvojitou pórovitostí z chování typického pro sypké zeminy k chování typickému pro plastické zeminy:

1) Drcení hroud

K drcení jílových hroud dochází častěji při vyšší vlhkosti, kdy je pevnost obecně nižší vlivem nižšího sání. U suchých hroud je k drcení nutné působení vyššího napětí na kontaktech hroud

2) Duktilní přetváření hroud

Hroudy jsou deformovány duktilní deformací a dochází tak k postupnému

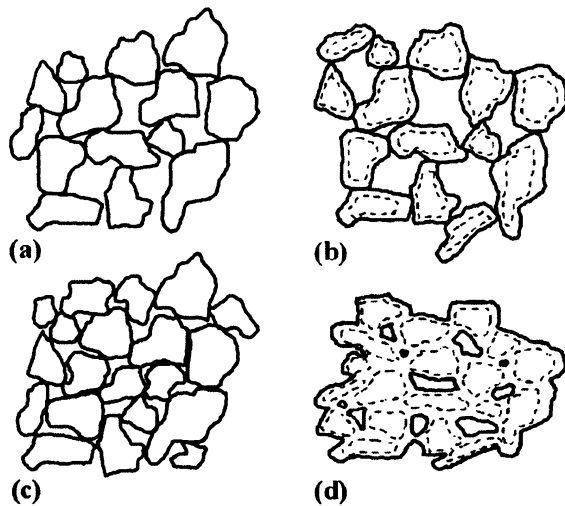
uzavírání makropórů. Tento typ deformace je typický pro vlhký jíl.

3) Přeskupení hrud

Procesem posouvání a rotace hrud jílu dochází k přeuspořádání hrud a snižování intergranulární pórovitosti.

4) Vliv kontaktních sil

Na kontaktech hrud vlhkého jílu působí sání, které zabraňuje přeskupování hrud. Až do porušení kontaktních sil způsobuje tento mechanismus vyšší intergranulární pórovitost než by odpovídala struktuře suchých hrud.



Obr. 9: Změna struktury výsyvky při konsolidaci (Najser et al, 2009b)

Tyto strukturní mechanismy dokumentovali i Najser et al. (2009b) na základě modelování konsolidace vodou nasyceného výsyvkového jílu v centrifuze (obr. 9). Obr. 9a charakterizuje čerstvě nasýpanou výsyvku suchých hrud. Obr. 9b ukazuje vyšší mezerovitost výsyvky tvořené hroudami s vyšší vlhkostí (důsledek vlivu kontaktních sil). Změnu struktury zaznamenanou během konsolidace suchých hrud ukazuje obr. 9c, kde se projevil vliv přeskupování hrud a částečného drcení. Při konsolidaci hrud s vyšší vlhkostí (obr. 9d) se projevuje duktilní přetváření hrud.

Změna struktury výsyvky může proběhnout formou kolapsu. Ten je definován jako změna mechanických vlastností způsobená náhlým přechodem z jedné strukturní konfigurace do jiné (Feda, 1998). Kolaps se nejčastěji vyskytuje v zeminách s vysokou pórovitostí. Pro výsyvky je typický kolaps způsobený jejím provlhčením (například v důsledku nárůstu hladiny podzemní vody). Tento jev byl mnohokrát dokumentován in situ, viz například Charles (2009).

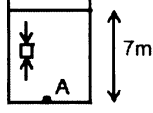
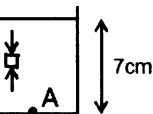
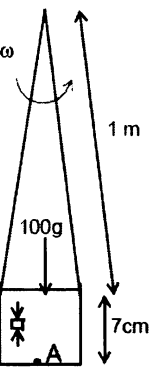
3. Fyzikální modelování

Fyzikální modelování geotechnických problémů lze rozdělit na několik různých kategorií. Prvním z nich je vytvoření modelu, který je v poměru s prototypem v měřítku 1:1. Vzhledem ke shodným rozměrům, se využije v obvyklém případě stejné zeminy a stejný průběh napětí, stačí sledovat vývoj zvolených charakteristik modelu (např. deformace, pórové tlaky) pro získání potřebných informací o modelovaném problému. Nevýhodou je, že informace získáme často až za poměrně dlouhou dobu a že příprava modelu je značně prostorově, technologicky a logisticky náročná. Z těchto důvodů nepřipadá u řady geotechnických aplikací tento způsob modelování v úvahu.

Pro odstranění uvedených nevýhod je obvykle nezbytné přistoupit ke studiu zmenšených modelů. To je často spojené s použitím alternativních materiálů namísto původní zeminy

a jiných metod instrumentace modelů.

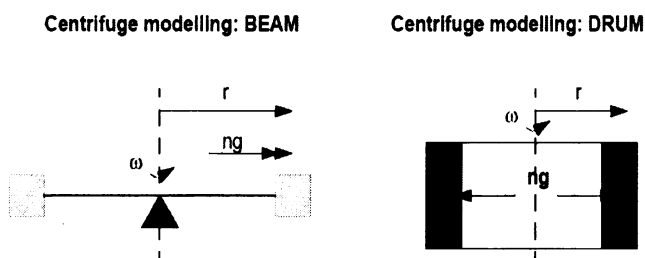
Zmenšený model můžeme zkoumat v normálním gravitačním poli Země (1g modely) nebo v poli uměle zvýšeného gravitačního zrychlení $n.g$ (n tvoří násobek zemské gravitace). V druhém případě pro vytvoření takového pole použijeme centrifugu, kde je vyvinuto vlivem rotace modelu odstředivé zrychlení. Přehled popsanych metod spolu s jejich výhodami a nevýhodami shrnuje tabulka 2.

TYP	NÁČRTEK	σ_v na A [kPa]	VÝHODY	NEVÝHODY
1g 1:1		100 – 140	<ul style="list-style-type: none"> ◦ správné napětí ◦ lze kontrolovat podmínky 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ dlouhý čas k zhotovení ◦ okrajový efekt ◦ cena
1g 1:n		1	<ul style="list-style-type: none"> ◦ čas (velmi rychlý) ◦ cena (velmi levná) ◦ zkouška ke kontrole přístrojů a principů 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ nesprávné rozložení napětí ◦ hraniční efekty
$n.g$ 1:n		100 – 140	<ul style="list-style-type: none"> ◦ správné rozložení napětí ◦ idealizace k nalezení mechanických vlastností ◦ možnost modelovat skutečnou historii napětí ◦ kontrola přítěžování ◦ cena ◦ čas 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ změna gravitačního pole v horizontální rovině u modelu v ramenné centr. ◦ $n.g$ proměnné s hloubkou ◦ coriolisova síla ◦ velikost částic ◦ hraniční efekt ◦ dráha napětí může být rozdílná

Tab. 2: Fyzikální modelování. (Springman, 2005)

3.1. Typy centrifug

Běžně se používají dva typy centrifug. Jedná se o centrifugy bubnové a ramenové.



Obr. 10: Typy centrifug. Vlevo je centrifuga ramenová a vpravo bubnová centrifuga (Springman, 2005)

Ramenové centrifugy mají rameno připevněné k centrální hřídeli. Na konci hřídele je umístěn kontejner s modelem, který je před zahájením zkoušky vlivem zemské gravitace svěšen. Když dojde k roztočení centrifugy a na

model začne působit odstředivé zrychlení, otočí se kontejner o 90° .

Bubnové centrifugy mají tvar rotačního válce otáčejícího se kolem vertikální středové osy (jedná se o princip podobný pračce).

Oba dva typy centrifug mají své klady a své zápory. Model se obvykle lépe připravuje v centrifuze ramenové, protože je možné jej vytvořit ve svislé poloze. Válec bubnové centrifugy svou polohu nemění, model se proto konstruuje otočený o úhel 90° , což může způsobovat značné komplikace (například obtížné zajištění stability modelu). Nevýhodou ramenové centrifugy je chyba při centrifugaci, kdy plochy o stejném gravitačním zrychlení nejsou rovnoběžné s povrchem modelu (horizontální povrch modelu reprezentuje mírně zakřivený povrch v terénu. U centrifugy bubnové tento problém nevzniká, model o konstantní výšce, umístěný na celé ploše rotačního válce, je zakřivený (všechny body na jeho povrchu jsou stejně vzdálené od osy rotace a mají stejnou hodnotu gravitačního zrychlení) a reprezentuje tak rovný povrch prototypu. Zjednodušená schémata obou typů centrifug ukazuje obr. 10.

3.2. Principy modelování v centrifuze

K dosažení podmínek srovnatelných s podmínkami v terénu se při modelování v centrifuze využívá odstředivé zrychlení. Pro model je odstředivé zrychlení několikanásobně vyšší než gravitační zrychlení pro prototyp v tíhovém poli Země. Fyzikální podstata zrychlení působí v obou případech stejně, v centrifuze však v "n"-násobně větší intenzitě ("n" značí násobek gravitačního zrychlení Země).

Potenciály gravitačního pole v centrifuze není ale možné, na rozdíl od gravitačního pole

Země, zjednoduší na rovnoběžné roviny. Tyto potenciály mají tvar soustředných válcových ploch. To je důvod, proč u ramenových centrifug má dno modelu (stejně jako jakákoli plocha rovnoběžná s dnem modelu, např. povrch) v každém bodě jiné odstředivé zrychlení.

Další nepřesností je chyba způsobená měnícím se odstředivým zrychlením s hloubkou. Zatímco gravitační zrychlení g u zemského povrchu se dá považovat za konstantní, odstředivé zrychlení a v centrifuze je proměnné (závislé na rychlosti otáčení):

$$a = r \cdot \omega^2 \quad (3.1)$$

(ω ... úhlová rychlost; r ... vzdálenost od osy otáčení)

Pro minimalizování chyby musí být hodnota násobku gravitačního zrychlení (n.g) vypočítaná vždy v jedné třetině hloubky modelu. Vzdálenost třetiny hloubky modelu od osy rotace je nazývána efektivním poloměrem r_{ef} (obr. 10). Hodnota n.g je pak používána k vyhodnocení zkoušky.

$$r_{ef} = r_{povrchu} - \frac{h}{3} \quad (3.2)$$

Odvození tohoto vztahu uvádí například (Taylor, 1995). Rovnice pro výpočet vertikálního efektivního napětí v závislosti na hloubce v modelu σ_{vm} uvádí rovnice 3.3. Rovnice 3.4 ukazuje idealizaci vedoucí k lineární závislosti průběhu napětí s hloubkou.

$$\sigma_{vm} = \rho \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot (r^2 - r_{tm}^2) \quad (3.3)$$

(ω ... úhlová rychlost; ρ ... hustota zeminy; r ... vzdálenost od osy otáčení pro jakýkoli bod modelu; r_{tm} ... vzdálenost povrchu modelu od osy otáčení)

$$\sigma_{vp} = \rho \cdot g \cdot (n \cdot z) \quad (3.4)$$

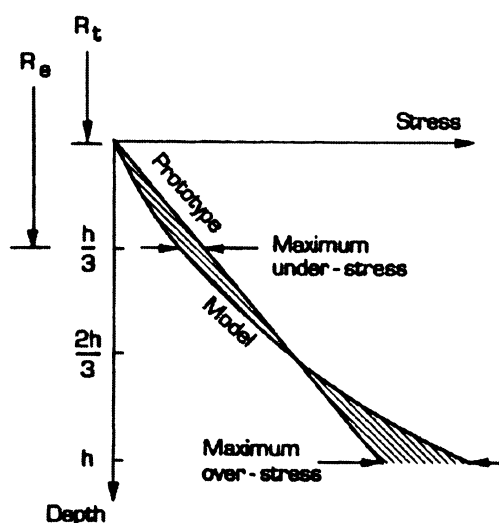
(ρ ... hustota zeminy; g ... gravitační zrychlení; n ... poměr odstředivého zrychlení a gravitačního zrychlení pro efektivní poloměr; z ... hloubka vzorku ($= r - r_{tm}$))

Srovnání obou křivek ukazuje obr. 11. Z rovnic vyplývá, že v jedné třetině hloubky modelu je shodný gradient obou křivek. Ve dvou třetinách hloubky je napětí u prototypu a modelu shodné. Vyšrafovaná část v horních dvou třetinách výšky modelu ukazuje podhodnocení napětí u modelu v centrifuze, zatímco ve spodní třetině je napětí přehodnoceno. Umístění efektivního poloměru v 1/3 hloubky vzorku způsobuje, že obě vyšrafované oblasti mají vždy stejnou velikost a celková odchylka od lineárního průběhu je minimální.

Vlastnosti pro prototyp a vzorek jsou ve vztahu, který je závislý právě na rychlosti rotace centrifugy. Cílem je získat stejný průběh vertikálního napětí jako u prototypu. Použijeme-li zeminu o stejné hustotě, pak při zrychlení $a = n \cdot g$ musí být výška modelu v následujícím vztahu k výšce prototypu: $h_{prototyp} = n \cdot h_{model}$. Toto je základní zákon, který platí pro modelování v centrifuze.

3.3. Měřítkové zákony

Měřítkové zákony pro modelování v centrifuze definují vztah mezi modelem a prototypem a jsou důležité pro následné vyhodnocení zkoušky. V kapitole 3.2 jsem uvedla základní vztah pro výpočet výšky modelu ($h_{prototyp} = n \cdot h_{model}$) tak, aby "n"-násobně zmenšený model reprezentoval při "n" násobném zrychlení stejný průběh vertikálního napětí s hloubkou jako prototyp. Pro délku tak platí měřítkový zákon 1/n (poměr parametru mezi modelem a prototypem), pro napětí 1/1. Podobné měřítkové zákony lze odvodit i pro další fyzikální veličiny (jejich detailní odvození uvádí například Taylor (1995)). Nejdůležitější poměrové zákony jsou uvedeny v tabulce 3.



Obr. 11: Efektivní poloměr R_e a průběh napětí s hloubkou u modelu a prototypu (Taylor, 1995).

