

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie



Jan Libiš

**Sekundární stlačitelnost slínovců ze sesuvného území**  
**Prackovice**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jan Jerman, M.Sc., Ph.D.

Praha 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval vypracoval samostatně a že jsem uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne: 30. 7. 2024

.....

Jan Libiš

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli Mgr. Janu Jermanovi, M.Sc., Ph.D. za vedení této práce, za cenné rady, ochotu a trpělivost v průběhu tvorby celé bakalářské práce. Chtěl bych také poděkovat Manhovi Nguyen Duy M.Sc za rady ohledně laboratorních měření. Dále také RNDr. Janu Najserovi Ph.D. za revizi bakalářské práce. V neposlední řadě děkuji za podporu rodině a přátelům.

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá mechanickými vlastnostmi slínovců ze sesuvného území Prackovice v Českém středohoří, kde došlo v roce 2013 při výstavbě dálnice D8 k sesuvu Dobkovičky a kde nadále probíhají dlouhodobé creepové pohyby svahu ohrožující provozuschopnost dálnice. Cílem práce je rešerše studovaného území, spolu se shrnutím literatury týkající se jednoosé a především, sekundární stlačitelnosti. Praktická část práce se věnuje dlouhodobým laboratorním zkouškám sekundární stlačitelnosti (creepu). Vzorky použité pro laboratorní měření jsou rekonstituované křídové slínovce, které pochází z hloubky 17–19 m, těsně nad smykovou plochou sesuvu nacházející se v hloubce 16,5 m. Měřením byl stanoven index stlačitelnosti  $C_c$  a index sekundární stlačitelnosti  $C_\alpha$ . Výsledky byly porovnány s předešlými měřeními Pospíchala (2024), u kterého slínovce vykazují odlišné mechanické chování v podobě difuzního kolapsu. Výsledky vlastních měření nevykazují difuzní kolaps, který je pravděpodobně způsoben strukturou zeminy, vznikající při přípravě rekonstituovaného vzorku. Měřením se také potvrdila závislost  $C_\alpha$  na aplikovaném napětí.

## Abstract

The bachelor thesis deals with the mechanical properties of marlstones from the Prackovice landslide area in the Central Bohemian Highlands, where the Dobkovičky landslide occurred in 2013 during the construction of the D8 highway, and where long-term creep movements of the slope are still taking place, threatening the operability of the highway. The aim of the thesis is a literature review of researched area, along with primary, and in particular, secondary compression. The practical part of the thesis is devoted to long-term laboratory tests of secondary compressibility (creep). The samples used for the laboratory measurements are reconstituted Cretaceous marlstones, which originate from a depth of 17-19 m, just below the shear surface of the landslide located at a depth of 16.5 m. The compressibility index  $C_c$  and the secondary compressibility index  $C_\alpha$  were determined by measurements. The results were compared with previous measurements by Pospischal (2024), in which the marlstones indicate a different mechanical behaviour in the form of diffusion collapse. The results of my own measurements do not show diffusion collapse, which is probably due to the soil structure that is created during the preparation of the reconstituted sample. The measurements also confirmed the dependence of  $C_\alpha$  on the applied stress.

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Oblast zájmu .....	3
2.1	Geomorfologické poměry .....	3
2.2	Klimatické poměry .....	4
2.3	Geologické poměry .....	4
2.3.1	Geologické poměry studované oblasti .....	6
2.3.2	Inženýrskogeologické poměry .....	7
3	Jednoosá stlačitelnost .....	9
3.1	Sekundární stlačitelnost.....	12
3.1.1	Mechanismy sekundární stlačitelnosti .....	14
3.1.2	Index sekundární stlačitelnosti .....	17
3.1.3	Faktory ovlivňující sekundární stlačitelnost .....	18
3.1.4	Typy křivek sekundární stlačitelnosti.....	21
4	Metodologie .....	22
4.1	Zkoušená zemina, příprava rekonstituovaného vzorku .....	22
4.2	Popis oedometrického přístroje .....	24
4.3	Příprava vzorků do oedometrického přístroje .....	25
4.4	Dlouhodobé creepové zkoušky .....	26
4.5	Multi – stage creep zkouška.....	27
4.6	Výpočet čísla pórovitosti.....	27
4.7	Stanovení tEOP .....	29
5	Výsledky laboratorních měření.....	30
5.1	Data z předchozích prací.....	30
5.2	Křivka stlačitelnosti .....	31
5.3	Výsledky zkoušek sekundární stlačitelnosti .....	33
5.4	Výsledky multi – stage creep zkoušky .....	37
6	Diskuse.....	39
7	Závěr .....	41
8	Seznam použité literatury.....	43

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Sesuvné území na mapě ČR (A), přibližné sesuvné území spolu s červeně vyznačeným obvodem (B) – (upraveno podle geology.cz).....	3
Obr. 2 – Stratigrafické schéma České křídové pánve s červeně vyznačenými dochovanými souvrstvími v Českém středohoří – (upraveno podle Chlupáč, 2022). ....	5
Obr. 3 – Geologická mapa Prackovice nad Labem – (upraveno podle geology.cz).....	6
Obr. 4 – Mapa svahových deformací sesuvného území Prackovice – (převzato z Klimeš, 2018). ....	7
Obr. 5 – Tabulka vyčleněných geotypů - (převzato z Kycl et al., 2020). ....	8
Obr. 6 – Přehled výsledků v minulosti provedených laboratorních zkoušek mechaniky zemín – (převzato z Kycl et al., 2020). ....	8
Obr. 7 – Diagram znázorňující působící napětí a přetvoření v laboratorních podmínkách – (Atkinson, 2017).....	9
Obr. 8 – Odvodněné zatížení, charakteristické postupným zvýšením působícího napětí, doprovázené objemovou změnou. Hodnota totálního a efektivního napětí je stejná. Pórové tlaky jsou během odvodněného zatížení konstantní (A). Neodvodněné zatížení je charakterizováno rychlým nárůstem napětí, které vede ke zvýšení pórových tlaků. S přibývajícím časem se hodnota pórových tlaků u snižuje a působící napětí přebírá skelet zeminy (B) – (upraveno podle Atkinson, 2017). ....	10
Obr. 9 - Grafické znázornění konsolidace v závislosti na číslu pórovitosti a logaritmu efektivního napětí – (upraveno podle Mitchell a Soga, 2005).....	12
Obr. 10 – Znázornění průběhu deformace pro vzorky o různé výšce podle hypotézy A a B – (Varatharajan, 2011).....	13
Obr. 11 - Grafické znázornění průběhu primární a sekundární stlačitelnosti (creepu) v logaritmicím měřítku $\Delta\epsilon/\Delta\log t$ – (upraveno podle Mitchell a Soga, 2005). ....	14
Obr. 12 – Schématické znázornění jílových zemín, složených z deskovitých jílových minerálů, hrubozrnných částic, mikro a makropórů – (převzato z Kaczmarek a Dobak, 2017).....	14
Obr. 13 – Střídání vrstev oxidů křemičitého a oxidu hlinitého spolu s adsorbovanou vodou a kationty – (převzato z Le et al., 2012).....	15
Obr. 14 – Modifikovaná rovnice pro výpočet $C_\alpha$ – (převzato z Lambe a Whitman, 1969). ....	17
Obr. 15 - Stanovení indexu stlačitelnosti pomocí $C_\alpha = \Delta H/\log t$ – (převzato z Wood, 1990). ....	18
Obr. 16 – Hodnoty $C_\alpha$ pro jílovité zeminy – (převzato z Lambe a Whitman, 1969).....	18
Obr. 17 – Závislost $C_\alpha$ na plasticitě – (převzato z Nguyen Duy a Jerman, 2024). ....	20
Obr. 18 – Typy křivek sekundární stlačitelnosti – (převzato z Lo, 1961 v Pavlová, 2014). ....	21
Obr. 19 – Průběh zkoušky rekonstituovaného brněnského neogenního jílu s difuzním kolapsem – (převzato z Boháč a Pavlová, 2014). ....	22
Obr. 20 – Část vrtného jádra ze sesuvného území Prackovic požitá pro laboratorní měření (vlastní fotografie) a celé vrtné jádro z vrtu INP 1009 (červeně je označen odebraný úsek jádra pro laboratorní zkoušky z hloubky 17–19 m) – (autor, Jan Jerman). ....	22
Obr. 21 - Rozdružený vzorek před zalitím destilovanou vodou.....	23
Obr. 22 - Homogenizovaný, vodou saturovaný vzorek o konzistenci pasty před oedometrickou zkouškou. ....	23
Obr. 23 – Schéma oedometrické krabice – (upraveno podle ČSN, 2017).....	24
Obr. 24 – Casagrandeho metoda stanovení tEOP – (převzato z Head, 1994).....	29
Obr. 25 - Metoda prokládání úseček ke stanovení tEOP. ....	30
Obr. 26 – Křivka NCL pro creep B a C sestavená podle čísla pórovitosti na tEOP a čísla pórovitosti (Final) s příspěvkem creepu.....	32
Obr. 27 – Křivka NCL pro creep multi – stage sestavená podle čísla pórovitosti na tEOP a čísla pórovitosti (Final) s příspěvkem creepu. ....	32

Obr. 28 – Porovnání NCL pro creep B, C a multi – stage. ....	33
Obr. 29 – NCL pro creep A a 4 podle finálního čísla pórovitosti. ....	33
Obr. 30 – Průběh dlouhodobých zkoušek pro creepu A, B, C a 4. ....	35
Obr. 31 – Průběh zkoušek při vyšším napětí. ....	36
Obr. 32 – Vyjádření změny čísla pórovitosti od tEOP. ....	36
Obr. 33 – Závislost $C_\alpha$ na napětí vypočítané podle finálního $C_\alpha$ pro každou zkoušku s vyznačenou dobou trvání. ....	37
Obr. 34 – Průběh zkoušek multi – stage creep testu. ....	38
Obr. 35 - Vyjádření změny čísla pórovitosti od tEOP pro multi – stage creep test. ....	38
Obr. 36 – Závislost $C_\alpha$ na aplikovaném napětí, data znázorněna v následující tabulce ....	39
Obr. 37 – Schéma poklesu čísla pórovitosti pro zkoušku C před napětím 300 kPa. ....	40
Obr. 38 – Porovnání $C_\alpha$ pro všechny provedené zkoušky od tEOP po 7 dní. ....	41

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Koefficient konsolidace ve vztahu rychlosti konsolidace – (upraveno podle Falowo a Dahunsi, 2020). ....	11
Tab. 2 – Rozdílné vyjádření $C_\alpha$ v literárních publikacích. ....	17
Tab. 3 – Přehled provedených laboratorních zkoušek creepu. ....	27
Tab. 4 – Laboratorní měření creepu z diplomové práce Pospíchala (2024). ....	31
Tab. 5 – Hodnoty indexu stlačitelnosti vypočtené pomocí čísla pórovitosti na tEOP a konečného čísla pórovitosti s příspěvkem creepu (Final) se sklonem UL. ....	33
Tab. 6 – Vstupní parametry pro jednotlivé zkoušky creepu. ....	34
Tab. 7 – Hodnoty indexu stlačitelnosti pro dlouhodobé creepové zkoušky. Červeně jsou vyznačeny křivky s difuzním kolapsem. ....	37
Tab. 8 – Hodnoty $C_\alpha$ pro multi – stage creep test. ....	39

## Seznam symbolů

$A$	plocha
$a_v$	koeficient stlačitelnosti
$c_v$	koeficient konsolidace
$C_c$	index stlačitelnosti
$C_\alpha$	index sekundární stlačitelnosti
$C_{\alpha e}$	modifikovaný index stlačitelnosti (e)
$C_{\alpha \varepsilon}$	modifikovaný index stlačitelnosti ( $\varepsilon$ )
$CF$	obsah jílové frakce
$e$	číslo pórovitosti
$EOP$	konec konsolidace
$H$	výška
$k_h$	hydraulická vodivost
$m_w$	hmotnost vody
$m_d$	hmotnost pevné fáze
$NCL$	křivka stlačitelnosti
$p_e$	překonsolidační napětí
$PI$	index plasticity
$t$	čas
$u$	pórové tlaky
$UL$	čára odlehčení
$v$	objem
$w$	vlhkost
$w_L$	vlhkost na mezi tekutosti
$w_0$	vlhkost na začátku zkoušky
$z$	drenážní dráha
$\gamma_w$	objemová tíha vody
$\varepsilon$	přetvoření
$\varepsilon_v$	vertikální přetvoření
$\rho_d$	objemová hmotnost suchého vzorku
$\rho_s$	hustota pevných částic
$\sigma$	totální napětí
$\sigma'$	efektivní napětí
$\sigma_h$	horizontální napětí
$\sigma_v$	vertikální napětí



# 1 Úvod

Zeminy jsou třífázovým systémem, který je složený z pevných částic, vody a vzduchu obsažených v pórech. Působením vnějšího napětí dochází k objemovým změnám (stlačení), řízeným transportem vody. Zeminy vykazují po primárním stlačení sekundární stlačitelnost, která vede k pomalé, ale dlouhodobé deformaci, ačkoliv nedochází ke zvýšení působícího napětí. Toto chování je významné především u jemnozrnných zemin s obsahem jílových minerálů. Porozumění sekundární stlačitelnosti je důležité pro optimalizaci řešení řady geotechnických problémů, mezi které patří dlouhodobé sedání budov a násypů liniových staveb (dálnice a silnice). U budov může docházet k nerovnoměrnému sedání, které vede k porušení jejich stability. Creep také způsobuje pomalé svahové pohyby, které vedou k dlouhodobému ovlivnění stability svahu. Příkladem svahového pohybu, kde dochází ke creepovým pohybům, je velmi pomalé ploužení bazaltových bloků po plastickém podloží složeném z křídových slínovců, odehrávající se na sesuvném území Prackovice.