MĚŘÍTKOVÉ ZÁKONY			
zrychlení		n	m/s ²
délka		1 / n	m
napětí		1	kPa
hustota		1	kg/m ³
hmotnost		1 / n ³	kg
objem		1 / n ³	m ³
síla		1 / n ²	N
čas	difuze	n ²	s
	dynamický	n	s
frekvence		n	1/s

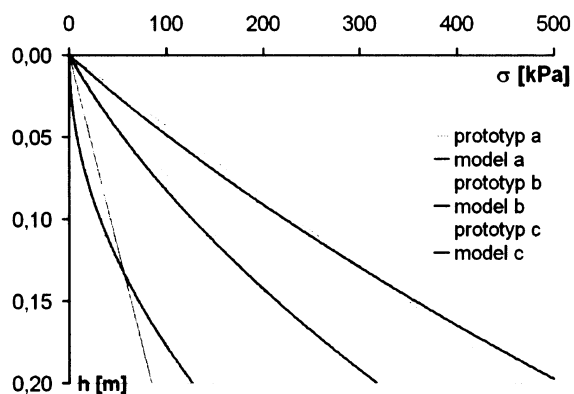
Tab. 3: Měřítkové zákony (Taylor, 1995)

Dalším důležitým jevem modelování v centrifuze je výrazně větší projev

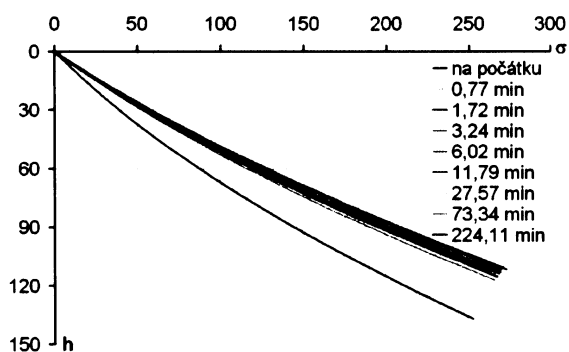
Coriolisovy síly. Jedná se o zdánlivou sílu, která je způsobena pohybem v rotující soustavě souřadnic. Coriolisova síla způsobuje na Zemi to, že se víry točí na severní polokouli proti směru hodinových ručiček a na jižní polokouli po směru hodinových ručiček. Význam bude mít při modelování, kdykoliv bude jakýkoli předmět pouštěn směrem k modelu (například sypání násypů nebo modelování skalních řícení).

Další chybu měření může způsobit hraniční efekt. Ten je způsobený skutečností, že model v centrifuze je vždy omezen stěnami kontejneru (u ramenové centrifugy) nebo bubnu centrifugy. Při instalaci pilířů nebo u penetračních zkoušek, kdy dochází k roztlačování zeminy do stran, dochází vlivem rigidních stěn kontejneru ke změně napjatosti v modelu.

Jiné ovlivnění může být způsobeno velikostí částic. Chceme-li například modelovat písek v poměru 1:100, měli bychom použít i částice takto zmenšené (viz měřítkový zákon pro délku). V tom případě už nepůjde o zrna velikosti písku 2 mm, ale prachová zrna s jiným tvarem a mechanickými vlastnostmi (pevnost, stlačitelnost) než jaký mají zrna písková. V takovém případě je lepší použít zrna písková a dopustit se nepřesnosti způsobené velikostí zrna materiálu.



Obr. 12: Rozdíl ve skutečném napětí v modelu a napětí, které by v modelu bylo, kdyby v celém modelu působilo konstantní odstředivé zrychlení.



Obr. 13: Ukázka, jak se měnilo vertikální efektivní napětí během centrifugace vlivem změny výšky modelu.

průběh efektivních napětí v zemině (Taylor, 1995).

Popsané jevy dokumentují, že při modelování v centrifuze je nezbytné uvědomovat si omezení této techniky a dobře uvážit dopady všech zjednodušení modelu oproti skutečnému problému in situ.

Podobně jako jiné metody modelování, neumožňuje ani modelování v centrifuze dokonalé vystihnutí všech vlastností prototypu. Proto je vždy nutné zaměřit se na vlastnosti, které jsou stěžejní pro chování prototypu, jako například správný

4. Zkoušená zemina

4.1. Místo odběru

Zeminu pro přípravu vzorků v laboratoři jsem odebrala z výsypky Pokrok. Jedná se o materiál, který je složen především z terciérních jílových hrud. Tento jíl pochází ze severočeské terciérní pánve. Nachází se v nadloží hnědouhelných slojí. Pozice místa odběru je vyznačena na mapě na obr. 14. Na obr. 15 je fotografie materiálu čerstvě uloženého na výsypce. Zemina, kterou jsme odebírali, byla na výsypce cca několik měsíců (Mach, 2007 – ústní sdělení).



Obr. 14: Vpravo nahoře je zelenou šipkou naznačena pozice města Bilina v ČR. Mapy byly převzaty z www.mapy.cz, 2009. Místo odběru je označeno červeným bodem.

Indexové parametry zeminy měřili
Herbstová a Herle (2009):

index plasticity	$I_p = 58 \%$
mez tekutosti	$w_L = 94 \%$
mez plasticity	$w_p = 36 \%$
hustota pevných částic	
	$\rho_s = 2,675 \text{ g.cm}^{-3}$

Složení zeminy stanovené RTG difrakční
analýzou udávají Herbstová a Herle (2009)
následující:

křemen	46 %
illit	43 %
kaolinit	7 %
siderit	3 %
montmorillonit	1 %

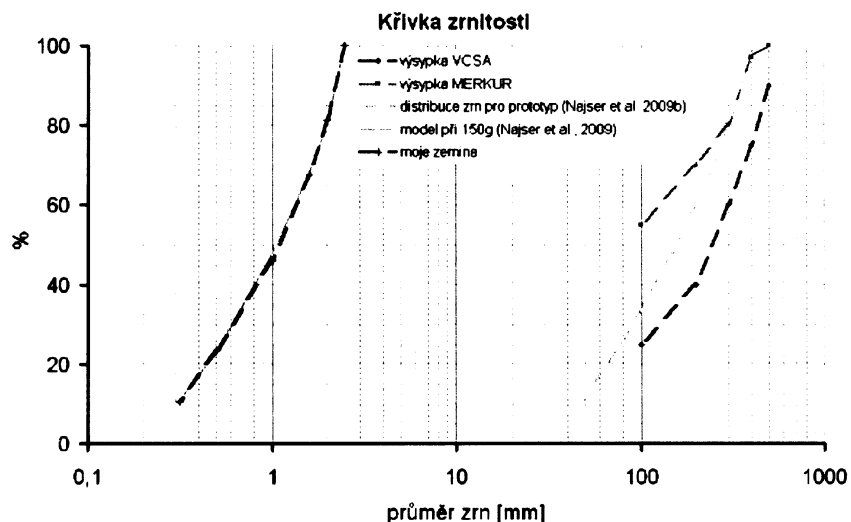


Obr. 15: Čerstvý materiál na výsypce
(Herbstová et al., 2005)

4.2. Příprava materiálu

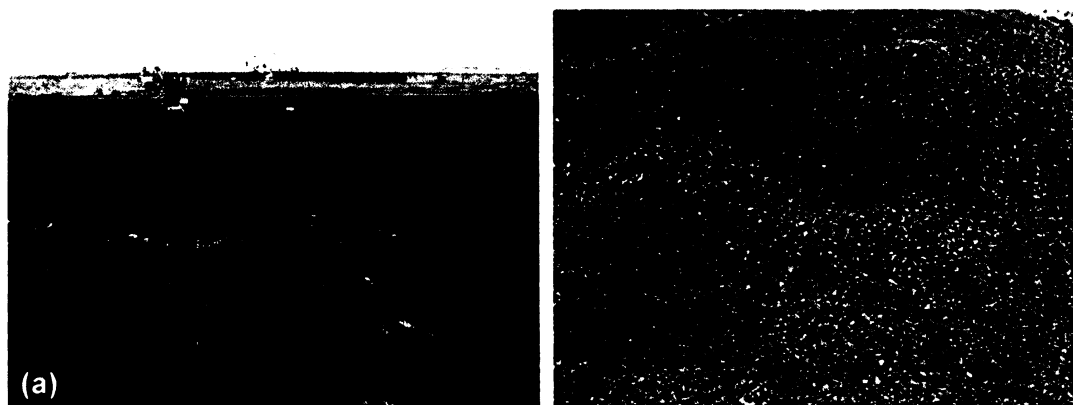
Po odebrání zeminy bylo třeba připravit granulovaný jíl, který bude reprezentovat materiál výsypky pro přípravu vzorků v centrifuze (viz kapitola 3). Pro všechny provedené zkoušky byla zvolena stejná zrnitostní distribuce hrud, odpovídající přibližně zrnitosti výsypek in situ (obr. 16). Pro své laboratorní zkoušky jsem použila zeminu se stejnou křivkou zrnitosti jako Najser et al. (2009b). Granulovaný jíl tak odpovídá skutečné zrnitosti výsypky při 150ti násobném zmenšení hrud. Srovnání křivek zrnitosti je patrné z obr. 16. Na tomtéž obrázku je její srovnání se zrnitostmi naměřenými v terénu a také zrnitostí v Najser et al. (2009b).

Odebranou zeminu jsem vysušila při 50°C a rozdrtila na jemnější frakci. Potom pomocí sít o velikosti ok 2,5 – 2 – 1,6 – 1 – 0,5 – 0,315 mm jsem si připravila jednotlivé frakce a ty smíchala v takovém poměru, aby vznikl granulovaný jíl o požadované zrnitosti. Poté jsem



Obr. 16: Křivka zrnitosti pro výsycky VCSA a MERKUR (data byla převzata z terénních měření podle Dykasta, 1993), pro přípravu vzorků v centrifuze v této práci byla použita stejná zrnitostní distribuce hrud jako u Najsera et al. (2009b).

pro kontrolu opět stanovila křivku zrnitosti připraveného materiálu. Na obr. 17 je srovnání materiálu skutečné výsycky s materiálem připraveným výše popsáním způsobem.

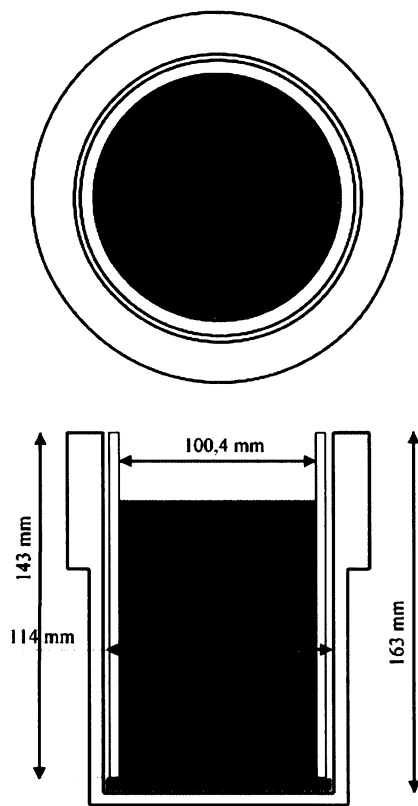


Obr. 17: a) fotografie výsycky
b) granulovaný jíl připravený pro konsolidaci v centrifuze

4.3. Příprava vzorku

4.3.1. Popis centrifugy

Laboratoř mechaniky zemin PŘF UK disponuje centrifugou JOUAN KR4i. Ta je určena především k transfúzní centrifugaci a centrifugaci v biochemii. Maximální frekvence, kterou je možné využít k centrifugaci je 4900 otáček/min. Jedná se o centrifugu ramenovou se čtyřmi rameny, která spolu navzájem svírají 90°. Před zkouškou je vždy třeba zajistit dokonalé vyvážení protilehlých ramen.



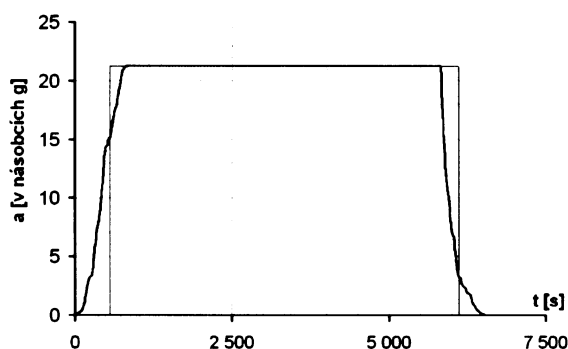
Obr. 18: Řez kyblíkem po nasypání granulovaného jílu. Červenými křížky jsou označeny body, kde bylo prováděné měření sedání během konsolidace v centrifuze. Obrázek byl upraven podle Najser (2009)

Konsolidace granulovaného jílu pro přípravu laboratorních vzorků se prováděla ve čtyřech kyblících zavěšených na ramenech centrifugy. Průměr kyblíků, které byly součástí příslušenství centrifugy, je 114 mm a jejich hloubka je 163 mm. Na dno kyblíků byly umístěny porézní destičky pro zajištění oboustranné drenáže zeminy. Před nasypáním materiálu byly do kyblíků umístěny plexisklové válce z důvodu snadnější manipulace se vzorkem po ukončení konsolidace (vysoké sání po konsolidaci komplikuje vyjmutí vzorku bez jeho porušení). Po instalaci drenážní destičky a plexisklového válce je konečná výška vzorkového prostoru asi 143 mm a průměr 100,4 mm. Schéma kyblíku a jeho rozměry ukazuje obr. 18.

Na obr. 19 jsem vykreslila, jak se během konsolidace vzorku mění s časem odstředivé zrychlení (je závislé na rychlosti otáčení). Na začátku a konci zkoušky, když dochází k zrychlování a

brzdění, rychlost otáčení není konstantní. V tomto případě byla využita nejvyšší rychlost

akcelerace a brzdění umožněné centrifugou z důvodu minimalizování chyb. K vyhodnocení zkoušky je potřeba skutečný průběh idealizovat – na obr. 19 červeně vynesena křivka. Plochy pod skutečnou (černou) a idealizovanou (červenou) křivkou jsou shodné.



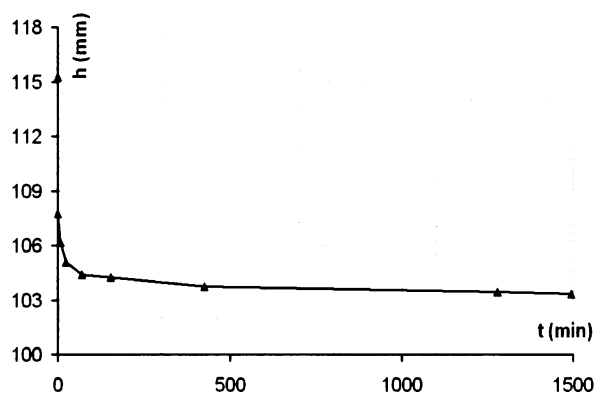
Obr. 19: Skutečný průběh otáček během centrifugace (černá křivka) a idealizovaná křivka (červeně).

4.3.2. Příprava vzorků pro měření propustnosti

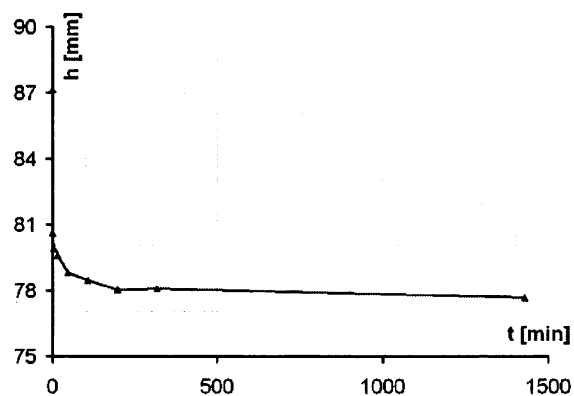
Konsolidace při různých vertikálních efektivních napětí bylo dosaženo kombinací zvoleného odstředivého zrychlení a hloubky, z níž byl vzorek pro měření propustnosti odebrán. Z principu centrifugy (obr. 12) vyplývá, že vertikální efektivní napětí se mění průběžně s hloubkou. V důsledku toho bylo při konsolidaci odlišné napětí na horní a dolní podstavě vzorku. Při konsolidaci bylo proto zvoleno takové odstředivé zrychlení centrifugy, aby byla při dosažení požadovaného vertikálního efektivního napětí co nejmenší změna σ_v' s hloubkou konsolidované zeminy. V praxi to znamenalo, že pro konsolidaci jsem volila nejmenší možná odstředivá zrychlení a vzorek odebírala ze spodní části zkonsolidované zeminy.

Před zahájením konsolidace jsem na porézní destičku na dně kyblíku umístila filtrační papír, jehož cílem bylo zabránit přísátí zeminy k porézní destičce. Na filtrační papír jsem postavila plexisklový válec a do něj volně nasypala připravenou zeminu. Povrch byl

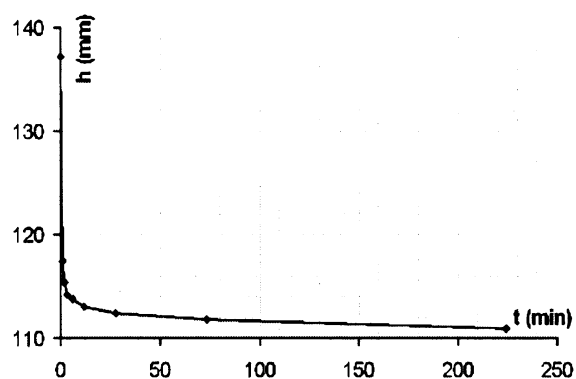
horizontálně zarovnan. Poté byla zemina zalita vodou a přibližně 24 hodin se sytila. V dalším kroku byl kyblík umístěn do centrifugy. Cílem centrifugace bylo umožnit plnou konsolidaci zeminy při zvoleném gravitačním zrychlení (vertikálním napětí). Úplná konsolidace materiálu byla kontrolována pomocí měření sednutí povrchu jílu. Ve zvolených intervalech byla proto centrifuga zastavována a měřila se změna výšky zeminy. Konsolidace v centrifuze byla ukončena po ustálení sedání jílu (viz obr. 20).



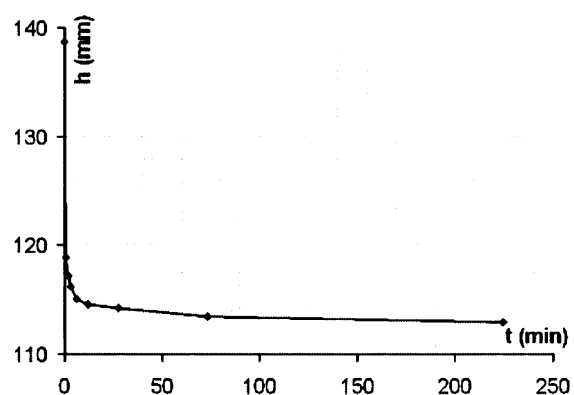
a) Bylo použito dostředivé zrychlení 150 g.



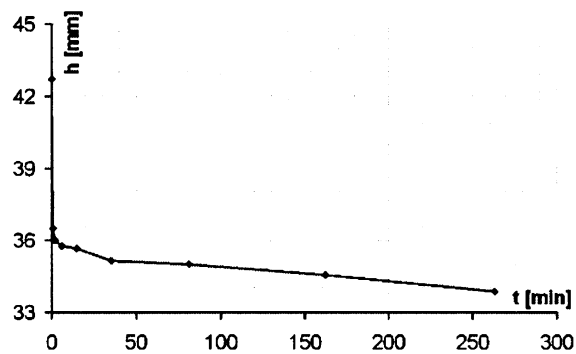
b) Bylo použito dostředivé zrychlení 100 g.



c) Bylo použito dostředivé zrychlení 300 g.



d) Bylo použito dostředivé zrychlení 300 g.



e) Bylo použito dostředivé zrychlení 250 g.

Obr. 20: Grafy konsolidace granulovaného jílu pro přípravu laboratorních vzorků.

Sedání jsem měřila digitálním posuvným měřítkem s rozlišením 0,01 milimetru. Skutečná přesnost měření závisela na manuální zručnosti laboranta (přesnost určení okamžiku kontaktu měřidla s jílem se pohybovala přibližně 0,1 mm). Pro zvýšení přesnosti měření jsem použila aritmetický průměr z měření v pěti bodech (obr. 18).

Po ukončení konsolidace jsem nejdříve musela vylít přebytečnou vodu. Poté jsem opatrně vyjmula plexisklový válec se zkonsolidovaným granulovaným jílem. Aby bylo možné se zeminou dále manipulovat, bylo třeba zeminu z válce vyjmout. Zeminu jsem vyjmula postupným zasouváním válce menšího průměru do spodní části plexisklového válce (principem pístu). Odebrání vzorku pro měření v oedometru a měření součinitele propustnosti v triaxiální komoře probíhalo následujícím způsobem:

Vzorky pro oedometr jsem odebírala pomocí oedometrického prstence. Nejdříve jsem musela oříznout vrchní část zkonsolidovaného granulovaného jílu. Oedometrický prstenec, jehož výška byla pro všechny zkoušky 2 cm, jsem postupně zatlačovala do jílu a současně



Obr. 21: Odebírání vzorku granulovaného jílu pro měření v oedometru

jsem ořezávala okolní zeminu. Postup je znázorněn na obr. 21. Pak jsem opatrně zarovнала horní část vzorku, aby nedošlo k porušení struktury zeminy, a vzorek jsem obrátila a zarovнала dolní podstavu vzorku. Změřila jsem výšku vzorku a pak jsem jej umístila do oedometru, zalila a nechala jeden den sytit. Předpokládala jsem, že po 24 hodinách je

vzorek nasycen a druhý den jsem začala oedometrickou zkoušku.

Pro měření součinitele propustnosti v triaxiální komoře jsem nejdříve ořízla horní část granulovaného jílu. Povrch jsem opět zarovнала. Poté jsem vzorek opatrně otočila a ořízla jsem spodní část, tak abych získala vzorek vysoký asi 2 až 3 cm. Vzorek jsem umístila do triaxiální komory a opatřila gumovou membránou, která zamezovala výměně vody mezi komorou a vzorkem. Na horní i spodní podstavu vzorku byly umístěny filtrační destičky.

5. Výsledky

5.1. Vyhodnocení zkoušek v oedometru

5.1.1. Metodika měření

Pomocí oedometru lze stanovit přetvárné charakteristiky zeminy. Při změně osového napětí je vzorku zabráněno roztlačovat se do stran a je drénován na obou postavách. Protože rychlost přetváření je závislá na propustnosti zeminy, lze z rychlosti a velikosti přetvoření zjistit součinitel propustnosti.

Popis postupu provedení oedometrické zkoušky lze nalézt například v ISSMGE (1998). Dále je postup popsán ČSN (5).

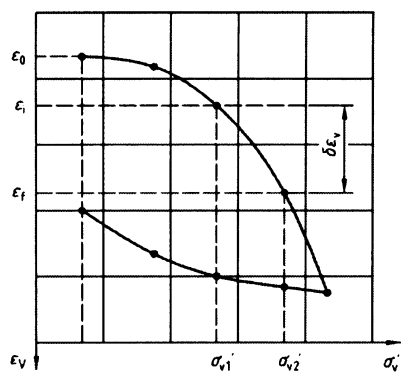
Pro oedometrickou zkoušku se doporučuje minimální výška vzorku s ohledem na zrnitostní složení zkoušené zeminy. Průměr největšího zrna by neměl být větší než je $0,1 h_p$ (ČSN, 5):

$$\phi_{max} < 0,1 \cdot h_p \quad (5.1)$$

h_p ... počáteční výška vzorku

ϕ_{max} ... průměr největšího zrna zkoušené zeminy

Během oedometrické zkoušky se měří sedání pro jednotlivé přitěžovací stupně (průběh závislosti výšky h , popř. přetvoření ε , číslo pórovitosti e , nebo v , vzorku na čase t).



Obr. 22: Změna efektivního napětí a poměrného osového přetvoření při přitěžování a odtěžování (ČSN CEN ISO/TS 17892-5, 2005)

Na základě těchto hodnot je možné vynést graf, jenž je na obr. 22. Z naměřených veličin lze získat přetvoření:

$$\epsilon_v = \frac{\delta h}{h_0} \quad (5.2)$$

δh ... změna výšky

h_0 ... počáteční výška

Dále lze vypočítat číslo pórovitosti e :

$$e = \frac{V_0 \cdot \rho_s}{m_s} - 1 \quad (5.3)$$

V_0 ... počáteční objem

m_s ... hmotnost skeletu

ρ_s ... hustota skeletu

Ze známých přírůstků napětí a přetvoření lze zjistit oedometrický modul E_{oed} :

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta \epsilon} \quad (5.4)$$

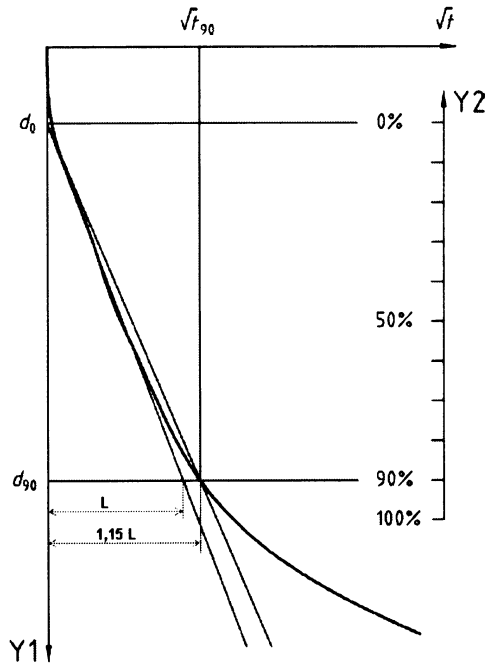
$\Delta \sigma'_v$... změna efektivního napětí

$\Delta \epsilon$... změna přetvoření

Z grafu závislosti deformace¹ na čase t , lze stanovit t_{50} nebo t_{90} . Jedná se o čas, kdy je již vzorek z 50 % (nebo 90 %) zkonsolidován. Z tohoto času je možné vypočítat součinitel propustnosti k :

¹ vynesené jako $h(t)$, $e(t)$ nebo $\epsilon(t)$

$$k = \frac{\rho_w \cdot g \cdot T_{50} \cdot H^2}{t_{50} \cdot E_{oed}} \quad (5.5)$$



ρ_w ... hustota vody

g ... gravitační zrychlení

T_{50} / T_{90} ... časový faktor, $T_{50} = 0,197$, $T_{90} = 0,848$

H ... drenážní dráha

E_{oed} ... oedometrický modul

t_{50} / t_{90} ... čas, kdy je již vzorek z 50/90% zkonsolidován

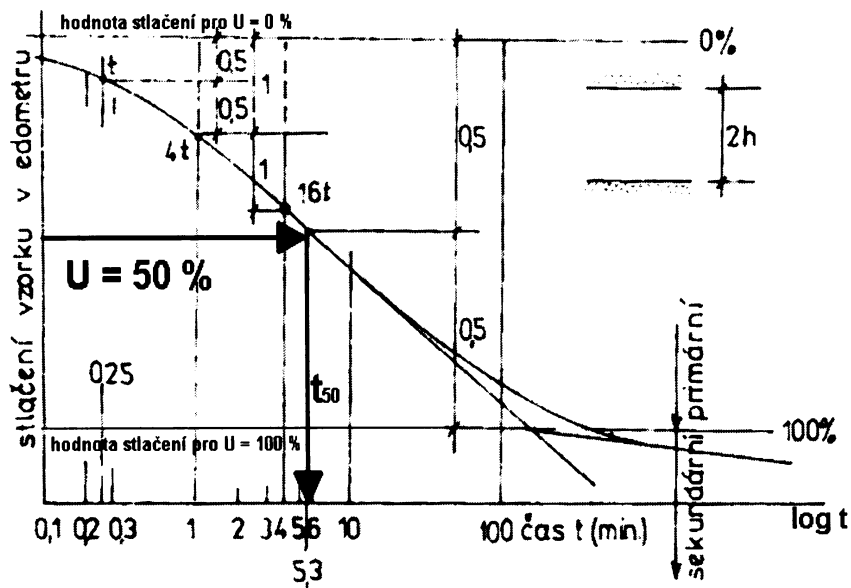
Pro T_{90} se čas odečítá z grafu $\epsilon = f(\sqrt{t})$. Postup je na obr. 23.

Čas t_{50} lze odečíst z grafu $\epsilon = f(\log t)$. Způsob je naznačen na obr. 24

Z oedometrických zkoušek je možné získat rovněž parametry stlačitelnosti. Rovnici NCL lze pro jednotlivé zkoušky zapsat:

Obr. 23: Stanovení t_{90} z grafu

jednotlivé zkoušky zapsat:



Obr. 24: Stanovení času pro $U = 50\%$

$$v = v_0 - \lambda \cdot \ln(\sigma_v')$$
(5.6)

$$v \dots = 1 + e$$

v_0 ... charakterizuje pórovitost při $\sigma_v = 1$ kPa

λ ... konstanta charakterizující stlačitelnost

σ_v' ... vertikální efektivní napětí působící na vzorek

5.1.2. Výsledky

Provedla jsem šest oedometrických zkoušek. Prvních pět vzorků bylo připraveno

napětí						
	1	2	3	4	5	6
nahoře	60 kPa	20 kPa	190 kPa	70 kPa	95 kPa	---
střed	70 kPa	30 kPa	215 kPa	95 kPa	115 kPa	---
dole	85 kPa	35 kPa	245 kPa	120 kPa	134 kPa	---
zrychlení	150 g	100 g	300 g	300 g	250 g	---

Tab. 4: Napětí na vzorku odebraném na měření v oedometru. Jsou zde napětí, které měl vzorek na obou podstavách a dále v polovině výšky vzorku.