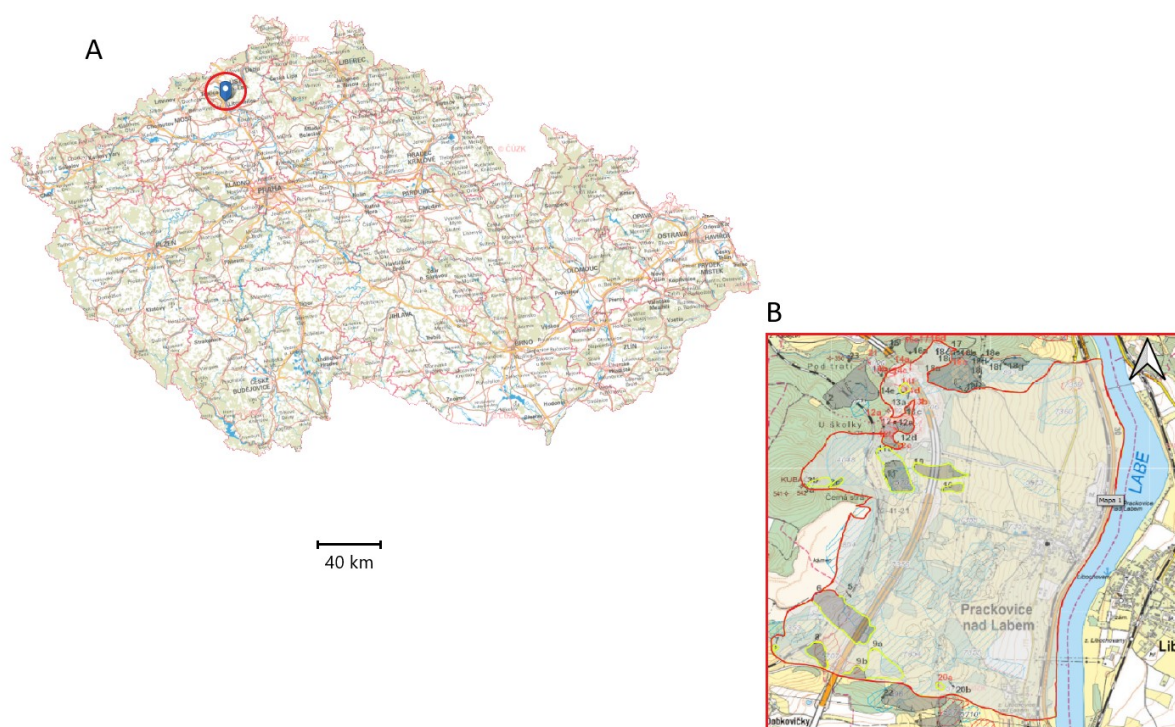
Teoretická část bakalářské práce se zabývá geologickou a inženýrskogeologickou rešerší oblasti zájmu, tedy sesuvného území Prackovice, které se nachází v oblasti Českého středohoří. V oblasti došlo při výstavbě úseku dálnice D8 k sesuvu, který přehradil nově vybudovaný segment dálnice, také zde nadále probíhají dlouhodobé creepové pohyby svahu, ohrožující provozuschopnost dálnice. Smykovou plochu v hloubce 16,5 metru sesuvu tvoří slínovce křídového stáří, jejichž vzorek byl odebrán v podobě vrtného jádra z hloubky 17–19 m. Hlavní část rešerše je dále věnována jednoosé primární, a především sekundární, stlačitelnosti (creepu). Definicí creepu je pomalé přetvoření bez přírůstku efektivního napětí, následující po ukončení primárního stlačení (konsolidace). Svými mechanismy, které se odehrávají v menších měřítkách, je zcela odlišný od primární stlačitelnosti, řízené primárně transportem vody způsobeného nárůstem hydrostatického tlaku. V rámci práce jsou popsány mechanismy, vedoucí k sekundární stlačitelnosti, metody kvantifikace naměřených hodnot a faktory, kterými je ovlivněna. Dále jsou popsány druhy křivek, které jsou získány pomocí laboratorních měření a difuzní kolaps struktury.

Rekonstituované vzorky slínovců jsou použity při praktické části pro laboratorní zkoušky v oedometrickém přístroji ke stanovení dlouhodobého creepu při různém napětí. Součástí měření je dále jeden multi – stage creep test. Důraz byl kladen především na stanovení indexu sekundární stlačitelnosti  $C_{\alpha}$  a jeho závislosti na napětí. Výsledky byly porovnány s daty naměřenými na identickém vzorku zeminy v rámci diplomové práce Pospíchala (2024), u kterých dochází během laboratorních měření k náhlému zrychlení deformace. Tento proces je popsán jako difuzní kolaps, který je způsoben porušením slabší struktury zeminy. Cílem práce je určení indexu stlačitelnosti  $C_c$  a sestrojení  $NCL$ , stanovení indexu sekundární stlačitelnosti  $C_{\alpha}$  a analýza jeho závislosti na napětí. Dalším cílem práce je potvrzení nebo vyvrácení výsledků Pospíchala (2024), který pozoroval difuzní kolaps na vzorcích rekonstituovaných přirozených zemin. Difuzní kolaps by mohl být způsoben kolapsem struktury zeminy, která vzniká při přípravě rekonstituovaného vzorku nedostatečnou homogenizací a urychlením procesu

snižování počáteční vlhkosti pro zkoušku při jiné než pokojové teplotě, vedoucí k nerovnoměrnému vysychání vzorku.

## 2 Oblast zájmu

Sesuvné území Prackovice se nachází v Ústeckém kraji, okresu Litoměřice, na západ od obce Prackovice nad Labem. Jeho pozice v rámci České republiky je vyobrazena na Obr. 1, spolu s detailním pohledem a hranicemi sesuvného území. Širší sesuvné území klasifikuje do tří katastrálních celků – Dobkovičky, Litochovice nad Labem a Prackovice nad Labem. Jedná se o jedno s největších sesuvných území v České republice s rozlohou 3586 km<sup>2</sup>. Studovaným územím prochází segment dálnice D8 v úseku Lovosice – Řehlovice (Stemberk et al., 2016). Na východě od dálnice D8 se nachází aktivní lom Dobkovičky. Mezi lomem a dálničním segmentem prochází úsek železnice Úpořiny – Chotiměř (Stemberk et al., 2016).



Obr. 1 – Sesuvné území na mapě ČR (A), přibližné sesuvné území spolu s červeně vyznačeným obvodem (B) – (upraveno podle geology.cz).

### 2.1 Geomorfologické poměry

Studovaná oblast spadá do Hercynského systému, geomorfologické provincie Česká vysočina, Krušnohorské soustavy, Podkrušnohorské podsoustavy, Českého středohoří. České středohoří je dále rozděleno na dva podcelky. Verneřické středohoří v SV části a Milešovské středohoří na JZ, do kterého spadá širší sesuvné území. Milešovského středohoří zaujímá celkovou plochu o rozloze 544,73 km<sup>2</sup>. Morfologicky se jedná o plochou hornatinu až členitou vrchovinu se střední výškou 331,7m a středním sklonem 6°44'. Charakteristickým znakem pro oblast jsou topografické elevace tvořené tektonicky vyzdviženými krami, které vystupují nad zarovnaný

povrch. Nejvyšším bodem Milešovského středohoří je hora Milešovka s nadmořskou výškou 836,6 m n. m (Demek et al., 2006).

Studované území je na východě omezeno hladinou řeky Labe, na severu bezejmenným potokem až k tunelu Prackovice. Ze západu je směrem k jihu postupně omezeno vrcholem Debus, vrcholem Kubačka a kamenolomem Dobkovičky. V jižní části je území omezeno spojnici vedoucí od Litochovic nad Labem ke kamenolomu Dobkovičky. Nejvyšším bodem studovaného území je kopec Kubačka s nadmořskou výškou 542,5 m n. m., ležící přibližně 2 km na Z od Prackovic nad Labem. Na jeho JV svahu se nachází lom Dobkovičky (Demek et al., 2006). Nejnižším bodem zkoumaného území je při hladině řeky Labe, která se zařezává do tektonicky vyzdviženého terénu a vytváří tak údolí hluboké až 500 m (Raška a Cajz, 2016). Segmenty sesuvného území mají proměnlivé skony svahů. Nejvyšší sklony 45° se nachází na SV a nejnižší hodnoty 3 – 9° jsou na J při hladině Labe (Stemberk et al., 2016).

## 2.2 Klimatické poměry

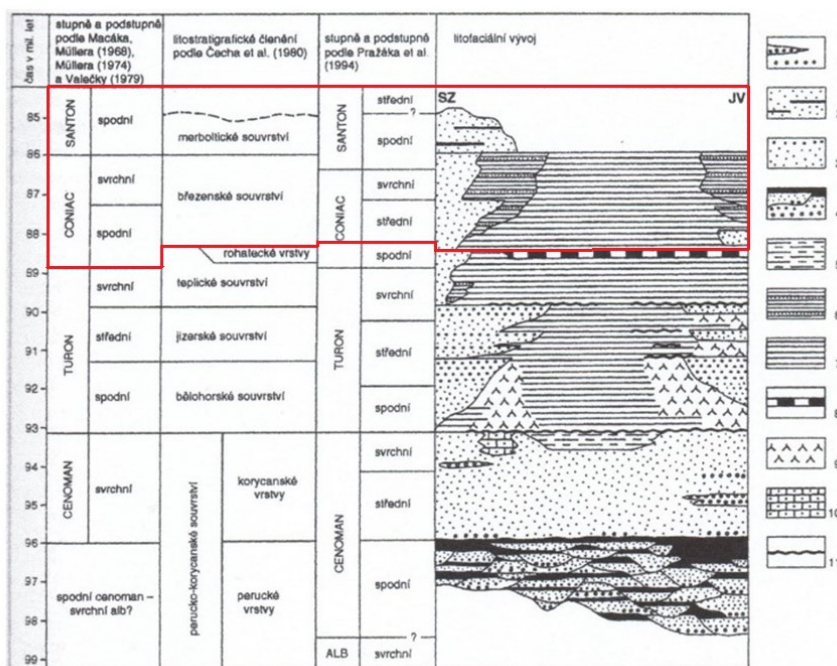
Zkoumané území spadá podle klimatologické klasifikace podle Quitta (Quitt, 1971) do mírně teplé klimatické oblasti (MT11). Klimatické pásmo MT11 se na území České republiky vyskytuje v oblastech se střední nadmořskou výškou. Typickou charakteristikou je kratší a teplejší jaro, po kterém následuje dlouhé, suché a teplé letní období. Podzim je krátký a mírně teplejší. V zimě se zde vyskytuje krátkodobý sněhový pokryv. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 6–10 °C a průměrný uváděný srážkový úhrn činí 550–600 mm/rok.

## 2.3 Geologické poměry

Český masiv je pozůstatkem v minulosti rozsáhlého variského orogenu, k jehož vyvrásnění došlo v období mezi 380–300 miliony let (Chlupáč, 2002). Jedná se o jeden z největších na povrch vystupujících souvislých útvarů hercynského pohoří (Kachlík, 2003). Kromě území České republiky, na kterém zaujímá většinu své rozlohy, se dají jeho fragmenty pozorovat ve zbytku střední Evropy, Anglii a Francii. (Chlupáč, 2002). Vznik Českého masivu je spojen s kolizí litosférických desek v období středního devonu až svrchního karbonu. Ke kolizi došlo mezi kontinentem Gondwana, který v tehdejší době zaujímal většinu plochy jižní polokoule a Laurusí na severu. Během pohybu kontinentů docházelo postupně k uzavírání Rheického oceánu, které vyvrcholilo variskou orogenezí. Český masiv je tvořen převážně horninami prekambriického a paleozoického stáří, na které nasedá mladší horninový pokryv (Chlupáč, 2002).

Studované území se nachází v severovýchodní části Českého masivu, na kontaktu třetihorních vulkanitů a křídových sedimentů v oblasti Českého středohoří. Horninový podklad zde tvoří převážně spodně proterozoické metamorfované horniny a granitoidní plutony podkrušnohorského krystalinika. Po variské orogenezí byly pro vývoj oblasti klíčové především události v období křídý a terciéru, kdy docházelo k výrazné proměně charakteru oblasti.

V nejnižším útvaru svrchní křídý (100–94 Ma) dochází k cenomanské transgresi. Ta měla za následek zdvih úrovně hladiny oceánů o 200–300 metrů. Nízko položené části pevniny byly zaplaveny a vyplněny marinními sedimenty. Tento proces vedl k vytvoření největší zachovalé pánve na území České republiky tzv. České křídové pánve. V dnešní době pokrývá pánev především severní část Českého masivu. V Českém středohoří máme dochované dvě nejmladší souvrství křídového útvaru (Obr. 2). Souvrství březenské je zde zachováno díky pokryvu terciérních vulkanitů, které ho ochránily před erozí. Je tvořeno vrstvami pískovců, vápenců, vápnitých jílovců a slínovců. Nejmladší merboltické souvrství podlešlo silné erozi a je zachováno v menší míře. Dominují zde uloženiny pískovců s jílovitou matrix. K jejich ukládání docházelo při regresi moře (Chlupáč, 2002).