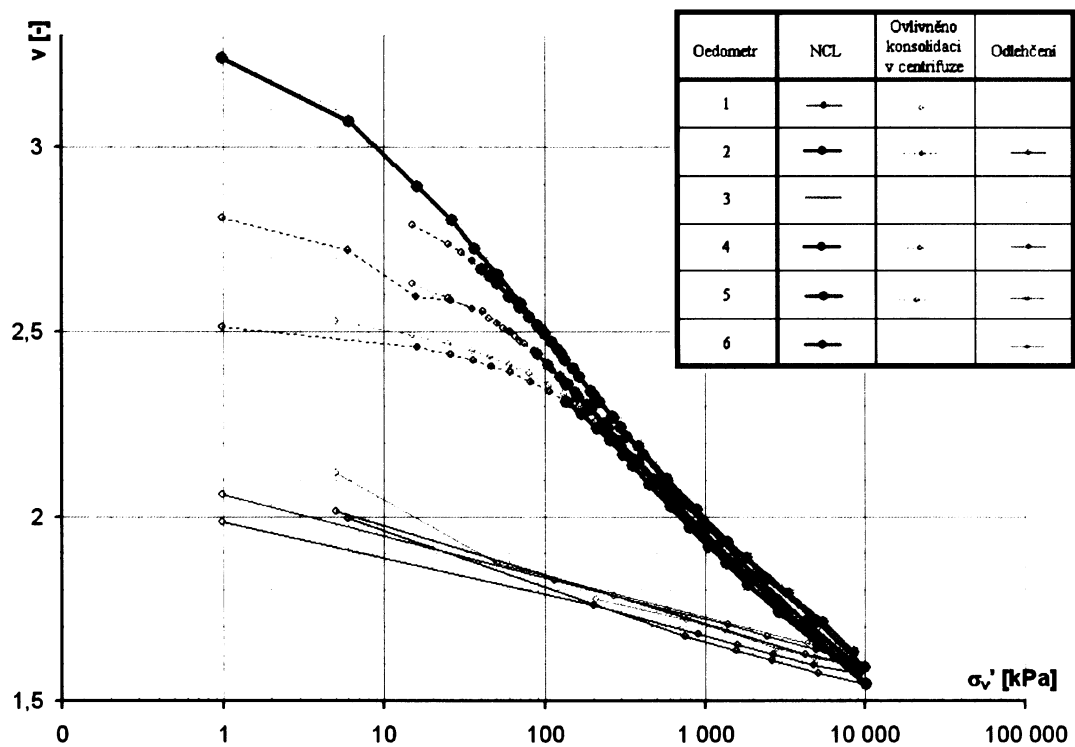
konsolidací v centrifuze.

Poslední vzorek byl připraven z granulovaného jílu, volně nasýpaného do oedometrického

prstence. V tabulce 4 jsou uvedena napětí, kterým byly vzorky vystaveny během

centrifugace. Na obr. 26 jsou křivky stlačitelnosti z jednotlivých zkoušek. Počáteční čísla pórovitosti jsou ovlivněna velikostí σ_v' při konsolidaci zeminy. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry λ a v_0 pro jednotlivé zkoušky. Na obr. 25 jsou závislosti oedometrického modulu E_{oed} , (výpočet podle rovnice 5.4.) na vertikálním efektivním napětí σ_v' . Je z nich patrná lineární závislost při použití logaritmického zobrazení v oboru vertikálního efektivního napětí, kdy vzorek nebyl ovlivněn konsolidací v centrifuze. Z uvedených grafů lze dobře určit velikost překonsolidačního napětí z centrifugy. Oedometrický modul je nutné znát, aby bylo možné určit součinitel propustnosti (rovnice 5.5). Pro výpočet součinitele propustnosti používám E_{oed} pro daný obor σ_v' , odečtený z obr. 25.

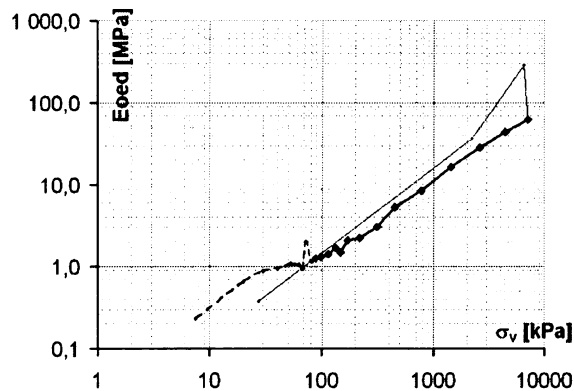
centrifugace. Na obr. 26 jsou křivky stlačitelnosti z jednotlivých zkoušek. Počáteční čísla pórovitosti jsou ovlivněna velikostí σ_v' při konsolidaci zeminy. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry λ a v_0 pro jednotlivé zkoušky. Na obr. 25 jsou závislosti oedometrického modulu E_{oed} , (výpočet podle rovnice 5.4.) na vertikálním efektivním napětí σ_v' . Je z nich patrná lineární závislost při použití logaritmického zobrazení v oboru vertikálního efektivního napětí, kdy vzorek nebyl ovlivněn konsolidací v centrifuze. Z uvedených grafů lze dobře určit velikost překonsolidačního napětí z centrifugy. Oedometrický modul je nutné znát, aby bylo možné určit součinitel propustnosti (rovnice 5.5). Pro výpočet součinitele propustnosti používám E_{oed} pro daný obor σ_v' , odečtený z obr. 25.



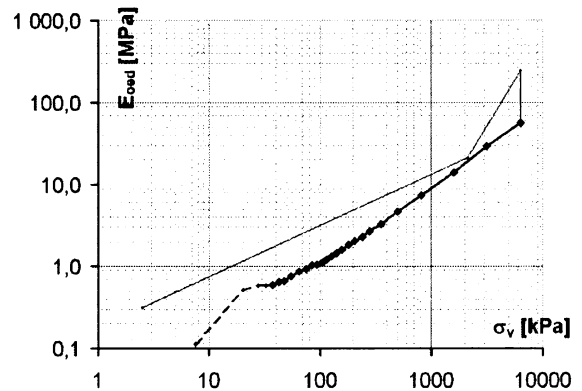
Obr. 26: Křivky NCL. Silně jsou části zkoušky, které nejsou ovlivněny konsolidací v centrifuze. Čárkovaně jsou části konsolidací ovlivněné.

0,18	0,21	0,18	0,19	0,18	0,2
3,2	3,4	3,2	3,3	3,2	3,4

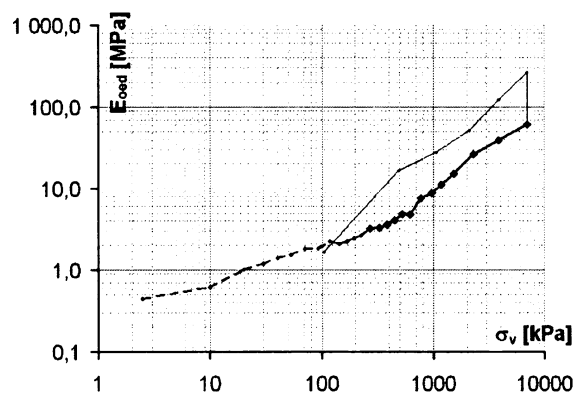
Tab. 5: Parametry NCL pro oedometrické zkoušky a jejich průměrná hodnota.



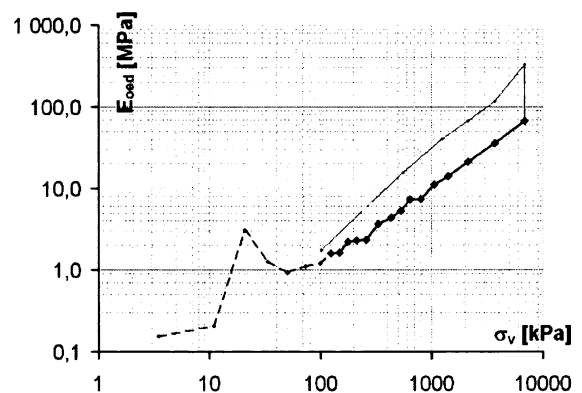
a) Vzorek zkonsolidovaný na 70 kPa



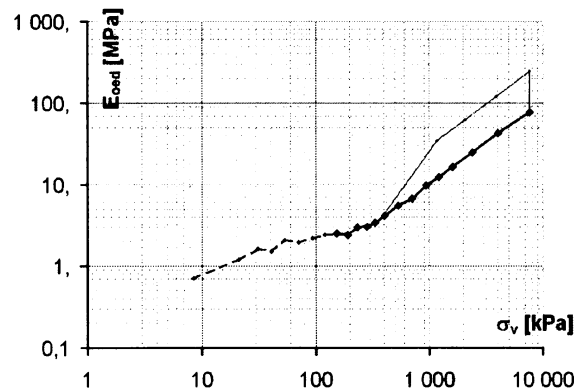
b) Vzorek zkonsolidovaný na 30 kPa



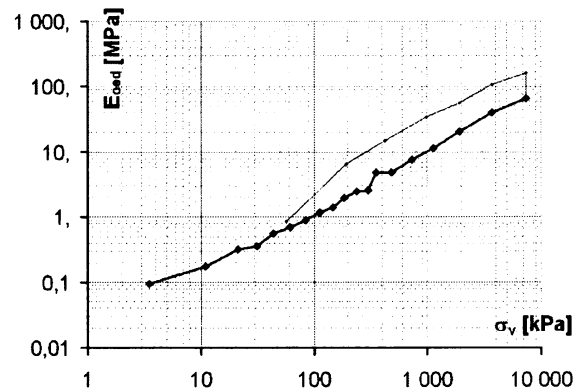
c) Vzorek zkonsolidovaný na 215 kPa



d) Vzorek zkonsolidovaný na 95 kPa.



e) Vzorek zkonsolidovaný na 115 kPa.



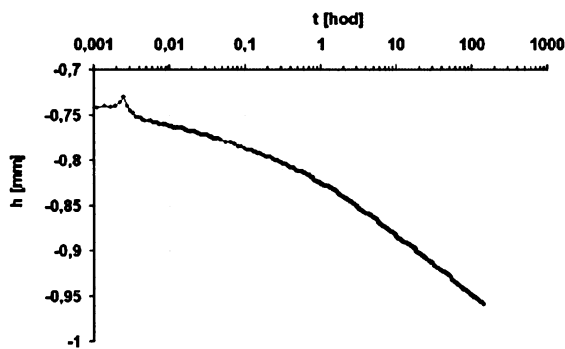
f) Vzorek bez konsolidace v centrifuze

Obr. 25: Závislost oedometrického modulu na napětí. Tlustou čarou je znázorněna část grafu, která je neovlivněna konsolidací v centrifuze. Slaběji čárkovaně je část závislosti, která konsolidací ovlivněna je. Slabou plnou čarou je odlehčovací větev.

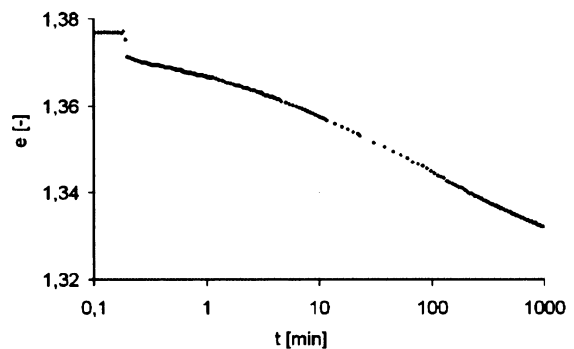
Na obr. 30 jsou v grafech vyneseny závislosti součinitele propustnosti k na efektivním vertikálním napětí σ_v' pro jednotlivé oedometrické zkoušky. V každém grafu jsou vyneseny dvě série dat.

Jedna série dat byla získána odečtením t_{90} podle obr. 23. Součinitele propustnosti vypočtené touto metodou jsou vyneseny plnými kroužky na obr. 30 a charakterizují celkovou propustnost zeminy. Semilogaritmické zobrazení závislosti čísla pórovitosti e na čase t umožňovalo odečtení času t_{50} pro úvodní fázi přitížení (grafy jsou v příloze), kdy se projevovало vytlačování vody z makropórů (na obr. 30 je k , vypočtené touto metodou, znázorněno trojúhelníky). Na obrázku 27 je vynesen průběh sedání pro rekonstituovaný jíl, u nějž k žádné rychlé fázi sednutí nedochází. Obrázek 28 ukazuje rychlé prosednutí mého materiálu.

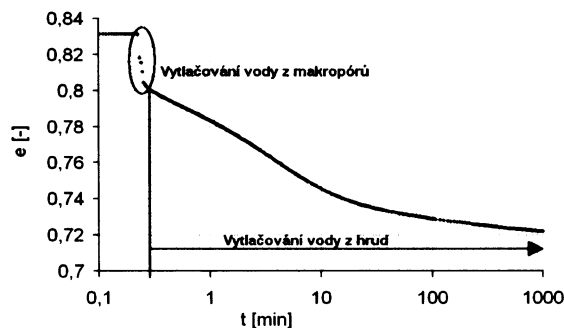
Oddělení dvou typů propustnosti ukazuje typický průběh pro σ_v' větší než 1 MPa jednoho přitěžovacího kroku (obr. 29). Skokové sednutí zaznamenané bezprostředně po přitížení ukazuje vytlačování vody z makropórů. Druhý typ propustnosti, charakterizující vytlačování vody z jílových hrud se projevuje následným typickým průběhem konsolidační křivky.



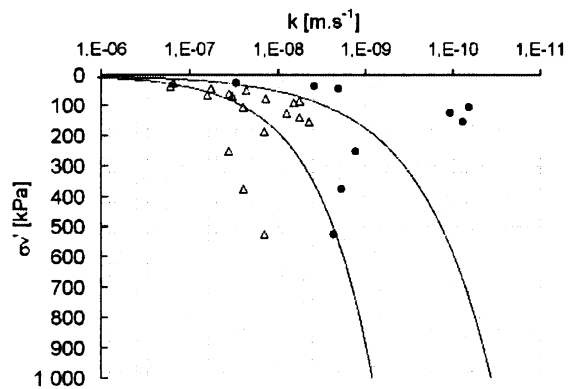
Obr. 27: Průběh sedání pro rekonstituovaný jíl.



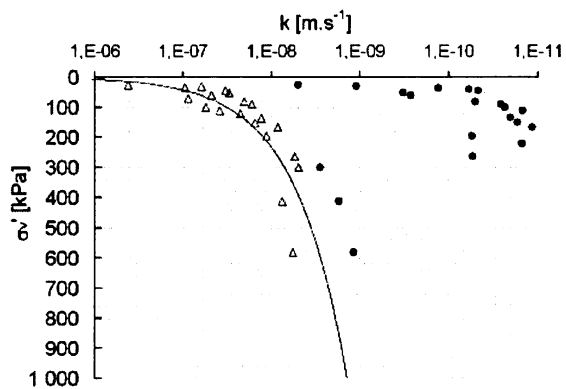
Obr. 28: Typický průběh sedání pro σ_v' menší než 1 MPa



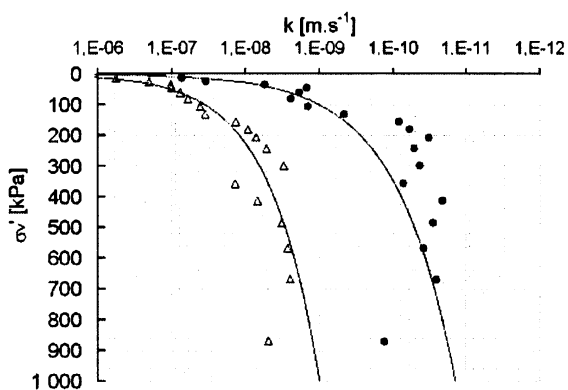
Obr. 29: Typický průběh jednoho přitěžovacího cyklu v oedometru pro σ_v' větší než 1 MPa



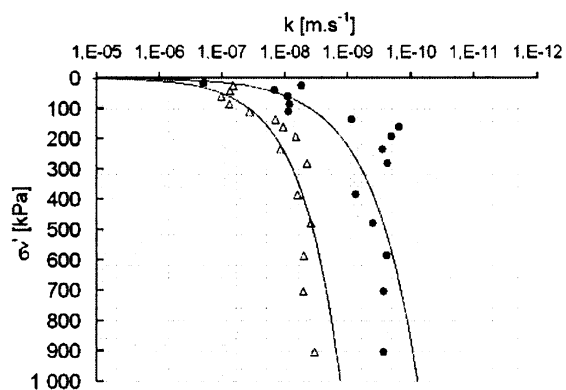
a) Vzorek konsolidovaný na 70 kPa



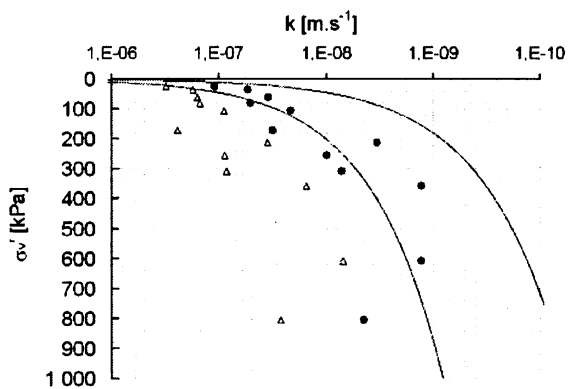
b) Vzorek konsolidovaný na 30 kPa



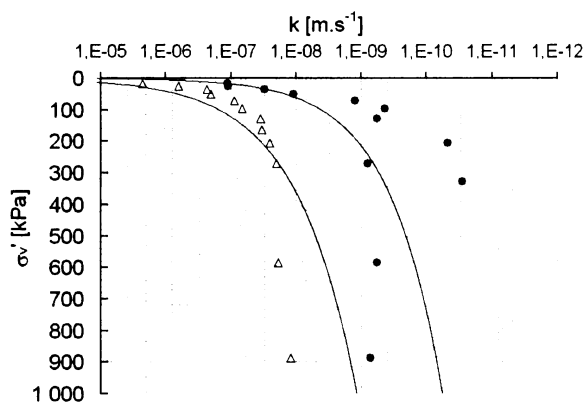
c) Vzorek konsolidovaný na 215 kPa



d) Vzorek konsolidovaný na 95 kPa.



e) Vzorek konsolidovaný na 115 kPa



f) Vzorek bez konsolidace v centrifuze

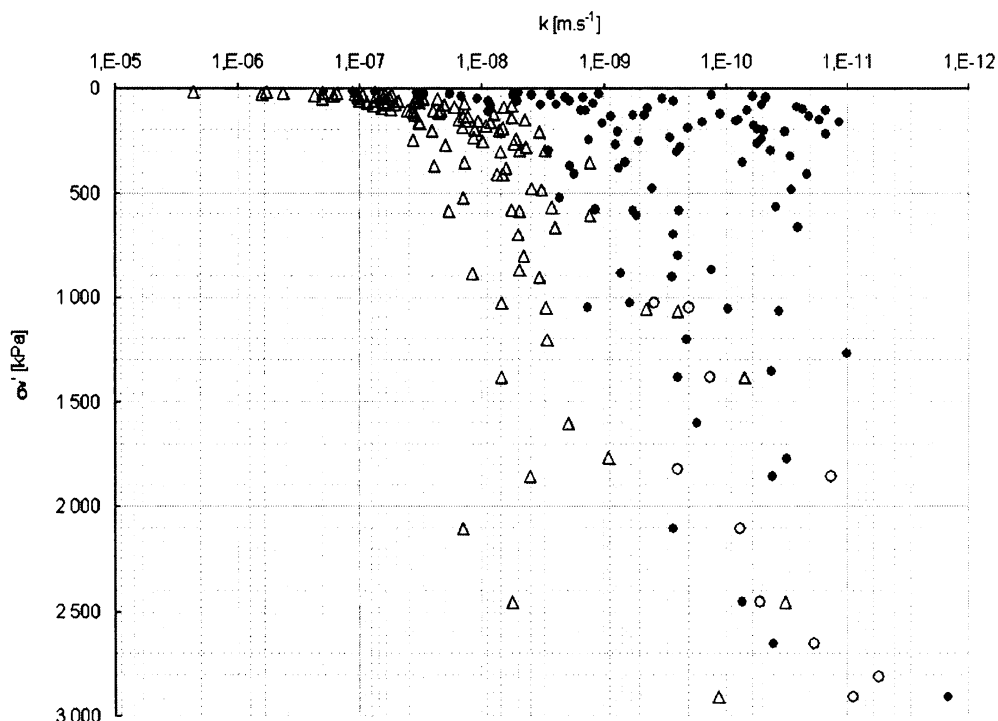
Obr. 30: Stanovení součinitele propustnosti v oedometru. Proložené křivky procházejí všemi body, ale v grafech jsou vyneseny jen body do vertikálního efektivního napětí $\sigma'_v = 1000$ kPa.

Na obrázku 30 jsou vyneseny exponenciální křivky proložené jednotlivými měřeními. Exponenciální závislost efektivního vertikálního napětí σ_v' součinitele propustnosti k je statisticky významná. V tabulce jsou uvedeny korelační koeficienty pro oedometrické zkoušky, počet dat a hodnota korelačního koeficientu pro hladinu významnosti 0,05 ($r_{0,05}$). Korelační koeficient musí být větší než $r_{0,05}$.

	oedometr 1		oedometr 2		oedometr 3		oedometr 4		oedometr 5		oedometr 6	
	Δ	\bullet	Δ	\bullet	Δ	\bullet	Δ	\bullet	Δ	\bullet	Δ	\bullet
korelační koeficient	0,855	0,714	0,896	0,129	0,970	0,904	0,947	0,917	0,935	0,956	0,888	0,861
počet dat	21	12	24	24	23	24	19	21	17	18	20	16
$r_{0,05}$	0,414	0,532	0,389	0,389	0,398	0,389	0,433	0,414	0,456	0,444	0,423	0,468

Tab. 6: Korelační koeficient při proložení exponenciálních křivek na obrázku 30.

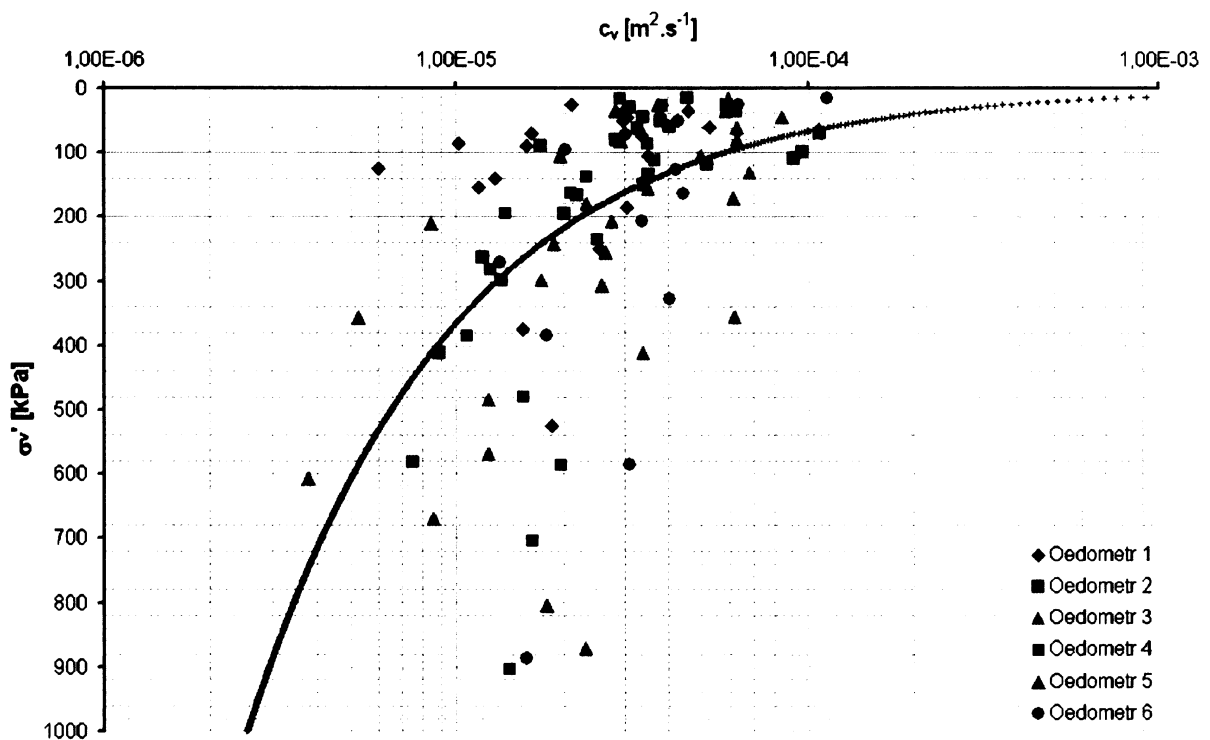
Součinitele propustnosti stanovené pro všechny série a pro všechny oedometrické zkoušky z obr. 30 jsou vyneseny do grafu na obr. 31. V grafu jsou rozlišeny součinitele



Obr. 31: Součinitele propustnosti k pro všech šest oedometrických zkoušek.

stanovené metodou t_{50} (trojúhelníky - k stanovené z rychlého sednutí, prázdnými kolečky - k stanovené z následující fáze konsolidace celého vzorku) a t_{90} (v grafu vyznačené plnými kolečky).

Na obrázku 32 jsou vyneseny závislosti součinitele konsolidace c_v na vertikálním efektivním napětí σ'_v . Při použití metod matematické statistiky dostaneme korelační koeficient 0,707, výběrový koeficient korelace pro hladinu významnosti 0,05 je 0,194. Hodnotami lze tedy proložit exponenciální křivku.



Obr. 32: Závislost součinitel konsolidace na efektivním vertikálním napětí.

5.2. Vyhodnocení zkoušek v triaxiální komoře

5.2.1. Metodika měření

Součinitel propustnosti k se standardně stanovuje měřením objemu vody V , který proteče vzorkem za daný čas t . Propustnost lze měřit s konstantním nebo proměnným hydraulickým gradientem i . Pro velmi malé propustnosti ovšem toto měření již není přesné, neboť odpařování proteklé vody způsobuje vzhledem k jejímu malému množství nezanedbatelnou chybu. Postup stanovení součinitele propustnosti je popsán např. v ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005).

Výška vzorku je podle této normy omezena velikostí největšího zrna. Minimální výška vzorku musí dosahovat, podle zmíněné normy, v případě nestejnzrnné zeminy nejméně pětinasobku průměru největšího zrna. Součinitel propustnosti lze vypočítat pomocí následující rovnice:

$$k = \frac{\Delta V \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\Delta t \cdot S \cdot (p_{hd} - p_{dd})} \quad (5.7)$$

ΔV ... změna objemu během času Δt

H ... výška vzorku; S ... průřez vzorku

ρ ... hustota vody; g ... gravitační zrychlení

p_{hd} ... tlak na horní drenáži; p_{dd} ... tlak na dolní drenáži

Plochu vzorku S a jeho výšku H zjistíme před osazením vzorku. Hustota vody ρ a gravitační zrychlení g jsou konstanty (u hustoty vody je možné provést korekci na teplotu). Během měření je možné měnit hydraulický gradient, změníme-li Δp ($= p_{hd} - p_{dd}$) viz rovnice 5.6. Změna objemu ΔV je měřena v časových intervalech Δt .

5.2.2. Výsledky

Propustnost jsem měřila na pěti vzorcích. Granulovaný jíl pro přípravu vzorků byl konsolidován v centrifuze podobně jako vzorky pro oedometr. Výška vzorku se pohybovala mezi 2 cm a 3 cm.

napětí					
	1	2	3	4	5
nahore	50 kPa	28 kPa	155 kPa	80 kPa	110 kPa
střed	60 kPa	35 kPa	200 kPa	105 kPa	140 kPa
dole	75 kPa	45 kPa	240 kPa	130 kPa	175 kPa
zrychlení	150g	100g	300g	225g	345g

Tab. 7: Konsolidační napětí vzorků odebraných pro měření v triaxiální komoře. Jsou zde napětí, která působila na vzorek na horní a dolní podstavě a v polovině výšky vzorku.

U všech měřených vzorků byl poměr maximálního průměru zrna ku výšce vzorku 1:8 až 1:12, což odpovídá požadavkům normy ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005) pro nestejnzrnnou zeminu. Průměr všech vzorků byl cca 10 cm.