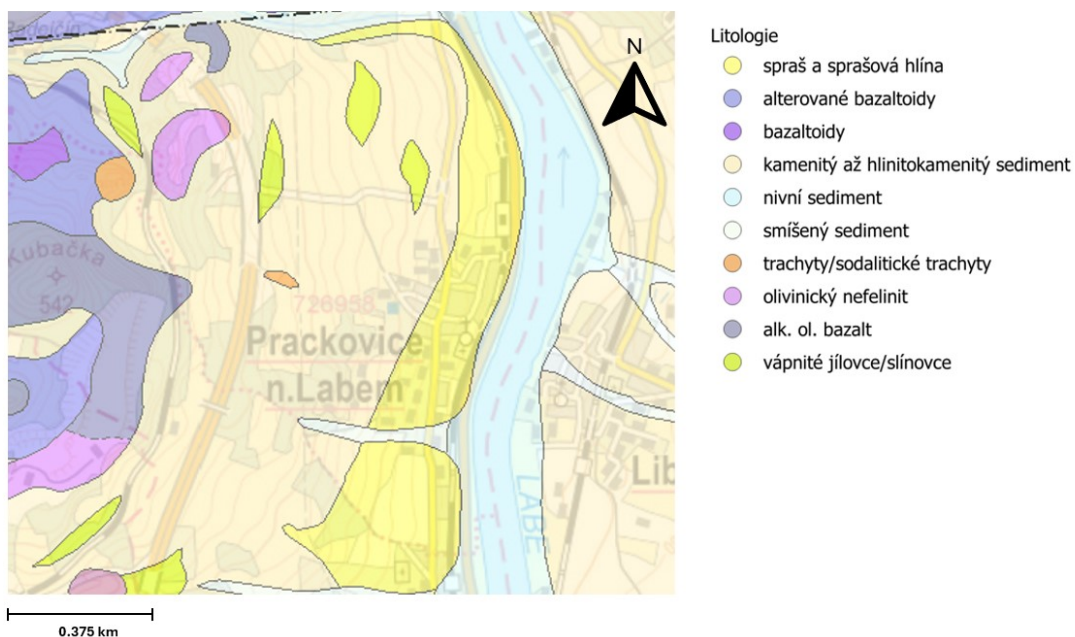
Obr. 2 – Stratigrafické schéma České křídové pánve s červeně vyznačenými dochovanými souvrstvími v Českém středohoří – (upraveno podle Chlupáč, 2002).

Vývoj v oblasti v období terciéru byl silně ovlivněn alpiským vrásněním. Při formování alpsko-karpatské oblasti se procesy alpiského vrásnění projevovaly v Českém masivu saxonskou zlomovou tektonikou. V Českém středohoří dochází k otevírání oháreckého rifu a obnovení vulkanické činnosti.

Vulkanický komplex Českého středohoří je spojen s riftogenezí. V první fázi zde dochází k výlevům bazanitů. Po nich následují výlevy trachybazaltů a ukládání vulkanoklastik spolu s intruzemi intermediálních a kyselých hornin. Vulkanismus v oblasti byl zakončen intruzemi nefelinických bazanitů ve formě ložních žil. Tvary sopečných těles byly od jejich vzniku postupně erodovány. Dnešní krajinu tak ztvárňují zbytky výplní přívodních drah a obnažená podpovrchová tělesa (Chlupáč, 2002).

### 2.3.1 Geologické poměry studované oblasti

Nejspodnější horninový podklad celé oblasti je tvořen horninami podkrušnohorského krystalinika. Na ně nasedají uloženiny svrchní křídy, které zaujímají většinu plochy sesuvného území (Obr. 3). Tyto křídové sedimenty převažují v podloží od nadmořské výšky 370–320 m až k řece Labe. Dominantně jsou zde zastoupeny vápnité jílovce, slínovce a prachovce, do kterých jsou vmístěny fragmenty vulkanických hornin. Tyto fragmenty se nazývají vulkanoklastika. Jsou charakteristické svou porézni texturou a vlastnostmi odpovídajícími soudržné zemině (Klimeš, 2018).



Obr. 3 – Geologická mapa Prackovice nad Labem – (upraveno podle geology.cz).

Křídové slínovce se nachází v podloží celého sesuvného území. Utváří mocnou vrstvu, která může být zastižena až 30 metrů pod povrchem. Mají šedou barvu a velmi nízkou propustnost. Jsou uloženy téměř vodorovně pod úhlem 5 – 15° směrem k řece Labe (Stemberk et al., 2016). Podle normy ČSN 73 6133 se řadí mezi poloskalní horniny R5 – R6, případně do zemin třídy F7 – F8 (Rotová a Alferi, 2017). Při intenzivním zvětrávání ztrácí slínovce svou tvrdost. Pokud dojde k jejich nasycení vodou, stávají se silně plastickými. Tato vlastnost může způsobovat porušení stability svahu a umožňuje vznik svahových pohybů (Klimeš, 2018).

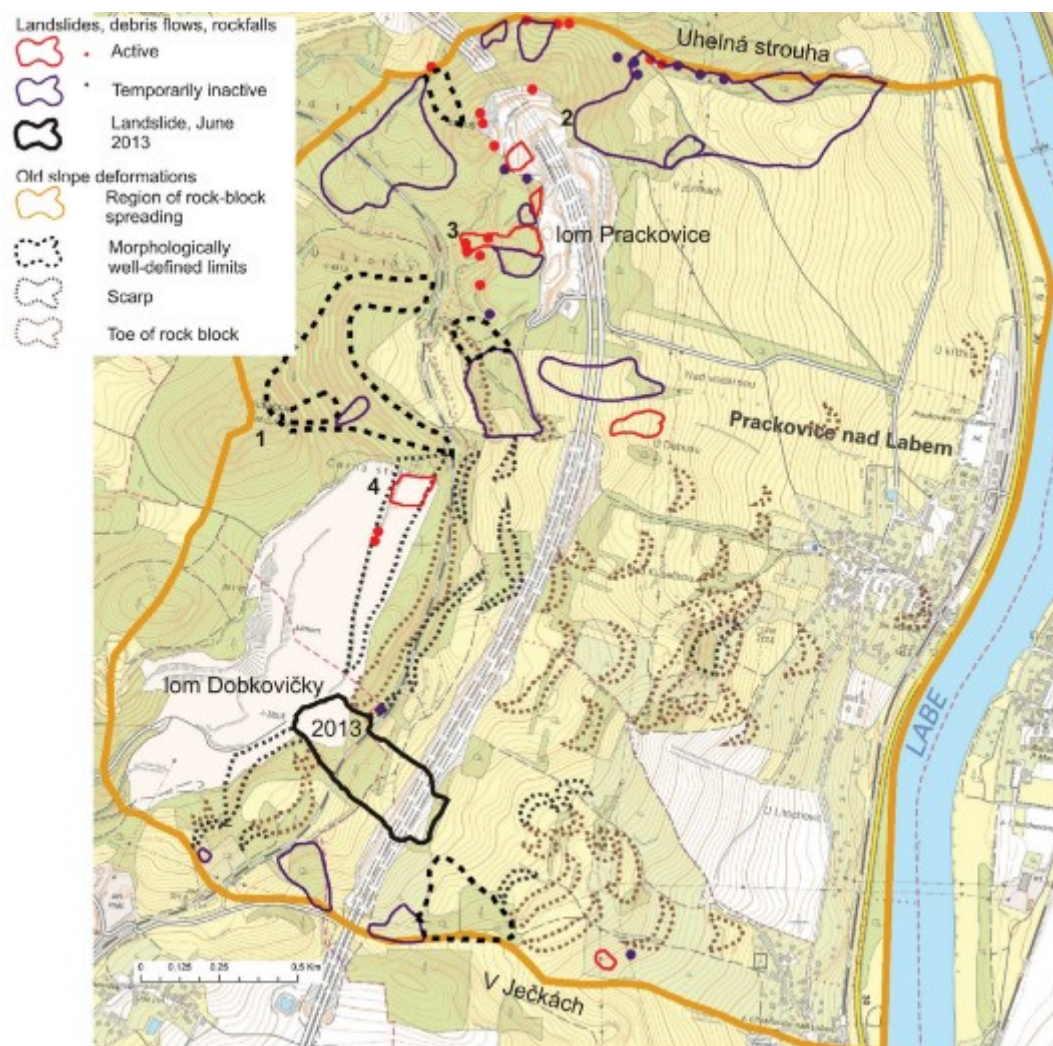
Do křídových sedimentů jsou vmístěny terciární intruze vulkanitů. Nachází se především na západě a severozápadě studované oblasti. Jsou zde zastoupeny především bazaltické horniny a pyroklastické tufy. Nejzastoupenějšími typy vulkanických hornin jsou olivinické bazalty, leucicity a nefelinity. Horniny se v rámci různých částí sesuvného území odlišují svou pevností a stupněm zvětrávání. Tělesa skalních hornin tvoří nejvyšší topografické elevace s nejstrmějšími svahy v oblasti. Přechod mezi vulkanity a slínovci je dán snížením sklonu svahu. Jejich hranice je překryta hlinitokamennou sutí, která postupně přechází do svahových hlín (Stemberk et al., 2016).



Nejmladší vrstvou jsou kvartérní kamenité až hlinitokamenité deluviální sedimenty o mocnosti až 20 m (Stemberk et al., 2016). U toku řeky Labe se dále vyskytují sprašové hlíny. V oblasti okolo Litochovic nad Labem a Prackovic nad Labem se dále nacházejí zbytky štěrkopískových teras řeky Labe.

### 2.3.2 Inženýrskogeologické poměry

Oblast je svými geologickými podmínkami a morfologií silně náchylná na svahové pohyby (Obr. 4). Vulkanity utváří nejvyšší topografické elevace, které zakrývají mladší křídové uloženiny a tím zamezují jejich erozi. Křídové sedimenty tak mohou zachovávat strmější sklon svahu, než odpovídá jejich parametrům a stávají se náchylnými k svahovým deformacím. V okolí lávových proudů a lakolitů se v měkčích okolních horninách nachází oddělené bloky vulkanitů, které jsou náchylné na vznik blokových pohybů. Díky jejich odolnosti proti zvětrávání mohou být bloky transportovány na větší vzdálenost. Utváří schodovitý charakter svahu. Hlavní svahové deformace probíhaly v pleistocénu. V dnešní době se většina svahových pohybů klasifikuje jako fosilní (Matula a Pašek, 1986).



Obr. 4 – Mapa svahových deformací sesuvného území Prackovice – (převzato z Klimeš, 2018).

V oblasti rozlišujeme dva typy sesuvů. Hluboké sesuvy, které jsou v dnešní době z velké části považované za fosilní. Lze je charakterizovat jako blokové rozvolňování svahů, kdy se jednotlivé bloky pohybují na plastickém podkladu (Klimeš, 2018). Jejich pohyb je velmi pomalý, s rychlostmi naměřenými pomocí inklinometrů pohybujícími se mezi 1 mm až 8 mm za rok (Jerman, 2022). Druhým typem svahových deformací jsou mělké sesuvy, které vznikly jako důsledek narušení stability hlubokými typy deformací. Odlišují se jak jejich hloubkou založení, tak mechanismem transportu materiálu, při kterém dochází k přemístění svrchnější části svahových sedimentů (Klimeš, 2018). Tloušťka mělkých sesuvů v oblasti je v rozmezí mezi 2–10 m (Jerman, 2022). Řadí se mezi ně i sesuv Dobkovičky, který v roce 2013 přehradil při výstavbě segment dálnice D8 (Klimeš, 2018).

Ve studované oblasti bylo stanoveno celkem 11 geotypů, tedy jednotek s podobnými inženýrskogeologickými parametry. Pět z nich je zařazeno do období kvartéru (GT7 až GT11) a šest (GT1 až GT6) do předkvartérních období (Obr. 5). Výsledky laboratorních měření těchto geotypů jsou na Obr. 6 (Kycl et al. 2020).

<b>GT1</b>	<b>BOC</b>	Bazalt olivinický kompaktní popř. alterovaný
<b>GT2</b>	<b>VLK</b>	Vulkanoklastika až hyaloklastity
<b>GT3</b>	<b>PHO</b>	Sodalitický fonolit
<b>GT4</b>	<b>PG</b>	Paleogenní jíly s vložkami alterovaných vulkanoklastik, uhelné jíly
<b>GT5</b>	<b>KBZa</b>	Slínovce Březenského souvrství rozložené - olivově zelené
<b>GT6</b>	<b>KBZ</b>	Slínovce Březenského souvrství-šedé
<b>GT7</b>	<b>Qboc</b>	Bazaltové bloky, creepem posunutý bazalt
<b>GT8</b>	<b>Qk</b>	Kamenité svahoviny, písek s kameny
<b>GT9</b>	<b>Qjk</b>	Jíl/hlína s kameny, popř. písek hlinitý
<b>GT10</b>	<b>Qj</b>	Jíl, hlína, hlína písčité
<b>GT11</b>	<b>Qnav</b>	Navážky, výsypky, násypy, antropenní sedimenty

Obr. 5 – Tabulka vyčleněných geotypů - (převzato z Kycl et al., 2020).