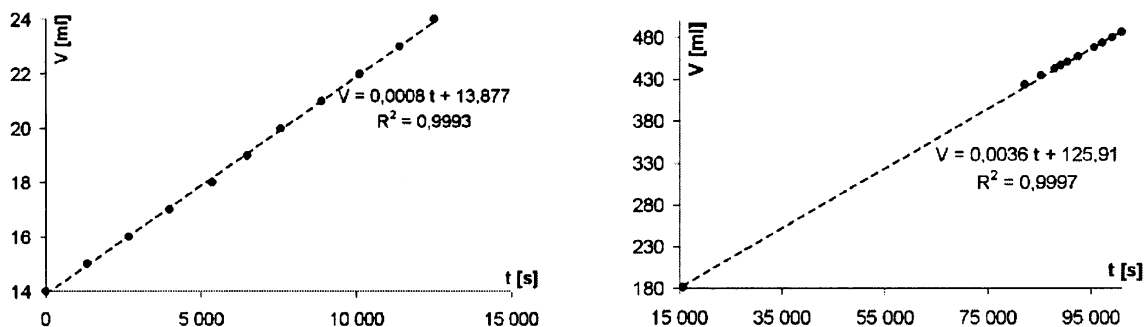
Měření probíhala v triaxiální komoře. Vzorky 1 a 2 byly dostatečně propustné a nedocházelo tak ke zkreslování výsledků vypařováním proteklé vody. Hydraulický gradient působící na vzorek byl vyvozen rozdílem výšky hladiny vody v nádobě, z níž vtékala voda do vzorku a výšky hladiny na výtoku. Nádoba zachytávající vodu byla zakryta neprodyšnou fólií, která zabraňovala výparu.

U zkoušek 3 až 5 se očekávala nižší propustnost, jejíž měření výše uvedenou metodou by bylo zatíženo značnou chybou vlivem výparu. Postup měření těchto zkoušek byl následující:

Sycení vzorku bylo zajištěno v triaxiální komoře natlakováním na 310 kPa. Při měření byly použity kontrolery GDS připojené k dolní a horní podstavě vzorku. Tyto kontrolery umožňují aplikovat na vzorek konstantní tlak (s přesností 1 kPa) a zároveň měřit objem vody protékající vzorkem (s přesností 1 mm³). Při sycení byl tlak vody působící na horní podstavu nastaven na 299 kPa a u dolní podstavě na 301 kPa pro zajištění dostatečného průtoku vody vzorkem. Sycení probíhalo 48 hodin.

Poté byl vzorek izotropně rekonsolidován na efektivní horizontální napětí σ'_h při prvotní konsolidaci v centrifuze. Toto napětí bylo vypočítáno jako součin σ'_v a koeficientu K_0 , který byl vždy uvažován 0,7.

Poté byly na vzorky postupně aplikovány různé hydraulické gradienty nastavením různých tlaků (a tedy různých efektivních napětí) na horní a dolní podstavě vzorků. Objem proteklé vody byl zaznamenán GDS kontrolerem.



Obr. 33: Vlevo: Závislost objemu proteklé vody V na čase t pro vzorek 1 při $i = 9,8$. Vpravo: Totéž pro vzorek 2, hydraulický gradient $i = 8,2$.

Typická měření objemu proteklé vody pro vzorky 1 a 2 jsou uvedena na obr. 33. U vzorků 3 až 5 byla předpokládána nižší výsledná propustnost. Z důvodu zajištění lineární závislosti množství proteklé vody na čase byl zachycen delší časový interval měření (obr. 34).

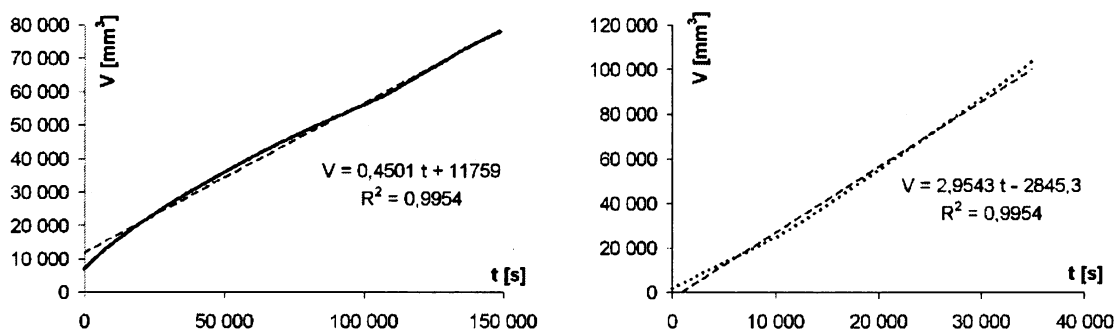
	1	2	3	4	5
σ_v	60 kPa	35 kPa	200 kPa	105 kPa	140 kPa
k	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$

Tab. 8: Propustnost jednotlivých vzorků

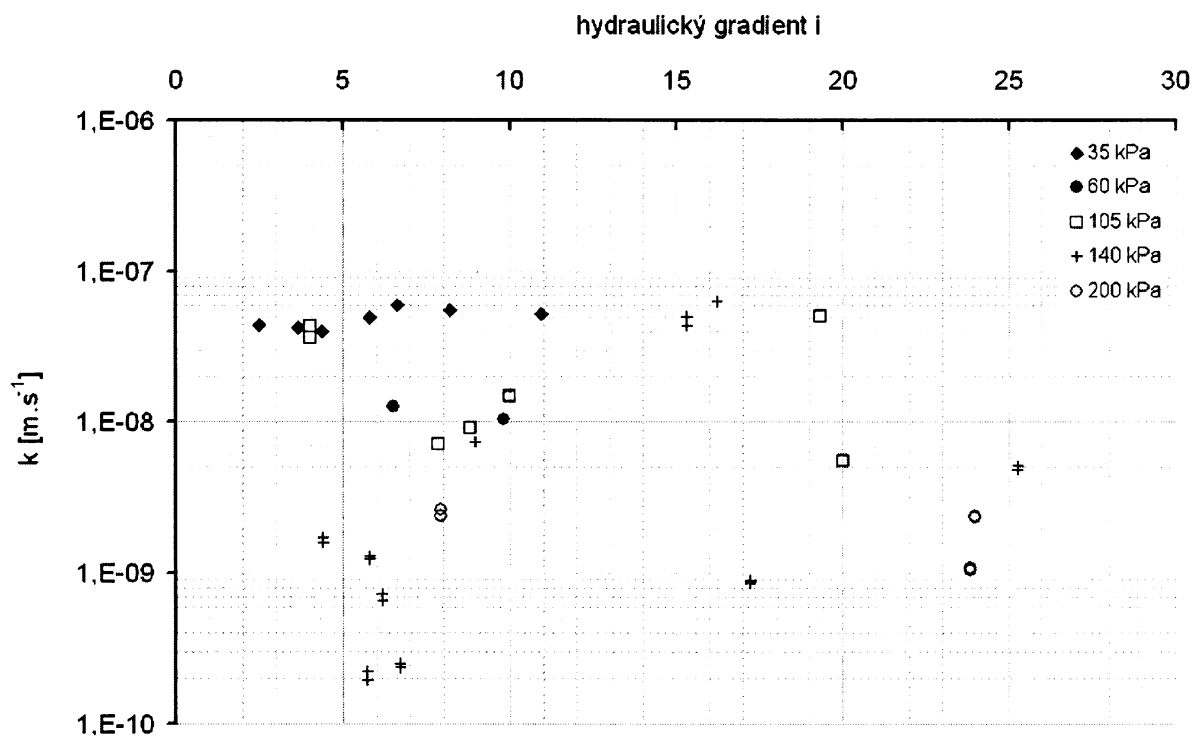
V tabulce 8 jsou shrnuta σ_v a jim odpovídající průměrné součinitele propustnosti pro všechny vzorky.

Na obr. 35 jsou vyneseny všechny změřené součinitele propustnosti (pro každý vzorek

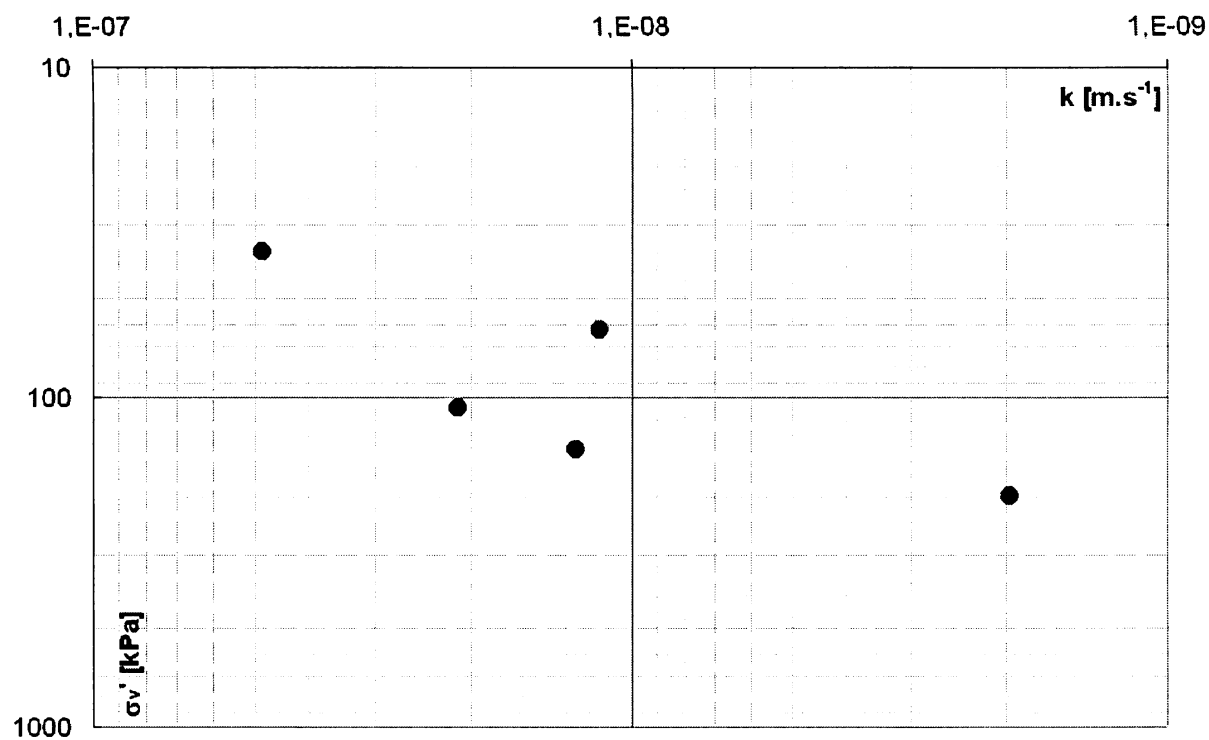
bylo k stanoveno při různých hydraulických gradientech). Obr. 35 ukazuje značný rozptyl naměřených hodnot u vzorků zkonsolidovaných při σ_v 105 kPa a 140 kPa. Vzorky zkonsolidované při σ_v 35 kPa a 200 kPa ukazují poměrně dobrou shodu součinitelů propustnosti měřených při různých gradientech. Průměrné hodnoty součinitele propustnosti pro jednotlivé vzorky ukazuje obr. 36. Z něj je patrný trend poklesu součinitele propustnosti s rostoucí hodnotou σ_v . Malé množství zkoušených vzorků a relativně malý interval σ_v neumožňuje při daném rozptylu měřených hodnot podrobnější analýzu. Centrifuga i triaxiální komora sice umožňují přípravu a testování vzorků i při vyšších hodnotách σ_v , ale rozdíl σ_v působících na horní a dolní podstavě vzorku při konsolidaci v centrifuze by byl příliš veliký (viz obr. 37 a tabulka 7).



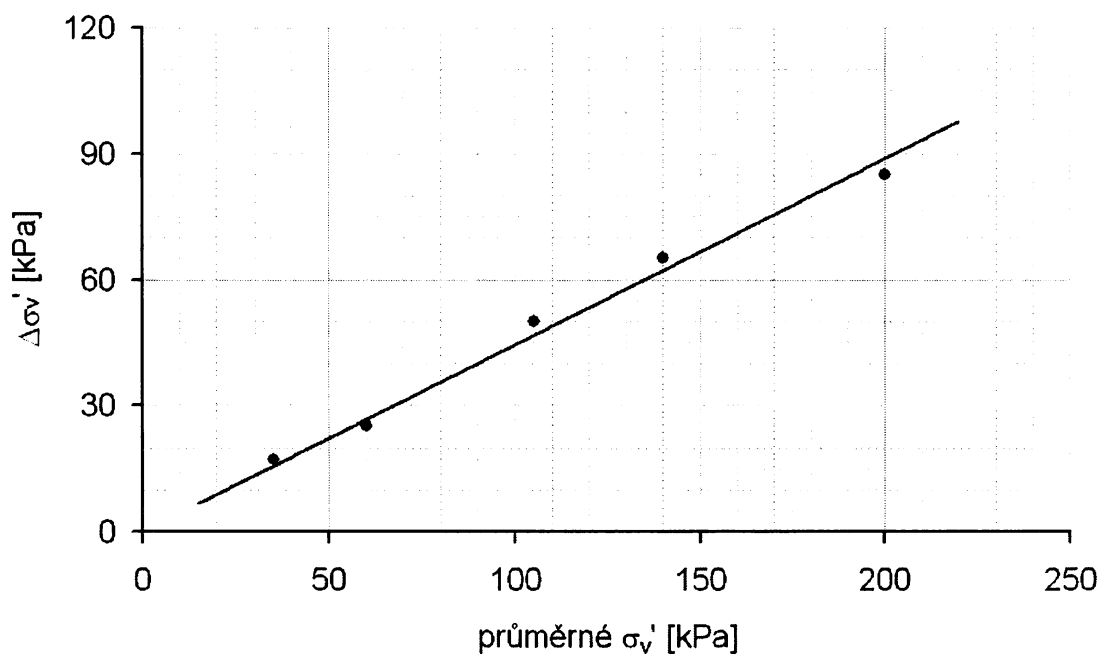
Obr. 34: Vlevo: Vzorek 3. Závislost proteklého objemu V na čase t . Hydraulický gradient $i = 24$
 Vpravo: Vzorek 4. Závislost proteklého objemu V na čase t . Hydraulický gradient $i = 27$



Obr. 35: Součinitele propustnosti pro všechny vzorky měřené v triaxiální komoře.



Obr. 36: Průměrné součinitele propustnosti vynesené v závislosti na vertikálním efektivním napětí.