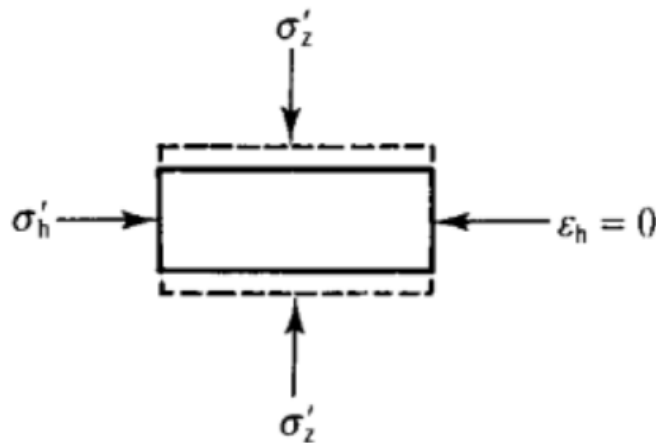
	Geotyp	Počet křívek zrnitosti	Ø Obsah jílové frakce [%]	Počet atterbergových mezí	Ø Mez tekutosti [%]	Ø Mez plasticity [%]	Ø Index plasticity [%]	Počet vrcholových zkoušek	Ø Vrcholový úhel vn. tření [°]	Ø Vrcholová soudržnost [kPa]	Počet reziduálních zkoušek	Ø Reziduální úhel vn. tření [°]	Ø Reziduální soudržnost [kPa]
<b>GT1</b>	<b>BOC</b>	1	3,0	1	35,3	26,8	8,5						
<b>GT2</b>	<b>VLK</b>	3	17,7	2	75,1	35,3	39,9	1	21,0	26,0			
<b>GT3</b>	<b>PHO</b>	1	17,0	1	77,4	47,3	30,1						
<b>GT4</b>	<b>PG</b>	7	17,6	6	61,5	32,8	28,7						
<b>GT5</b>	<b>KBZa</b>	38	31,8	37	65,1	29,0	36,1	7	21,5	77,1	4	16,5	9,6
<b>GT6</b>	<b>KBZ</b>	40	32,3	37	61,4	26,4	35,0	12	23,4	49,5	2	34,0	10,8
<b>GT7</b>	<b>Qboc</b>	2	13,5	1	59,9	31,2	28,7						
<b>GT8</b>	<b>Qk</b>	2	6,0	2	41,4	28,0	13,4						
<b>GT9</b>	<b>Qjk</b>	9	21,1	11	53,0	28,9	24,1	2	28,5	6,2	1	8,5	0
<b>GT10</b>	<b>Qj</b>	9	27,4	9	61,8	31,6	30,2	2	25,6	14,5			

Obr. 6 – Přehled výsledků v minulosti provedených laboratorních zkoušek mechaniky zemin – (převzato z Kycl et al., 2020).



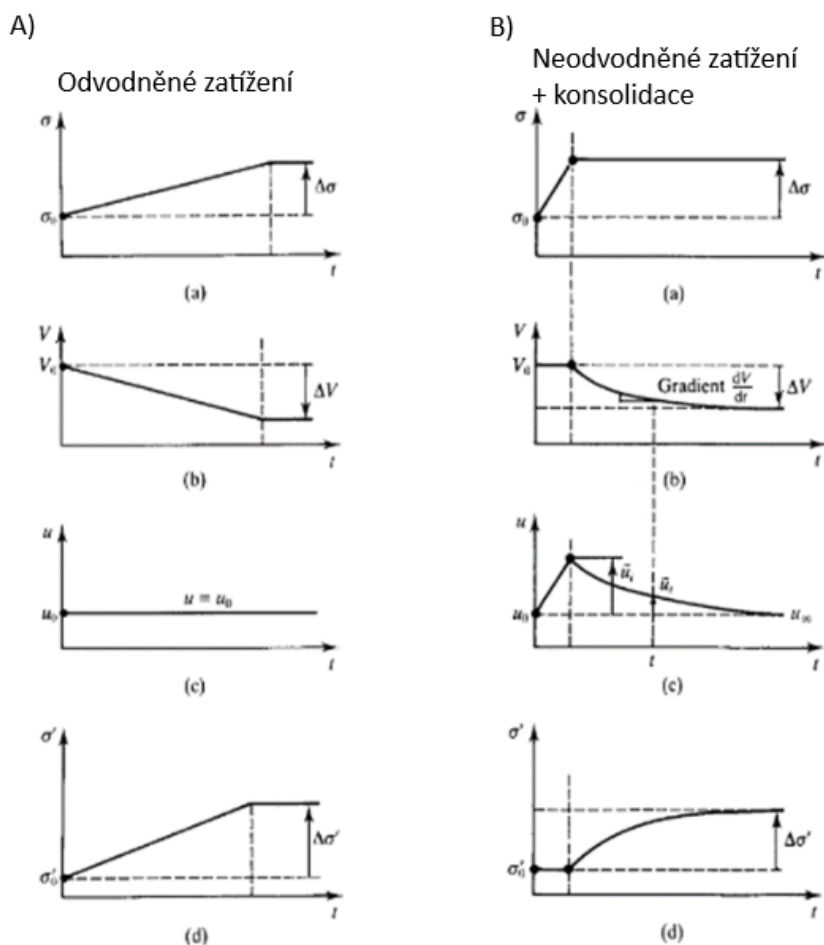
### 3 Jednoosá stlačitelnost

Stlačitelnost, popsaná Karlem von Terzaghim, je jedním z hlavních principů mechaniky zemin (Mitchell a Soga, 2005). Jedná se o přemístění zrn a změnu objemu zeminy díky působení napětí a je definována jako vztah mezi působícím napětím a objemovým přetvořením. V případě jednoosé stlačitelnosti se jedná o deformaci probíhající pouze v jednodimenzionálním směru. Aplikované napětí na zeminy je v tomto případě vertikální  $\sigma_v$ , horizontální  $\sigma_h$  napětí je nenulové a ve standardních laboratorních podmínkách (oedometrická zkouška) není měřeno. Celkové objemové přetvoření  $\varepsilon$  je rovné přetvoření ve vertikálním směru  $\varepsilon_v$  (Atkinson, 2017). Přetvoření při laboratorním měření je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 – Diagram znázorňující působící napětí a přetvoření v laboratorních podmínkách – (Atkinson, 2017).

Ke změně objemu dochází v důsledku zatížení. Zatížení může probíhat v odvodněných nebo neodvodněných podmínkách. Při odvodněném zatížení je totální napětí  $\sigma_v$  aplikováno postupně. Lépe řečeno dostatečně pomalu, aby nedocházelo ke zvýšení pórových tlaků v zemině. Ve vodě, která se přirozeně vyskytuje v saturované zemině, je pouze pórový tlak rovný výšce vodního sloupce (hydrostatický). Vzhledem k dostatku času pro drénování zůstává jeho hodnota konstantní a změna objemu nastává okamžitě – ekvivalentně zvyšovanému totálnímu napětí. Změna efektivního napětí je tedy během odvodněného zatížení rovna změně totálního napětí. Neodvodněné zatížení je charakteristické rychlým nárůstem  $\sigma_v$  a zvýšením pórového tlaku vody způsobeným nedostatkem času pro její transport. Zvýšením tlaku dochází ke vzniku hydraulického gradientu, který je doprovázen odtokem vody a objemovou změnou, dokud systém nedojde do rovnovážného stavu. Tento proces, nazýváme konsolidace (Atkinson, 2017). Schéma odvodněného a neodvodněného zatížení + konsolidace je znázorněn na Obr. 8.



Obr. 8 – Odvodněné zatížení, charakterické postupným zvýšením působícího napětí, doprovázené objemovou změnou. Hodnota totálního a efektivního napětí je stejná. Pórové tlaky jsou během odvodněného zatížení konstantní (A). Neodvodněné zatížení je charakterizováno rychlým nárůstem napětí, které vede ke zvýšení pórových tlaků. S přibývajícím časem se hodnota pórových tlaků u snižuje a působící napětí přebírá skelet zeminy (B) – (upraveno podle Atkinson, 2017).

Základem pro porozumění problematice konsolidace je princip efektivních napětí, které vychází z rovnice (1), kde  $\sigma$  je totální napětí,  $\sigma'$  efektivní napětí a  $u$  jsou pórové tlaky (Atkinson, 2017).

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

Totální napětí, generované vnějším zatížením, je součtem efektivního napětí působícího na skelet zeminy a pórových tlaků, které jsou přítomny v nasycené zemině. Dále pak Darcyho zákon, který popisuje rychlost proudění vody skrze póry při určitém hydraulickém gradientu. Podle Terzagioho je právě proudění vody za jednotku času klíčovým mechanismem pro konsolidaci (Mitchell a Soga, 2005). Konsolidace probíhá po neodvodněném zatížení. Při prvotním zatížení nejprve přebírá napětí voda obsažená v pórech zeminy, což vede ke zvýšení tlaku, vzniku hydraulického gradientu a toku vody směrem k okraji drenážní vrstvy. Postupně dochází k disipaci vytvořených pórových tlaků a zatížení přebírá skelet zeminy. Po ukončení konsolidace je hodnota přírůstku pórových tlaků vznikajících v důsledku zatížení nulová

(Atkinson, 2017). Je však pravděpodobné, že v zemině zůstávají pórové tlaky zachovány ve velmi malém množství (Mitchell a Soga, 2005). Ukončení konsolidace je značeno jako tEOP (*end of primary consolidation*). Rychlost průběhu vychází z Terzagihovo rovnice jednodimenzionální konsolidace (2) (Mitchell a Soga, 2005).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

Počítá se nedisipovanými pórovými tlaky  $u$ , časem  $t$  a vzdáleností od povrchu místa drenáže  $z$  (Mitchell a Soga, 2005). Koeficient konsolidace  $c_v$  (3), je parametrem závislým na koeficientu stlačitelnosti  $a_v$  (4) a hydraulické vodivosti  $k_h$  (4). Dalšími členy vystupujícími v rovnici jsou číslo pórovitosti  $e$  a objemová tíha vody  $\gamma_w$ . Hodnoty  $c_v$  se liší pro různé zeminy a jsou vyjádřeny v m<sup>2</sup>/rok (Atkinson, 2017).

$$c_v = \frac{k_h(1 + e)}{a_v \gamma_w} \quad (3)$$

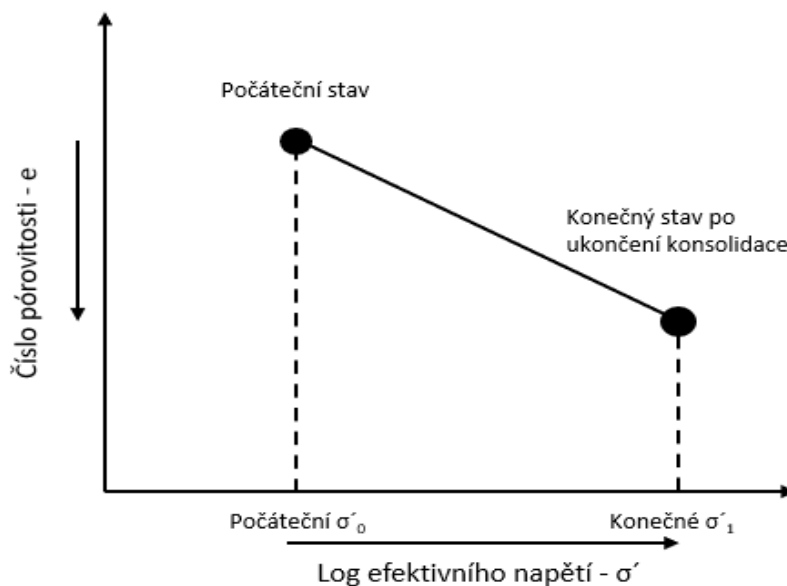
$$a_v = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma_v} \quad (4)$$

Typické hodnoty pro rychlost konsolidace ve vztahu ke koeficientu konsolidace jsou uvedeny v Tab. 1.

Koeficient konsolidace $c_v$ (m <sup>2</sup> /rok)	Rychlost průběhu konsolidace
< 0.01	Velmi pomalá
0.1-1	Pomalá
1-10	Střední
10-100	Vysoká
> 100	Velmi vysoká

Tab. 1 – Koeficient konsolidace ve vztahu rychlosti konsolidace – (upraveno podle Falowo a Dahunsi, 2020).

Objemové změny v zeminách (po ukončení konsolidace/pro odvodněné zatížení) se vyjadřují změnou mocnosti vrstvy  $\Delta H$ . Častěji pak změnou čísla pórovitosti  $\Delta e$  v závislosti na  $\log \sigma'$  (Obr. 9) (Mitchell a Soga, 2005).



Obr. 9 - Grafické znázornění konsolidace v závislosti na číslu pórovitosti a logaritmu efektivního napětí – (upraveno podle Mitchell a Soga, 2005).

Z toho to vztahu lze stanovit index stlačitelnosti značený  $C_c$  (5).

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \sigma'} \quad (5)$$

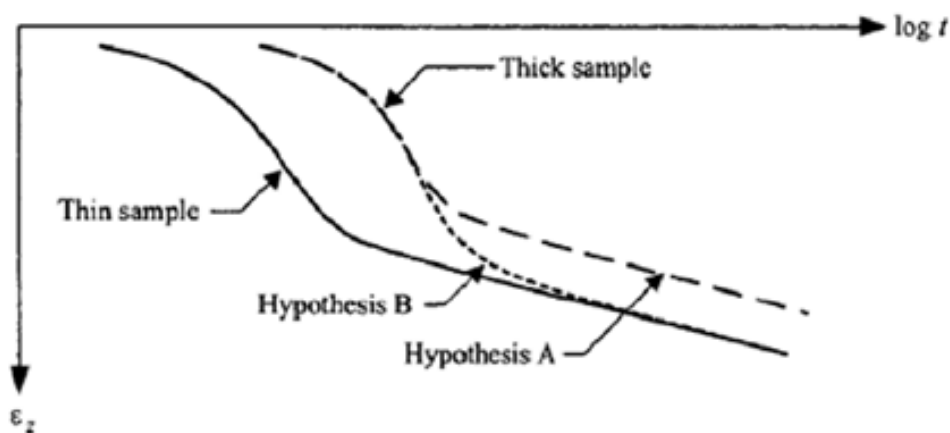
Je závislý na předpokladu linearitě mezi  $\Delta e$  a  $\log \sigma'$ . Hodnoty, kterých nabývá, odráží stlačitelnost zemin. Pro hodnoty  $C_c$  větší než 0,4 platí, že zeminy jsou dobře stlačitelné. Hodnoty mezi 0,4 – 0,2 mají zeminy se střední stlačitelností a pod 0,2 zeminy špatně stlačitelné (Mitchell a Soga, 2005).

### 3.1 Sekundární stlačitelnost

V předchozí kapitole uvažují, že po ukončení konsolidace, kdy veškeré  $\sigma'$  přebírají kontakty mezi zrny zeminy a hodnota  $u$  je téměř nulová, by mělo být přetvoření finální. Vychází z předpokladu, že objemová změna nastává pouze v důsledku přírůstku efektivního napětí (Atkinson, 2017).

U řady zemin však může docházet k přetvoření i po ukončení konsolidace. Tento jev se v literatuře nazývá creep, sekundární stlačitelnost nebo sekundární konsolidace (Le et al. 2012; Varatharajan, 2011). Název sekundární konsolidace však není vhodným termínem pro pojmenování tohoto procesu, neboť během něj nedochází k disipaci pórových tlaků (Olek, 2022). Jedná se o časově závislý efekt, při kterém dochází k objemovým změnám bez přírůstku efektivního napětí. Definice sekundární stlačitelnosti a jejího mechanického chování je stále nejednoznačná (Kaczmarek a Dobak, 2017).

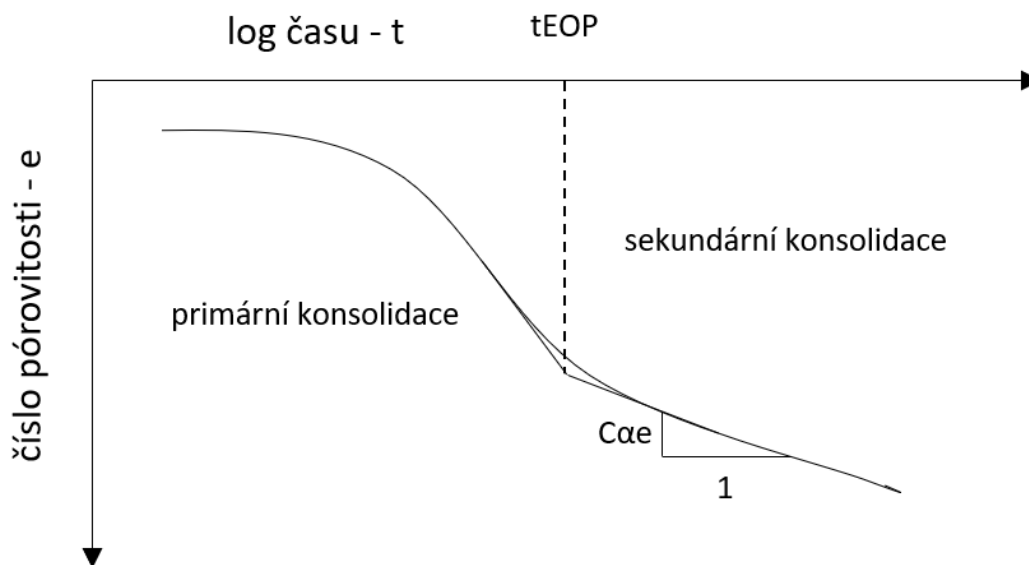
V literatuře se objevují dvě hypotézy, které odlišují, kdy ke creepu dochází neboli kdy začíná v zemině docházet ke creepové deformaci (Varatharajan, 2011). Hypotéza A od sebe odděluje primární a sekundární stlačitelnost. Během primární fáze je deformace zeminy řízena disipací přírůstků pórových tlaků vody během konsolidace a nevykazuje žádnou creepovou deformaci. Poté se zemina nadále deformuje, ale s rychlostí deformace řízenou viskozitou zeminy, efekt creepu tedy začíná působit až po dosažení  $tEOP$ , který definuje stav přechodu mezi konsolidací a creepem (Olek, 2022), jako referenční čas se tedy bere  $t100$  (Varatharajan, 2011). Hypotéza A je vhodná pro interpretaci laboratorních experimentů, neboť tloušťky vzorků jsou typicky velmi malé. Hypotéza B (také nazývaná teorie izotach) slučuje primární a sekundární konsolidaci. Pracuje tedy s předpokladem, že creep se v zemině začíná projevovat již na počátku konsolidace (Kaczmarek a Dobak, 2017; Varatharajan, 2011). Přetvoření na konci konsolidace by v tom případě bylo ovlivněné efekty creepu a výsledná deformace (stlačení) by byla ovlivněna mocností zkoumaného vzorku. Hypotéza B tedy předpokládá, že finální sednutí bude větší (Olek, 2022). Obr. 10 názorně poukazuje na závislost deformace na čase pro vzorky s různou výškou. U vzorků s malou výškou je deformace podle obou hypotéz podobná, neboť příspěvek creepu k deformaci během primární konsolidace je zanedbatelný. Pokud se však vezme v úvahu vzorek o větší mocnosti, bude výsledná deformace po ukončení konsolidace rozdílná. Podle hypotézy B je výsledná deformace větší než u hypotézy A, protože příspěvek creepu bude vést k většímu sednutí (Varatharajan, 2011).



Obr. 10 – Znárodnění průběhu deformace pro vzorky o různé výšce podle hypotézy A a B – (Varatharajan, 2011)

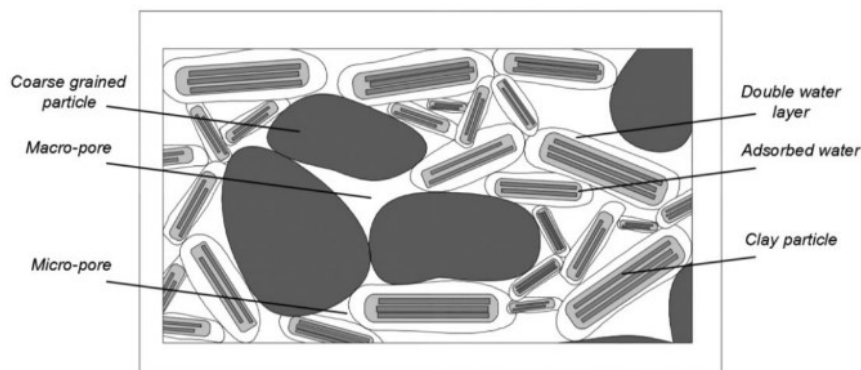
### 3.1.1 Mechanismy sekundární stlačitelnosti

Creep je svým chováním silně odlišný od konsolidace. Neřídí se Darcyho zákonem, ale procesy mnohem menšího měřítka (Mitchell a Soga, 2005). Nejčastěji se sekundární stlačitelnost projevuje u zemin s obsahem hydrofilních jílových minerálů jako je například montmorillonit (Kaczmarek a Dobak, 2017). Opět se zde předpokládá přibližná lineární závislost mezi  $\Delta e$  a  $\Delta \log t$  (Obr. 11). Nejčastější metodou pro studium jednoosého creepu je provedení zkoušek v oedometrickém přístroji, kde se po zatěžovací fázi a průběhu konsolidace měří změna čísla pórovitosti. Výsledkem, je koeficient sekundární stlačitelnosti  $C_{\alpha}$ , který poukazuje na závislost creepu na čase (Augustesen et al., 2004).



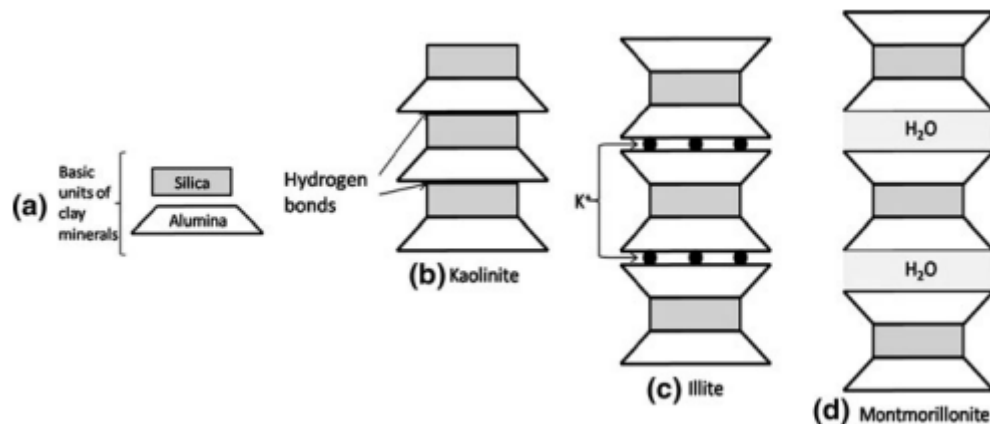
Obr. 11 - Grafické znázornění průběhu primární a sekundární stlačitelnosti (creepu) v logaritmickém měřítku  $\Delta e/\Delta \log t$  – (upraveno podle Mitchell a Soga, 2005).

Mechanismy sekundární stlačitelnosti jsou ovlivněny obsahem jílových minerálů a jejich mineralogií. Řada z nich je způsobena chováním, které vzniká důsledkem jejich specifického složení (Le et. al, 2012). Jílovité zeminy lze charakterizovat jako několikafázový systém složený z hrubozrnných částic, adsorbované vody, pórů a jílových minerálů (Obr. 12) (Kaczmarek a Dobak, 2017).



Obr. 12 – Schématické znázornění jílových zemin, složených z deskovitých jílových minerálů, hrubozrnných částic, mikro a makropórů – (převzato z Kaczmarek a Dobak, 2017).

Nejběžnějšími zastoupenými minerály jsou kaolinit, illit a montmorillonit. Tvoří deskovité krystaly, které jsou tvořeny převážně střídáním dvou základních jednotek jílových minerálů – tetraedry oxidu křemičitého a oktaedry oxidu hlinitého, které tvoří destičky oxidu křemičitého a oxidu hlinitého (Obr. 13). Ve své oktaedrické vrstvě uzavírají nejčastěji trojmocné kationty  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  a  $Mg^{3+}$ . Na jejich povrchu vzniká negativní náboj, díky kterému jsou jílové minerály schopny sorbovat vodu a v nich obsažené kationty do svého mezivrství (Le et al., 2012).



Obr. 13 – Střídání vrstev oxidů křemičitého a oxidu hlinitého spolu s adsorbovanou vodou a kationty – (převzato z Le et al., 2012).

Existuje celkem pět řídicích mechanismů, díky kterým by mohlo docházet ke creepu. Tyto mechanismy lze rozdělit následujícím způsobem (Kaczmarek a Dobak, 2017; Mitchell a Soga, 2005; Le et al., 2012):

- I. porušení vazeb mezi částicemi;
- II. přeskupením struktury a pozice částic způsobeným prokluzem na kontaktech mezi zrny zeminy;
- III. vytlačování pórové tekutiny z mikropórů (dvojitě vrstvy) vedoucí k transportu vody z menších do větších pórů;
- IV. pohybem iontů, které se nachází v adsorbované vodě při povrchu jílových částic;
- V. deformace způsobená strukturní viskozitou.

Je pravděpodobné, že by se tyto jevy mohly do jisté míry účastnit procesů zároveň (Kaczmarek a Dobak, 2017). Creep by tedy vznikl v důsledku kombinace několika zcela odlišných mechanismů:

- I. Mechanismus kolapsu vazeb mezi částicemi spojuje Kaczmarek a Dobak (2017) s konsolidací. Během konsolidace se kontakty mezi částicemi postupně zvětšují, což je způsobeno zvýšením efektivního napětí v čase v důsledku přenosu celkového napětí z pórové vody na kontakty mezi částicemi. Jílové minerály vytváří na kontaktech zrn různé vazby, mezi které patří například vazby vzniklé adsorbováním kationtů, vodíkovými můstky, van der Waalsovými silami a cementačními vazbami. Tyto vazby se mohou kvůli rostoucímu efektivnímu napětí působícímu na kontakty zrn v průběhu

konsolidace, rozbít. Porušení těchto vazeb mezi částicemi může způsobit další přeskupení částic a vést k další deformaci po ukončení konsolidace (Le et. al, 2012).

- II. Mechanismus přeskupení struktury a pozice částice je způsoben prokluzem na kontaktech mezi zrny. Dochází k vzájemnému pohybu jílových minerálů a změně jejich orientace. Při primární konsolidaci je snižován obsah vody v zemině. Úbytek vody vede ke zvýšení kontaktů mezi jednotlivými částicemi, vedoucí ke zvýšení vazebných sil a třecího odporu proti vzájemnému prokluzu. Tento proces vede k pomalé deformaci creepem (Le et al., 2012).
- III. Tento mechanismus pracuje s předpokladem dvojité porozity v zeminách. Uvažuje, že v nich jsou přítomny dvě odlišné struktury (Kaczmarek a Dobak, 2017). Jílové minerály tvoří tzv. sekundární mikrostrukturu, s drobnějšími póry. Primární makrostruktura je tvořena shluky jednotlivých mikrostruktur (Le et al., 2012) nebo hrubozrnnými částicemi (Kaczmarek a Dobak, 2017), schéma na Obr. 12. Varatharajan popisuje, že tento proces je závislý na pohybu vody mezi jednotlivými strukturami. Zvýšením napětí vzniká hydraulický gradient jak mezi mikropóry, tak makropóry primární struktury. Voda z makropóru se drénuje jako první. Následuje transport vody z mikropórů do makropórů a dalšímu drénování. Tímto se zvyšuje efektivní napětí, které působí na kontakty zrn. Proces vede k reaktivaci deformace (Varatharajan, 2011).
- IV. Proces je spojen s pohybem iontů, které se nacházejí v adsorbované vodě při povrchu jílových částic. Při pohybu iontu je zapotřebí rozbít chemické vazby s okolními molekulami vody. K jejich pohybu je zapotřebí dodat systému aktivační energii pro překonání energetické bariéry. Aktivační energie je generována pomocí napětí aplikovaného na zeminu. Je pravděpodobné, že nezávisí pouze na napětí, ale také na času a teplotě (Le et al., 2012). Najser a Mašín uvádějí, že při vyšší teplotě se zvyšuje množství volné energie v systému, která napomáhá překonání bariér (Najser a Mašín, 2024). Teplota tedy vede k větší rychlosti deformace (Le et al., 2012).
- V. Princip strukturní viskozity je založen na schopnosti jílových minerálů odolávat deformaci působením adsorbované vody, která zvyšuje viskozitu. Souvisí s mechanismem dvojité porozity. Adsorbovaná voda má na rozdíl od volné vody v makropórech odlišné vlastnosti způsobené obsahem iontů. Le rozděluje vodu v mikrostruktuře shluků jílových minerálů na tři skupiny. Vodu adsorbovanou na povrchu zrn, vodu obsaženou v mezivrstvi jílových minerálu a kapilární vodu. Její přítomnost snižuje schopnost vzájemného pohybu jílových zrn. Při jejím transportu dochází ke snížení viskozity a deformaci (Le et al., 2012).