Obr. 37: Rozdíl σ_v' na dolní a horní podstavě vzorku v závislosti na průměrné hodnotě σ_v' v odebraném vzorku (data viz tabulka 9)

6. Diskuze

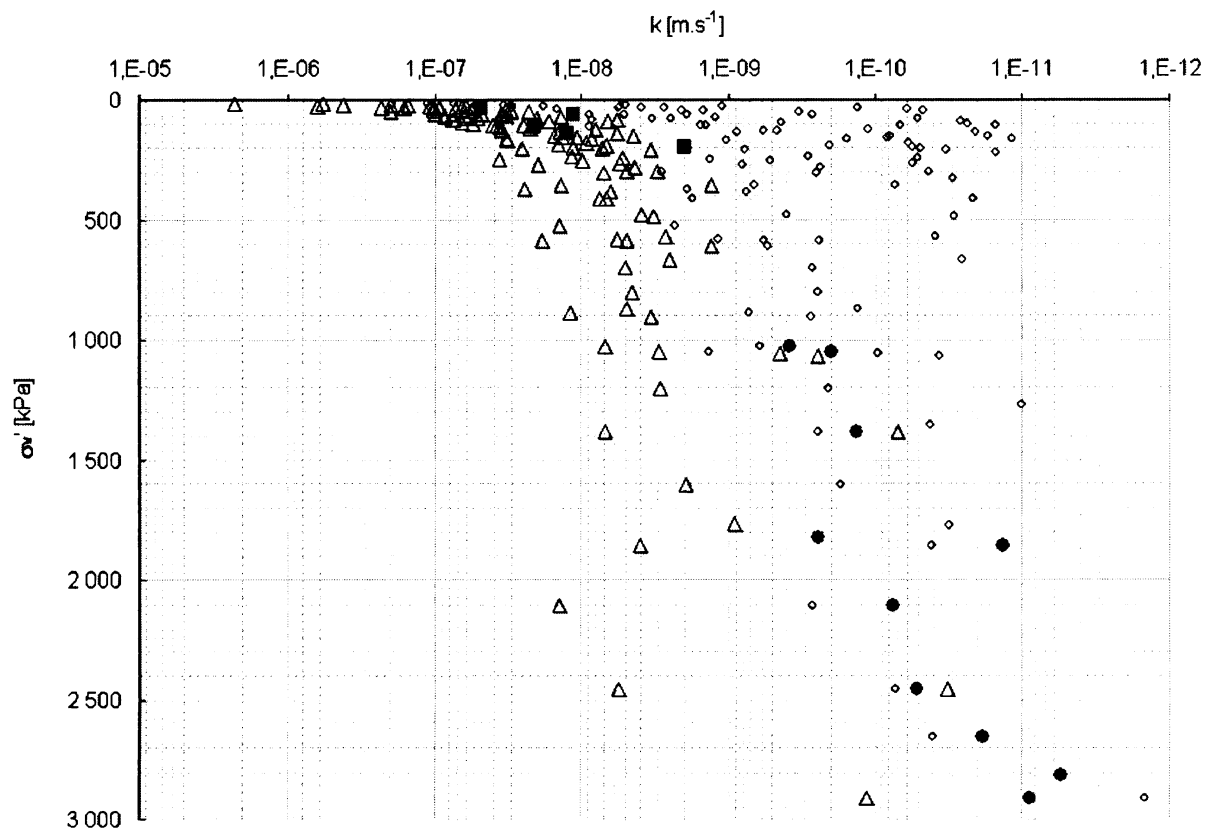
Cílem provedených zkoušek bylo charakterizovat průběh propustnosti s hloubkou uvnitř výsypky s ohledem na uzavírání makropórů vlivem tíhy nadloží. V literatuře byly prezentovány dvě teorie popisující uzavírání makropórů s rostoucí hloubkou:

- 1) Herštus (2003) uvádí na základě polních měření skokový pokles propustnosti v hloubce 10-20 m. Tato hloubka by mohla odpovídat uzavření spojitého prostředí makropórů, které je charakterizováno vysokým součinitelem propustnosti. Ve větších hloubkách nejsou makropóry vzájemně propojené (případně se zcela uzavírají), což má za následek výrazné snížení propustnosti zeminy. Herštus (1999) zaznamenal při laboratorním stanovení propustnosti výsypkového jílu výrazný pokles propustnosti přibližně v hloubce 24 m.
- 2) Výsledky modelování granulovaného jílu v centrifuze a následné laboratorní měření stlačitelnosti (Najser et al., 2009a) naznačují průběžné uzavírání makropórů s hloubkou.

Výsledky mých zkoušek v oedometru vyhodnocených metodou t_{50} ukazují dvě rozdílné propustnosti makropórů (trojúhelníky znázorněny součinitele propustnosti – obr. 38 a součinitele propustnosti znázorněné plnými kolečky). Touto metodou nebylo možné stanovit součinitel propustnosti jílových hrud u nízkých normálových napětí (menších než $\sigma'_v = 500$ kPa), kde bylo zcela dominantním faktorem uzavírání makropórů. Naopak při vyšších σ'_v nebylo možné vyhodnotit součinitel propustnosti makropórů, které již byly uzavřené. Celková propustnost zeminy (charakterizující propustnost hrud i makropórů) byla u oedometrických zkoušek stanovená v oedometru metodou t_{90} . U nižších σ'_v bylo vyhodnocení touto metodou zatíženo značnou chybou.

Na obrázku 30 z grafů závislosti efektivního vertikálního napětí na součiniteli propustnosti je možné u některých zkoušek sledovat mezi 100 – 200 kPa (odpovídající hloubka je mezi 12 a 25 m) změnu trendu. Tato hloubka odpovídá hranici mezi průvzdušnou a neprůvzdušnou zónou popsané Herštusem (1999). Pokud vynesu do jednoho grafu všechna měření, trend se vlivem velkého rozptylu dat ztrácí.

V oboru σ'_v 30-200 kPa byl celkový součinitel propustnosti stanoven pomocí měření v triaxiální komoře (na obr. 38 plnými čtverečky). Součinitele propustnosti stanovené touto metodou jsou ve shodě s k stanovenými oedometrickou zkouškou a ukazují postupný nárůst propustnosti s hloubkou (do $\sigma'_v = 200$ kPa, cca 25 m hloubky).



Obr. 38: Porovnání všech sérií dat. Součinitele konsolidace:

- Δ ... t_{50} makropóry
- ... t_{90}
- ... t_{50} následující fáze
- ... triaxiální komora

Hodnoty součinitelů propustnosti vykazují určitý rozptyl. V případě vyhodnocených oedometrických zkoušek je chyba způsobena nejednoznačným stanovením t_{50} (t_{90}) z grafu změny čísla pórovitosti e v závislosti na čase t , zejména při odečítání t_{50} pro stanovení součinitelů propustnosti u makropórů (sednutí vzorku bylo prakticky okamžité).

Rozptyl součinitelů propustnosti měřených v triaxiální komoře je ovlivněn citlivostí GDS kontrolerů, kdy kolísání tlaku vody může způsobit poměrně výrazné změny u hydraulického gradientu a ovlivnit výslednou hodnotu k . Dalším problémem popisovaných zkoušek může být relativně malá výška vzorku – vznik preferenční drenážní cesty může výrazně ovlivnit výsledky měření.

7. Závěry

Součinitele propustnosti získané měření v triaxiální komoře odpovídají součinitelům propustnosti stanoveným Taylorovou metodou t_{90} , ale tato měření jsou zatížena chybou a rozptylem dat.

Výsledky laboratorních zkoušek prováděných v oedometru ukazují postupný pokles součinitele propustnosti s hloubkou do 12,5 – 25 m (obrázek 30). V této hloubce se pak prudký pokles součinitele propustnosti zastaví. Podobný průběh ukazuje i součinitel konsolidace (obr. 32).

Na základě provedených experimentů na granulovaném jílu lze konstatovat, že v hloubkové úrovni 12,5 – 25 m vymizí dominantní role makropórů na propustnost výsypky.

8. Literatura

ČSN CEN ISO/TS 17892-5, Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin Část 5: Stanovení stlačitelnosti zemin v edometru, Český normalizační institut, Praha, 2005.

ČSN CEN ISO/TS 17892-11, Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin Část 11: Stanovení propusnosti zemin při konstantním a proměnném spádu, Praha, 2005.

Dykast, I., Vlastnosti výsypek v SHR z hlediska jejich zástavby, KDP, ČVUT, Fsv, Praha, 1993.

Feda, J, Fragmentary clay – a difficult waste material, Engineering Geology 51, 77-88, 1998.

Herbstová, V., Mašín, D., Boháč, J., Parameters for non-engineered colliery clayfills, Proceedings of International Conference on Problematic Soil, 25-27, Eastern Mediterranean University, Famagusta, N. Cyprus, 2005.

Herbstová, V., Herle, I., Structure transition of clay fills in North-Western Bohemia, Engineering Geology 104, 157-166, 2009.

Herštus, J., Výsledky průzkumu výsypky pro umístění skládky, Grant 103/99/0753, 1999.

Herštus, J, 103391_E1A_ZZ podetapa I-1/03 A, Praha, 2003.

Charles, J.A., The engineering of fill materials: the use, misuse and disuse of case histories, Géotechnique 58, No. 7, 541-570, 2008.

Chlupáč, I., Brzobohatý, R., Kovanda, J., Stráník, Z., Geologická minulost České republiky, Academia, Praha, 2002.

ISSMG1, Recommendations of the ISSMGE for geotechnical laboratory testing, 1998.

Konečný, V., Interakce výsypek se stavbou. Dosavadní zkušenosti. Projekt reg.č. 103/99/0753 „Interakce výsypek se stavbou“, Most, 1999

Najser, J., Modelling of double porosity clays, Disertační práce, V přípravě, Praha, 2009.

Najser, J., Pooley, E., Springman, S., Modelling of double porosity clays in a small centrifuge, International journal of physical modelling in geotechnics, v tisku, 2009a.

Najser, J., Pooley, E., Springman, S. M., Laue, J., Boháč J., Mechanisms controlling the behaviour of double porosity clayfill – in situ and centrifuge study, v recenzním řízení, 2009b.

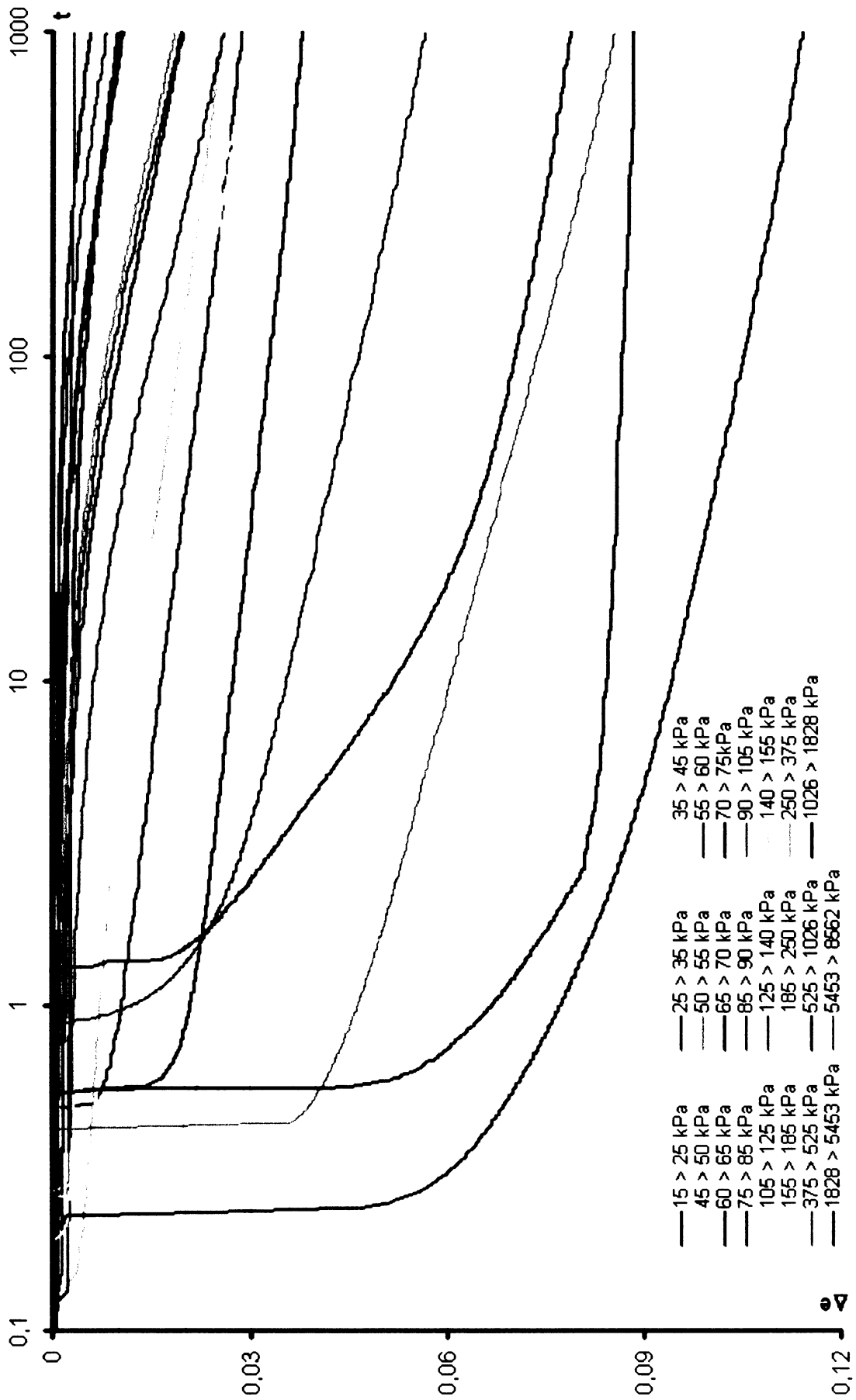
Springman, S., Modelling in Geotechnics – Script, Institute of Geotechnical Engineering, Zürich, 2005.

Taylor, R.N., Geotechnical Centrifuge Technology, London: Blackie Academic & Professional, 1995.