### 3.1.2 Index sekundární stlačitelnosti

Index sekundární stlačitelnosti (Kaczmarek a Dobak, 2017) neboli koeficient sekundární stlačitelnosti (Mitchell a Soga, 2005) je parametr, který je příhodný pro numerické vyjádření creepu. Z grafu je patrné, že průběh křivky je v logaritmickém měřítku lineární (Obr. 11).  $C_\alpha$  definuje sklon této křivky (Olek, 2022). V literatuře se objevují různá vyjádření indexu sekundární stlačitelnosti. Rovnice jsou shrnuty v

1) Mitchell, Soga (2005)	$C_{\alpha e} = \frac{-\Delta e}{\Delta \log t}$
2) Lambe, Whitman (1969)	$C_{\alpha \varepsilon} = \frac{\Delta H/H}{\Delta \log t}$
3) Wood (1990)	$C_\alpha = \frac{\Delta H}{\Delta \log t}$

Tab. 2 – Rozdílné vyjádření  $C_\alpha$  v literárních publikacích

- 1) Mitchell a Soga definují index stlačitelnosti jako  $C_\alpha$  pomocí změny čísla pórovitosti a rozdílu konečného a počátečního času v logaritmickém měřítku (Obr. 11). Ve své publikaci *Fundamentals of Soil Behavior* přidávají k  $C_\alpha$  dolní index  $e$ . Použití čísla pórovitosti je podle Mitchella a Sogy vhodné pro vyjádření jak primární, tak sekundární stlačitelnosti. Lépe stanovuje vlastnosti zeminy v daném stavu (Mitchell a Soga, 2005).
- 2) Lambe a Whitman (1969) ve své publikaci používají pro vyjádření  $C_{\alpha \varepsilon}$  z druhé rovnice v tabulce. Jedná se o modifikovaný index, který využívá vertikální přetvoření místo čísla pórovitosti (Obr. 14).

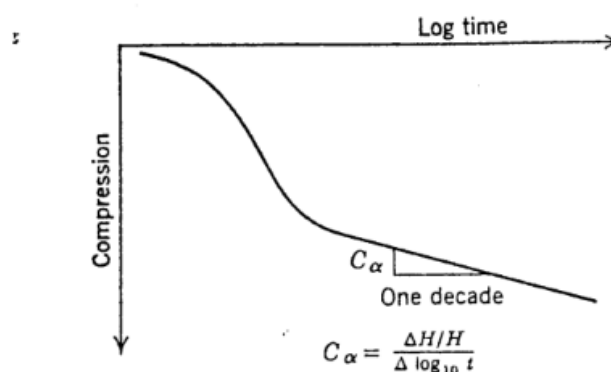
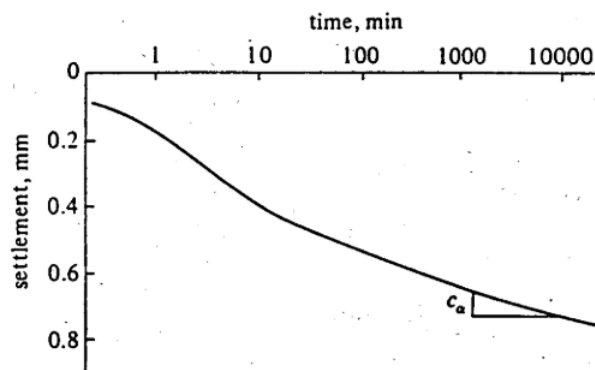


Fig. 27.17 Definition of rate of secondary compression.

Obr. 14 – Modifikovaná rovnice pro výpočet  $C_\alpha$  – (převzato z Lambe a Whitman, 1969).

- 3) Muir Wood ve své publikaci stanovuje  $C_\alpha$  poměrem sednutí a logaritmem času (Obr. 15) (Wood, 1990).



Obr. 15 - Stanovení indexu stlačitelnosti pomocí  $C_\alpha = \Delta H / \log t$  – (převzato z Wood, 1990).

Pro zjednodušení se předpokládá konstantní hodnota  $C_\alpha$ . V případě zemin je však reálné chování složitější, neboť deformace může zpomalovat s časem (Olek, 2022).

Yin et al. (2002) se ve své publikaci zabývají právě zobrazením v logaritmickém měřítku. Poukazuje na problematiku předpokladu linearitu  $C_\alpha$  spojenou s myšlenkou, že pokud by byl čas nekonečný, byla by i výsledná deformace nekonečná. Pokud by docházelo ke konstantnímu přetvoření s časem mohlo by docházet k nadhodnocení výsledné deformace (Yin et al., 2002). Musí tedy existovat určitý rovnovážný stav, při kterém je přetvoření konečné. Mitchell a Soga (2005) tvrdí, že pro využití v praxi je však koncept linearitu  $C_\alpha$  dostačující (Mitchell a Soga, 2005). Hodnoty  $C_\alpha$  jsou největší u jílových zemin s vysokou plasticitou (Lambe a Whitman, 1969). Příklady jsou uvedeny na (Obr. 16).

Table 27.2 Typical Values for Rate of Secondary Compression  $C_\alpha$

	$C_\alpha$
Normally consolidated clays	0.005 to 0.02
Very plastic soils; organic soils	0.03 or higher
Precompressed clays with OCR > 2	less than 0.001

Obr. 16 – Hodnoty  $C_\alpha$  pro jílovité zeminy – (převzato z Lambe a Whitman, 1969)

### 3.1.3 Faktory ovlivňující sekundární stlačitelnost

V laboratorním prostředí existuje několik faktorů, které mohou ovlivňovat průběh sekundární stlačitelnosti při měření v oedometrickém přístroji. Jejich působením dochází k narušení předpokladu lineárního průběhu křivky v logaritmickém zobrazení. Tyto faktory vedou jak ke zrychlení, tak zpomalení průběhu deformace. Řadí se mezi ně druhy fluid obsažených v pórech,

závislost sekundární stlačitelnosti na působícím napětí, vliv překonsolidace (Varatharajan, 2011), teplota (Kaczmarek a Dobak, 2017), obsah jílové frakce a plasticita (Olek, 2022).

Druhy fluid obsažených v zemině mohou měnit rychlost sekundární stlačitelnosti. Varatharajan (2011) se zabýval jejich účinkem při laboratorních měřeních stlačitelnosti kaolínu. Postupně porovnával vzorky suchého kaolínu s kaolínem nasyceným slanou a destilovanou vodou. Nejvyšší hodnoty  $C_\alpha$  zaznamenal ve vzorcích s destilovanou vodou, která svými vlastnostmi snižuje viskozitu struktury a množství kontaktů mezi jednotlivými zrny. Druhou největší deformaci pozoroval na kaolínu saturovaným slanou vodou. Obsah soli zastoupený ve zkoumaných vzorcích byl 1 % a 2 %. S klesajícím obsahem soli pozoroval zvyšující se hodnotu  $C_\alpha$ . Stlačitelnost vysušeného kaolínu byla nejnižší z důvodu vysoké viskozity struktury a velkého množství kontaktů zrn, které zpomalují deformaci. Při porovnání hodnot  $C_c$  a  $C_\alpha$  došel k závěru, že pokud je index stlačitelnosti pro daná fluida vyšší, bude i index sekundární stlačitelnosti nabývat vyšších hodnot (Varatharajan, 2011).

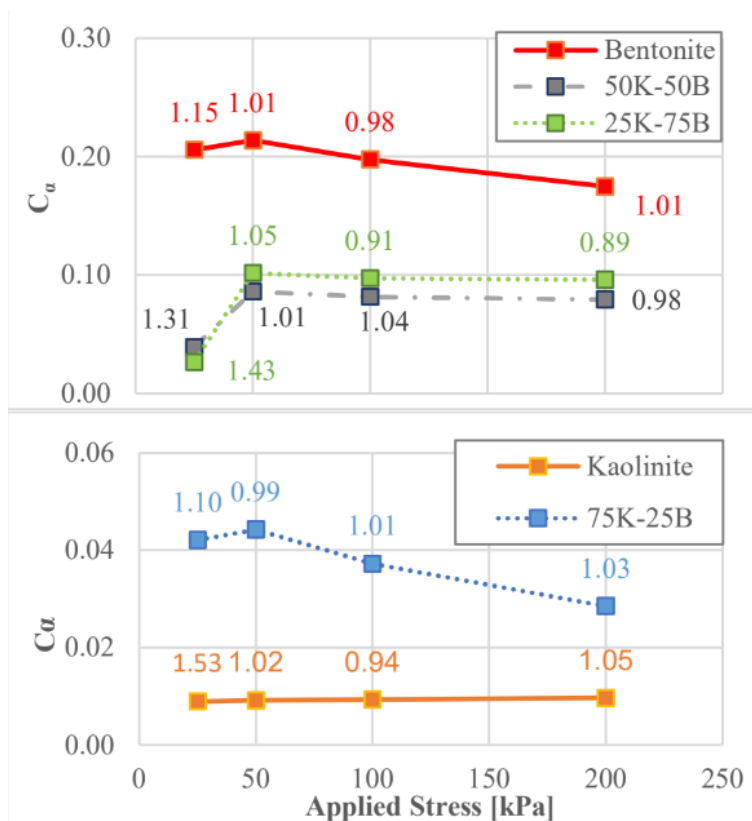
Zároveň lze pozorovat závislost rychlosti deformace na aplikovaném napětí. Při vyšších hodnotách napětí lze očekávat nižší hodnoty  $C_\alpha$ . Tento faktor je způsoben postupnou kompakcí zeminy, ke které dochází v pozdější fázi laboratorních zkoušek, kdy pevná fáze zabírá čím dál větší objem vzorku (zemina má tedy nižší číslo pórovitosti). Pevná fáze na kontaktech zrn lépe přenáší působící napětí. Tím se stává struktura zeminy stabilnější a odolnější proti dalšímu přetvoření (Varatharajan, 2011).

Rozdílné chování lze pozorovat u překonsolidovaných zemin. Jedná se o zeminy, na které v minulosti působilo vyšší napětí, než které je aplikované při laboratorních měřeních. U těchto zemin lze pozorovat obrácený případ chování. Dokud napětí působící na zeminu není vyšší než překonsolidační napětí ( $p_e$ ), roste hodnota  $C_\alpha$  (Varatharajan, 2011). Po dosažení tohoto napětí se hodnota  $C_\alpha$  chová stejně, jako u normálně konsolidovaných zemin a klesá s rostoucím napětím (Varatharajan, 2011).

Teplota, při které probíhají zkoušky je dalším parametrem, který ovlivňuje výsledné chování. S rostoucí teplotou lze pozorovat zrychlení creepu. Oproti ostatním zmíněným faktorům je však dle Kaczmareka a Dobaka (2017) teplota méně důležitým činitelem. Kaddouri et al. (2019) zkoumali vliv teploty na sekundární stlačitelnosti. Experimentálním měřením prokázali, že se zvyšující teplotou skutečně dochází ke zvýšení sekundární stlačitelnosti. Laboratorní měření byla provedena na jílových zeminách za teplot 5, 20, 50 a 70 °C. Porovnání indexů stlačitelnosti poukázalo na zrychlující se deformaci. Jako příklad uvádí, že rozdíl v teplotě mezi 5 a 70 °C vedl ke zvýšení hodnoty indexu sekundární stlačitelnosti o 13,6 % (Kaddouri et al., 2019).

Posledním parametrem ovlivňujícím velikost creepu je obsah jílové frakce a plasticita. Tímto tématem se zabýval Olek (2022), který provedl řadu laboratorních zkoušek na prachových a jílových přírodních zeminách za cílem objasnění vlivu plasticity a obsahu jílové frakce na rychlost creepu. Výsledky zkoušek porovnával s obsahem jílové frakce ( $CF$ ) a indexem plasticity ( $PI$ ) pro dané zeminy. Ukázal, že s rostoucím obsahem jílové frakce, které vede k vyšší plasticitě zemin, je pozorována větší deformace způsobená creepem (Olek, 2022). Tuto skutečnost dále potvrzuje Nguyen Duy a Jerman (2024). Pro korelaci  $C_\alpha$  s plasticitou využil méně plastický kaolín, více plastický bentonit a jejich směsi. Obr. 17 ukazuje porovnání výsledných  $C_\alpha$ .

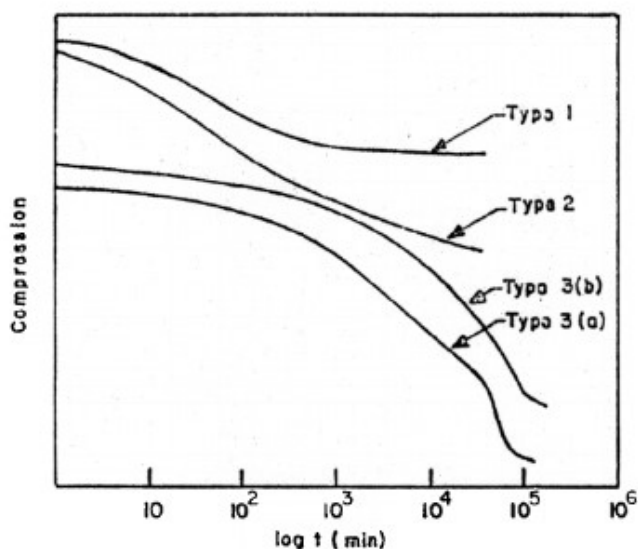
Poukazuje na vyšší hodnoty creepové deformace rostoucí s obsahem bentonitu, a tedy s rostoucí plasticitou.



Obr. 17 – Závislost  $C_\alpha$  na plasticitě – (převzato z Nguyen Duy a Jerman, 2024).

### 3.1.4 Typy křivek sekundární stlačitelnosti

Při vyhodnocování sekundární stlačitelnosti se využívá zobrazení  $\Delta e$  k logaritmu času. Byly popsány celkem 3 křivky, které se odlišují svým tvarem v závislosti na testované zemině a aplikovaném napětí. Série laboratorních zkoušek byla provedena na neporušených vzorcích jílových zemin, u kterých se sekundární stlačitelnost běžně projevuje (Lo, 1961 v Pavlová, 2014). Křivky jsou vyobrazeny na Obr. 18.



Obr. 18 – Typy křivek sekundární stlačitelnosti – (převzato z Lo, 1961 v Pavlová, 2014).

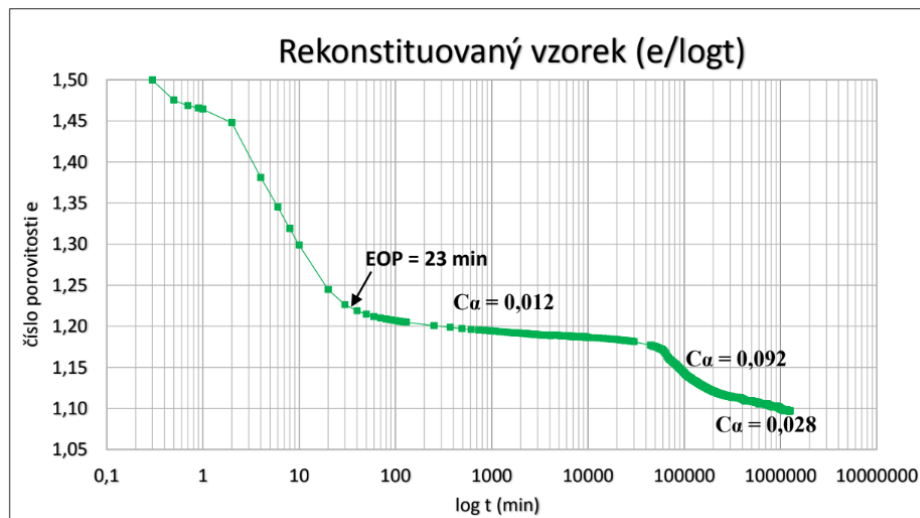
Křivka typu 1 je v literatuře často nazývána „S“ typem vzhledem k jejímu tvaru. Po ukončení primární konsolidace je průběh křivky přibližně lineární. Rychlost deformace se s přibývajícím časem snižuje, dokud nedojde k maximálnímu možnému stlačení. Tento tvar je běžný pro jílové zeminy bez organické příměsi a rekonstituované zeminy (Varatharajan, 2011, Lo 1961 v Pavlová 2014).

Typ 2 je popsán konstantní závislostí stlačení a logaritmu času. Platí však pouze pro určitou část křivky, neboť na jejím konci dochází k rychlému zpomalení (Lo, 1961 v Boháč a Pavlová, 2014).

Poslední křivka typu 3 vykazuje zcela odlišné chování oproti typu 1 a 2. Deformace v průběhu času zvyšuje svou rychlost až do jejího ukončení. Jedná se buď o postupné zrychlování, které vyobrazuje typ 3 (b), nebo náhlým kolapsem vyobrazeným na typu 3 (a) (Lo, 1961 v Pavlová, 2014).

Pavlová (2014) ve své práci zmiňuje podobnost křivky typu 3 s křivkami difuzního kolapsu, které vykazují náhlé zrychlení deformace s přibývajícím časem. Zkoušky sekundární stlačitelnosti prováděli na dvou vzorcích neporušeného a jednom vzorku rekonstituovaného brněnského neogenního jílu (téglu). Jednalo se o dlouhodobé zkoušky, které trvaly v rozmezí jednoho roku až dvou let a pěti měsíců. V průběhu zkoušky by po celou dobu vzorek zalitý běžnou vodou, aby nedocházelo k jeho vysychání. U těchto zkoušek docházelo přibližně okolo dvacátého dne

k náhlému zrychlení deformace a zvýšení hodnoty  $C_\alpha$  jak pro neporušené, tak rekonstituované vzorky. Příklad průběhu zkoušky rekonstituovaného brněnského neogenního jílu je uveden na Obr. 19. (Pavlová, 2014).



Obr. 19 – Průběh zkoušky rekonstituovaného brněnského neogenního jílu s difuzním kolapsem – (převzato z Boháč a Pavlová, 2014).

## 4 Metodologie

### 4.1 Zkoušená zemina, příprava rekonstituovaného vzorku

Laboratorní zkoušky probíhaly na vzorku slínovců březenského souvrství ze sesuvného území Prackovice (vrt INP 1009) z hloubky 17–19 m (Obr. 20). Smyková plocha se nacházela v hloubce 16,5 m (ústní sdělení, Jerman). Zemina až měkká poloskalní hornina má světle šedou barvu. Kycl et al. (2020) určil pomocí 40 křivek zrnitosti obsah jílové frakce na 32,3 %. Vlhkost na mezi plasticity je rovna 35 % a vlhkost na mezi tekutosti je 61,4 %.



Obr. 20 – Část vrtného jádra ze sesuvného území Prackovic požitá pro laboratorní měření (vlastní fotografie) a celé vrtné jádro z vrtu INP 1009 (červeně je označen odebraný úsek jádra pro laboratorní zkoušky z hloubky 17–19 m) – (autor, Jan Jerman).



Nejprve byl vzorek v podobě vrtného jádra nastrohán (Obr. 21), aby došlo k porušení a struktury zeminy.



*Obr. 21 - Rozdružený vzorek před zalitím destilovanou vodou.*

Vzniklá jemnozrnná směs byla umístěna do mísy a zalita destilovanou vodou. K odstranění hrubší frakce, která ve vzorku zůstala bylo použito síto o průměru 2 mm. K následné homogenizaci vzorku byl použit elektrický hnětač, ve kterém byl vzorek míchán v intervalu pěti až šesti hodin. Míchání probíhalo tak, aby byl vzorek po celou dobu ponořen pod vodou. V průběhu míchání bylo zapotřebí každých třicet minut míchání zastavit a vrátit materiál usazený na stranách zpět do středu mísy, aby došlo k dokonalé homogenizaci celého objemu zeminy. Po vyjmutí z hnětače byla zemina umístěna zpět do kovové mísy a ponechána při pokojové teplotě. Výsledkem byla homogenní pasta (Obr. 22) o požadované (snížené) vlhkosti.



*Obr. 22 - Homogenizovaný, vodou saturovaný vzorek o konzistenci pasty před oedometrickou zkouškou.*

Vlhkost byla ověřena vysušením vzorku v peci na 24 hodin při teplotě 105 °C. Použitím vzorce na výpočet vlhkosti zemin z rovnice (6):

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad 6$$

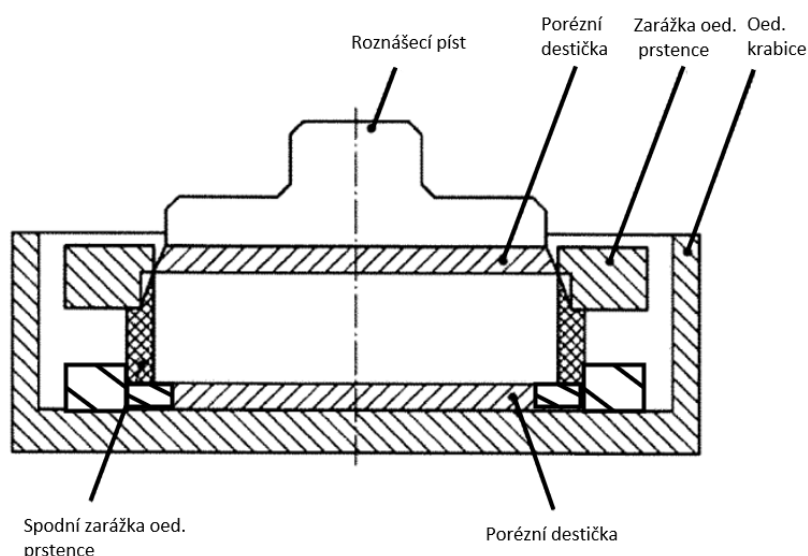
byla stanovena vstupní vlhkost ve vzorku. Rekonstituované vzorky v podobě pasty byly použity pro dvě zkoušky sekundární stlačitelnosti a jeden multi-stage creep test (viz kapitola 4.4 a 4.5).

## 4.2 Popis oedometrického přístroje

Laboratorní měření jsem prováděl na oedometrických přístrojích v Laboratoři mechaniky zemin PŘF UK. Oedometrický přístroj se využívá pro laboratorní zkoušky primární a sekundární jednoosé stlačitelnosti a jednoosé konsolidace. Stlačení vzorku probíhá pouze ve vertikálním (axiálním) směru, není tedy umožněna deformace v radiálním směru. Mechanismus zatěžování vzorku zatěžovacího rámu v pomoci přístroji funguje na mechanismu páky, na kterou je v průběhu zkoušek pomocí závaží aplikováno příslušné zatížení. Zatěžovací rám je složen z protizávaží a závěsu pro závaží na druhé straně.

Deformace je zaznamenávána pomocí digitálních hodin (úchylkoměru), které během experimentu měří změnu výšky vzorku. Hodinky jsou připojeny k počítači, který v programu automaticky zaznamenává průběžné výsledky v zadaném intervalu do textového souboru.

Hlavní částí přístroje je kovová oedometrická krabice, ve které jsou umístěny ostatní komponenty. Patří mezi ně oedometrický prstenec, porézní destičky, roznášecí píst, spodní a svrchní zarážka oedometrického prstence. Schéma je znázorněno na Obr. 23.



Obr. 23 – Schéma oedometrické krabice – (upraveno podle ČSN, 2017).



Oedometrická krabice má válcovitý tvar, na který má na svém dně otvor pro vsazení spodní porézní destičky s filtračním papírem. Pomocí filtračního papíru je zamezeno zanášení destičky a tím nedochází ke snížení její propustnosti. Složení krabice musí být z materiálu odolného proti korozi podle normy ČSN EN ISO 17892-5 (2017). Průměr spodní porézní destičky je větší než průměr ocelového prstence, ve kterém je umístěn vzorek. Proto je po jeho umístění na dno krabice uchycen spodní zarážkou oedometrického prstence, který kompletně zamezuje jeho pohybu do stran. Oedometrický prstenec má mít podle stanovené normy průměr ( $d$ ) alespoň 35 mm a výška ( $H$ ) nesmí být nižší než 12 mm dle normy ČSN EN ISO 17892-5 (2017). Mnou použitý prstenec byl v souladu s těmito předpoklady, neboť rozměry byly následující:  $d = 50$  mm a  $H = 20$  mm. K dalšímu zamezení pohybu je docíleno pomocí svrchní zarážky oedometrického prstence, která obklopuje oedometrický prstenec ze všech stran a je zajištěn pomocí tří šroubů, zapuštěných do oedometrické krabice. Jeho průměr je úměrný ocelovému prstenci tak, aby zůstala svrchní část vzorku odkryta. Nejvrchnější část tvoří roznášecí píst, který má na své spodní části pevně připevněnou porézní destičku, jejíž průměr je o 0,2 až 0,5 mm menší než průměr oedometrického prstence dle normy ČSN EN ISO 17892-5 (2017). Tato vlastnost byla u mého roznášecího pístu splněna. Pomocí roznášecího pístu je na vzorek přenášeno požadované napětí generované pomocí zatěžovacího ramene. Roznášecí píst má na své horní části drážku, pomocí které je píst aplikující napětí na vzorek umístěn přesně na jeho střed. Důvodem je, aby napětí působilo rovnoměrně. Na něj jsou umístěny digitální hodinky, které ukazují aktuální sednutí. Celý přístroj je pevně připevněn ke stolu, aby nemohlo docházet k jeho pohybu.

### 4.3 Příprava vzorků do oedometrického přístroje

Prvním krokem přípravy bylo osazení vzorku do oedometrické krabice. Filtrační papír jsem k povrchu destičky přichytil navlhčením destilovanou vodou. Poté jsem umístil do oedometrické krabice spodní porézní destičku s filtračním papírem a na ní jsem vložil spodní zarážku, spolu s oedometrickým prstencem. Dalším následujícím krokem bylo vsazení rekonstituovaného vzorku do oedometrického prstence. Vzorek ve formě homogenní pasty jsem pomocí nože postupně nanášel do prstence tak, aby byla všechna volná místa zaplněna a ve vzorku nevznikaly žádné vzduchové bubliny. Po naplnění oedometrického prstence jsem vzorek pomocí nože zarovnal. Pokud bylo patrné, že se ve vzorku stále nacházejí prázdná místa, které lze poznat podle děr vznikajících na povrchu vzorku, bylo zapotřebí proces opakovat. Tedy do prstence přidat další zeminu a opět zarovnat. Jakmile byl povrch vzorku zcela rovný bez viditelnějších nehomogenit, bylo na čase osadit prstenec a zajistit ho pomocí svrchního krytu zašroubováním tří šroubů. Poté se na svrchní část vzorku vložilo roznášecí píst s druhou porézní destičkou. Poté jsem sestavenou oedometrickou krabici naplnil destilovanou vodou. Následovalo vsazení oedometrické krabice do přístroje a zahájení měření.