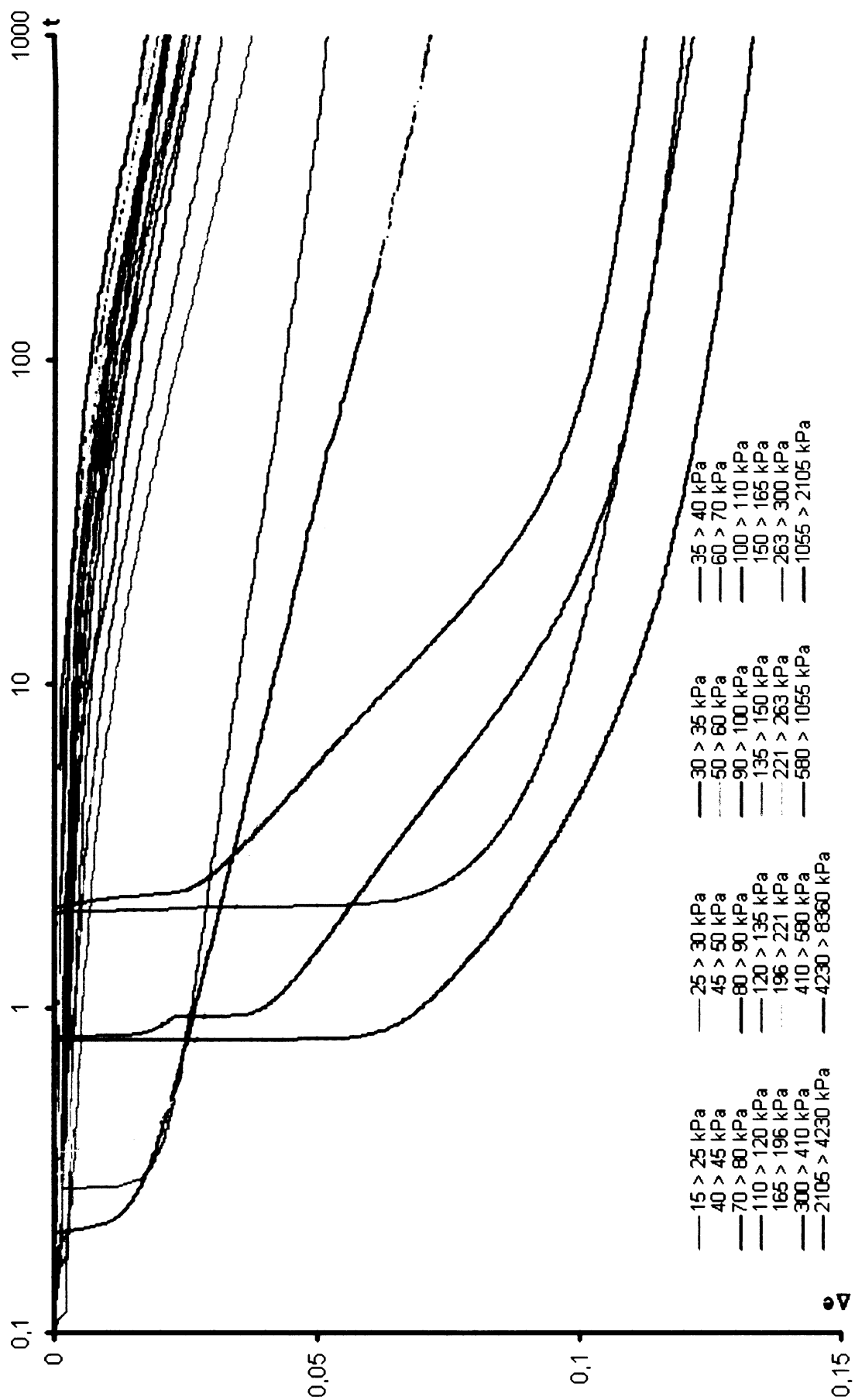
Valeš, J. a spol., Koncept řešení ekologických škod vzniklých před privatizací hnědouhlených těžebních společností v Ústeckém a Karlovarském kraji, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí, 00489-2002-240-S-2633 FNM ČR, int. č. 130/02, 2003.

PŘÍLOHA

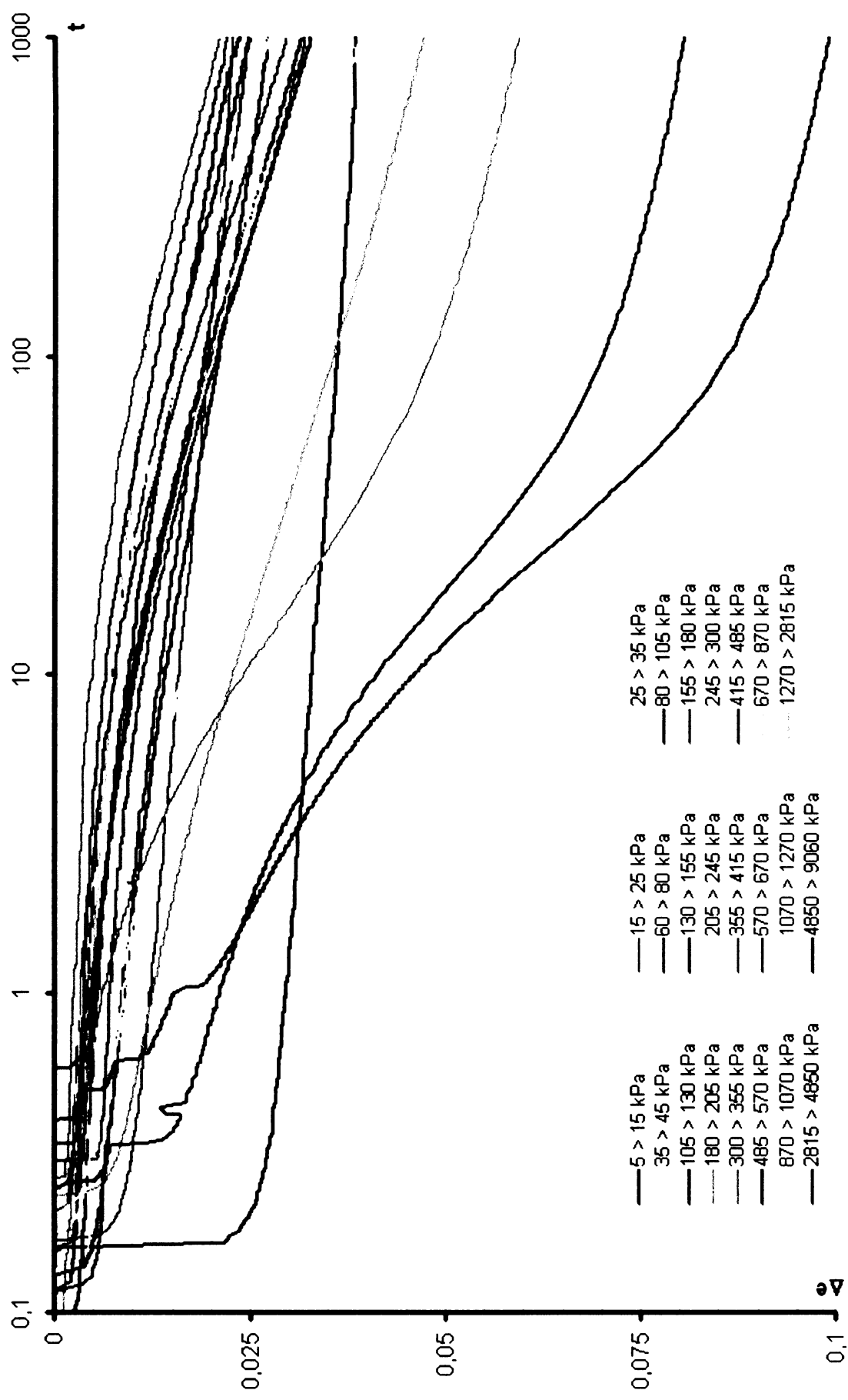
přítěžovací stupně pro oedoemetrickou zkoušku 1



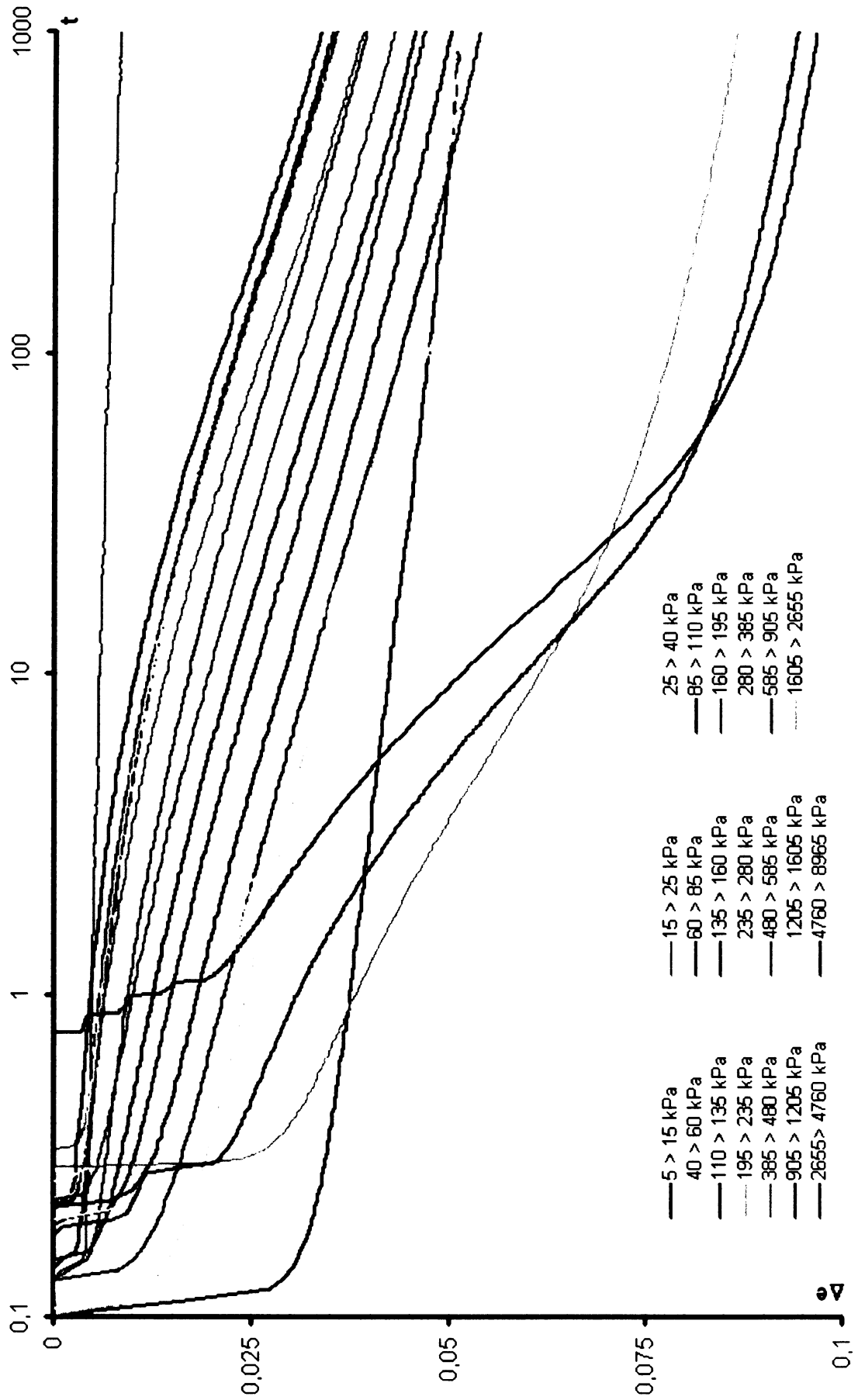
přítěžovací stupně pro oedoemetrickou zkoušku 2



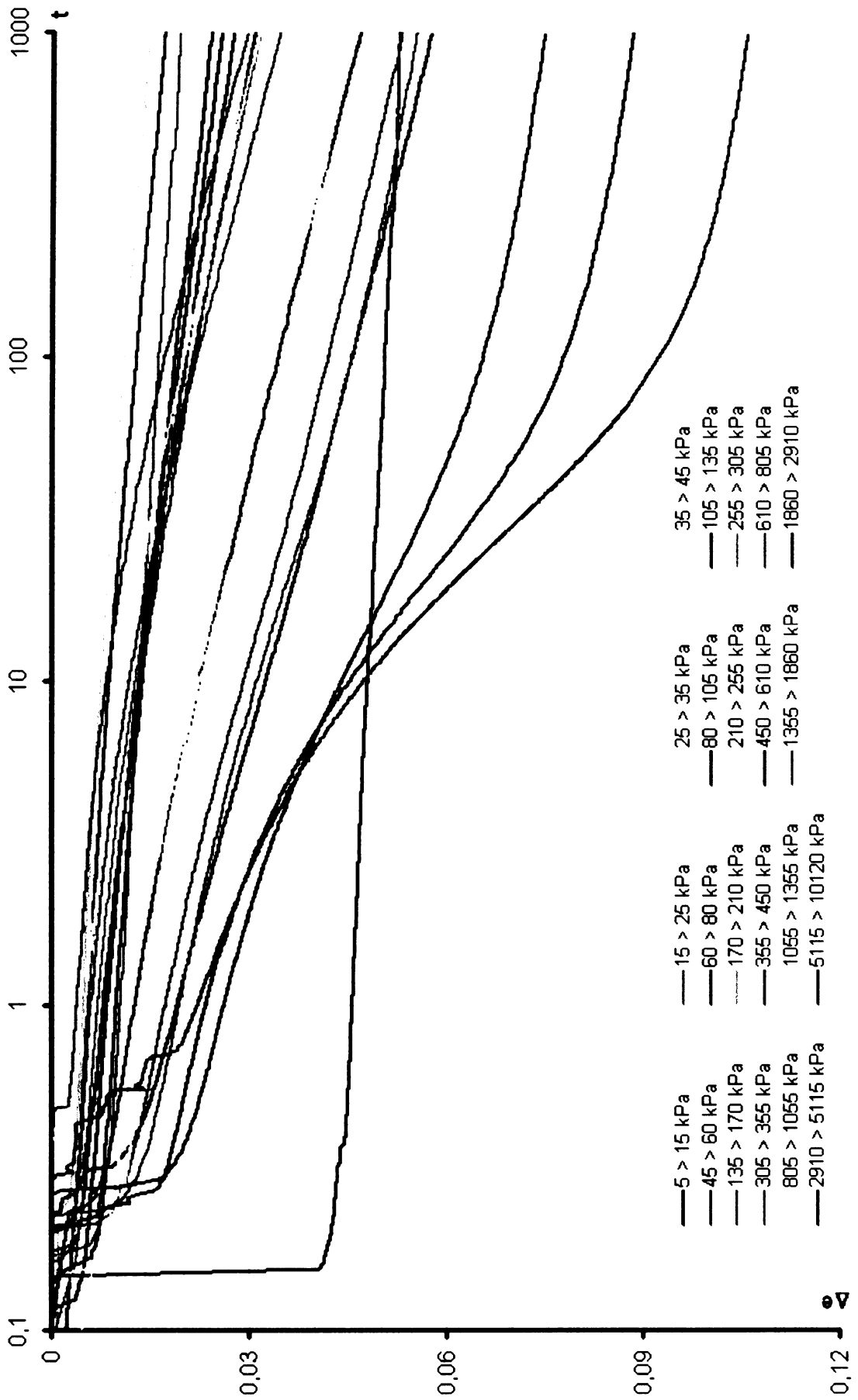
přítěžovací stupně pro oedometrickou zkoušku 3



přítěžovací stupně pro oedometrickou zkoušku 4



přítěžovací stupně pro oedoemetrickou zkoušku 5



přítěžovací stupně pro oedoemetrickou zkoušku 6