## 4.4 Dlouhodobé creepové zkoušky

Cílem laboratorních měření bylo stanovení dlouhodobého působení creepu. Celkem jsem provedl dvě dlouhodobé creepové zkoušky, jejichž doba trvání byla 91 dní. Zkoušky byly připraveny s počáteční vlhkostí odpovídající  $1,27 \cdot w_L$  (vlhkosti na mezi tekutosti), tedy  $w_0 = 78\%$ . Zkoumaná zemina byla po vložení do oedometrického přístroje nejprve konsolidována postupně v několika zatěžovacích krocích, tak aby nedošlo k vytlačení vzorku ven z oedometrického prstence. Tento postup však nebyl proveden zcela správně, neboť k vytlačování zeminy během zkoušky docházelo. U Rek. creepu B se jednalo o nepatrné vytlačování, které nemohlo výrazně ovlivnit průběh zkoušky. Rek. creep C však byl tímto faktorem ovlivněn více a vytlačování mohlo vést k ovlivnění laboratorních výsledků (viz kapitola 6). Dále byl přístroj překryt potravinářskou fólií k zamezení nadměrného odparu vody z oedometrické krabice. Během experimentu však průběžně k výparu vody dochází, a tak jsem každé dva dny doplňoval destilovanou vodu, aby nedošlo k vysychání. První zatěžovací krok pro obě zkoušky byl při napětí přibližně rovnému nule (roznášecí píst + cca 30 g). Dále pak bylo vždy přidáváno závaží na zatěžovací rameno, které vždy odpovídalo dvojnásobku hmotnosti předchozího závaží, a tedy i dvojnásobku vertikálního napětí, výjimkou posledního zatěžovacího stupně. Sekvence zatěžovacích kroků byla 1.5, 25, 50, 100 a 150 kPa pro první creepový test (rek. creep B). Pro druhý test bylo konečného napětí dosaženo kroky 1.5, 25, 50, 100, 200 a 300 kPa (rek. creep C). Konsolidace vždy probíhala po dobu jednoho dne, tak aby došlo ke kompletní disipaci pórových tlaků před dalším zatížením. Po dosažení požadovaného napětí pro zkoušku, byl vzorek ponechán pod působícím napětím (100 a 200 kPa) po dobu 74 dní. Po uplynutí této doby bylo napětí navýšeno na hodnoty 150 a 300 kPa po dobu jednoho týdne. Během této doby byly měřeny hodnoty sednutí za čas pomocí hodiněk umístěných na roznášecí píst oedometru a zapisovány do počítače. Důležité je zmínit, že v průběhu experimentu bylo zapotřebí v hodinkách vyměnit baterie u obou oedometrů a měření bylo na dobu několika minut přerušeno. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o dlouhodobý test, tak krátká pauza v měření nemohla výrazně ovlivnit výsledky. Pouze bylo důležité správně interpolovat data, tak aby navazovala na první měřený úsek. Po uplynutí 81 dní následovalo odlehčování vzorku do nuly. Napětí bylo postupně snižováno stejnými kroky jako u zatěžovací fáze s vynecháním kroku 25 kPa. Pro Rek. creep A (150, 100, 50, 1.5), Rek. creep B (300, 200, 100, 50, 1.5) dokud nebylo působící napětí sníženo na nulu. Odlehčovací kroky trvaly stejně dlouho jako konsolidační, tedy 24 hodin. Po posledním odlehčovacím stupni následovalo ukončení testu, které zahrnovalo rozebrání oedometrické krabice a odstranění veškeré vody. Následovala oprava měřených hodnot, u kterých se předpokládá, že vstupní výška vzorku je rovna výšce oedometrického prstence, tedy 20 mm. Korekce byla provedena mechanickým změřením stlačení vzorku od výšky oedometrického prstence šuplerou. Výsledné hodnoty skutečně prokázaly, že vstupní výšky vzorků nebyly 20 mm, ale 19.835 mm pro creep test 100 kPa a 19.858 mm pro creep test 200 kPa. Toto je zapříčiněno především faktem, že vzorek je po osazení zatížen roznášecím pístem a dochází u něj k deformaci dříve, než je možné začít měřit posun úchylkoměrem. Poté byl vzorek stejně jako na začátku měření umístěn do pece

k vysušení při teplotě 105 °C na 24. Po jeho vyjmutí byla stanovena vlhkost na konci experimentu na 38,4 % (Rek. creep B–150 kPa) a 35,5 % (Rek. creep C–300 kPa).

## 4.5 Multi – stage creep zkouška

Na předchozí dlouhodobé měření sekundární stlačitelnosti navazuje jeden multi – stage creep test. Opět byl použit stejný vzorek rekonstituované zeminy, tentokrát při vlhkosti 72 %, při kterém nedocházelo k vytlačování zeminy. Princip multi – stage creep testu je svým průběhem odlišný od dlouhodobých creepových zkoušek popsanych v předchozí kapitole. Nejprve jsem vzorek umístěný do oedometrického přístroje nechal zkonsolidovat při napětí 1.5 kPa, stejně tak jako u předchozích měření, ale pouze po dobu dvaceti minut. Poté následovalo přitížení na 5 kPa po dobu tří hodin. Po třech hodinách následovalo další zatěžovací stupeň na dobu jednoho dne při 15 kPa. Ostatní fáze zatížení byly stejné jako u předchozích zkoušek až do hodnoty 200 kPa. Rozdílem však bylo, že u každého stupně se po jednodenní konsolidaci nechal vzorek vystavit stejnému napětí po dobu jednoho týdne. Výsledkem jsou tedy hodnoty naměřené pro týdenní creep při napětí 25, 50, 100 a 200 kPa. Průběh zkoušky byl ukončen obdobným způsobem jako u single-stage zkoušek. Počáteční výška vzorku byla opětovně dopočítána z 20 mm na hodnotu 19,853 mm. Výsledná vlhkost na konci zkoušky činila 37,2 %. Souhrn provedených testů je shrnut v Tab. 3.

Rek. creep B	w0	78 %	Rek. creep C	w0	78 %	Creep mult.	w0	72.1 %
Loading (kg)	(kPa)	t (d)	Loading (kg)	(kPa)	t (d)	Loading (kg)	(kPa)	t (d)
0.03	1.5		0.03	1.5		0.03	1.5	
0.5	25		0.5	25		0.1	5	
1	50		1	50		0.3	15	
2	100 Creep	74	2	100		0.5	25 Creep	8.15
3	150 Creep	8.85	4	200 Creep	74	1	50 Creep	7.94
2	100		6	300 Creep	8.85	2	100 Creep	7.76
1	50		4	200		4	200 Creep	8.98
0.03	1.5		2	100		2	100	
			0.5	50		1	50	
			0.03	1.5		0.5	25	
						0.3	15	
						0.03	1.5	

Tab. 3 – Přehled provedených laboratorních zkoušek creepu.

## 4.6 Výpočet čísla pórovitosti

Číslo pórovitosti je podle teorie vhodnou reprezentací aktuálního stavu, ve kterém se zemina nachází. Při zpracování zkoušek sekundární stlačitelnosti bylo číslo pórovitosti jedním z hlavních sledovaných parametrů. Výpočet čísla pórovitosti probíhal během zkoušek podle Heada (1994). Prvním krokem k výpočtu bylo stanovení celkového objemu na začátku zkoušky  $V_0$  pomocí opravené výšky vzorku  $H_0$  a ploše vzorku  $A$  z rovnice (7).

$$V_0 = \frac{A \times H_0}{1000} \quad (7)$$

Následoval výpočet objemové hmotnosti suchého vzorku  $\rho_d$  podle rovnice (8). Dělením počátečního objemu hmotností suchého vzorku  $m_d$  vysušeného po ukončení oedometrické zkoušky.

$$\rho_d = \frac{V_0}{m_d} \quad (8)$$

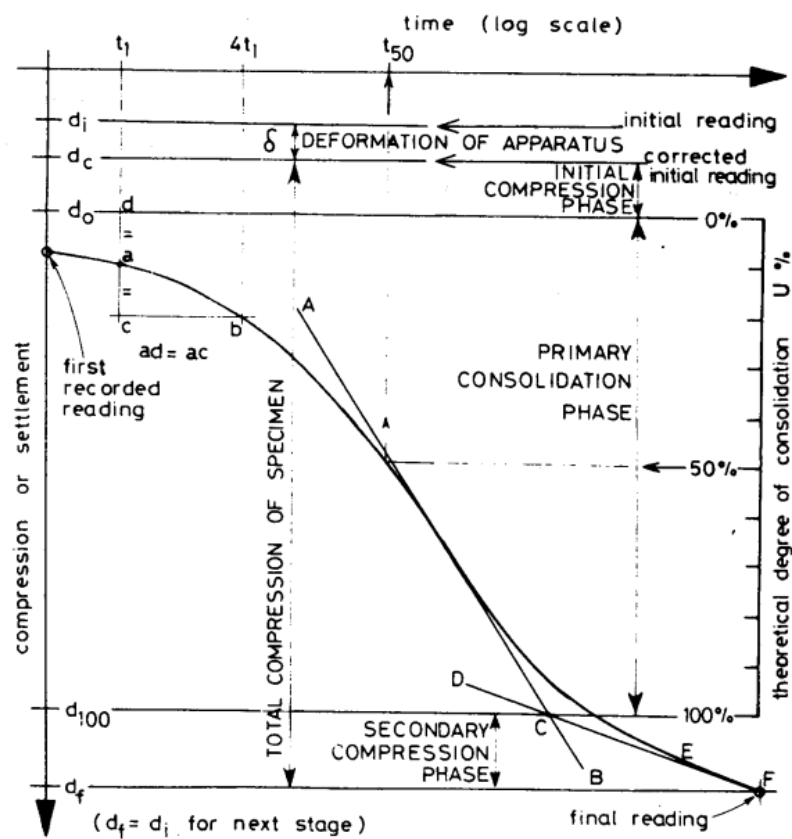
Stanovení počátečního čísla pórovitosti bylo provedeno dělením objemové hmotnosti suchého vzorku  $\rho_d$  hustotou pevných částic  $\rho_s$ , pro které jsem převzal hodnotu  $2.65 \text{ g/cm}^3$  podle Pospíchal (2024). Výpočet je stanoven podle rovnice (9), tedy:

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (9)$$

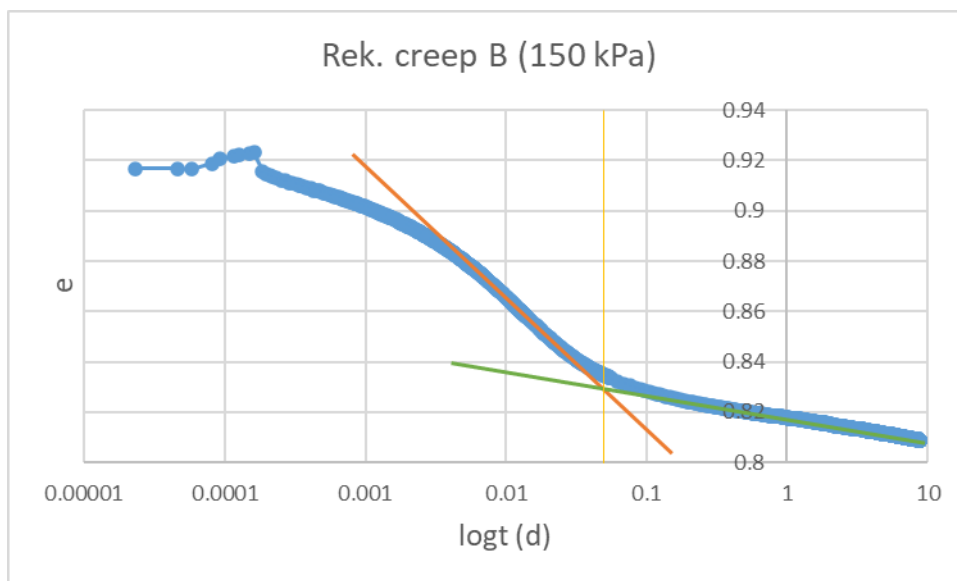
Číslo pórovitosti bylo stanoveno pro veškeré zatěžovací a odlehčovací fáze stejným způsobem, pouze byla při výpočtu využita vždy konečná výška pro daný stupeň, tedy počáteční výška, od které bylo odečteno sednutí změřené oedometrickým přístrojem.

## 4.7 Stanovení tEOP

Čas, při kterém dochází k ukončení primární konsolidace (*tEOP*) je důležitým parametrem pro oddělení primární konsolidace od sekundární stlačitelnosti. Pro vyhodnocení *tEOP* byla pro bakalářskou práci použita Casagrandeho metoda (Obr. 24), která spočívá ve vynesení změny výšky nebo čísla pórovitosti v závislosti na čase v logaritmickém měřítku. Výsledný graf lze podle teorie rozdělit na primární konsolidaci a sekundární kompresi, proložením dvou úseček (Obr. 25). První úsečka je proložena tak, aby co nejlépe aproximovala lineární část primární konsolidace, tedy část grafu znázorněnou písmenem (A). Druhou částí grafu (B), která reprezentuje sekundární kompresi je proložena druhá úsečka, která sleduje lineární průběh creepu (Head, 1994). V bodě, ve kterém se tyto úsečky protínají, dochází ke kompletní disipaci pórových tlaků a k ukončení konsolidace. Z grafu lze poté odečíst požadovaný čas a číslo pórovitosti pro danou zatěžovací zkoušku.



Obr. 24 – Casagrandeho metoda stanovení *tEOP* – (převzato z Head, 1994).



Obr. 25 - Metoda prokládání úseček ke stanovení tEOP.

## 5 Výsledky laboratorních měření

Celkem byly provedeny tři oedometrické zkoušky, jejichž primárním cílem byl výzkum creepu na rekonstituovaných slínovcích ze sesuvného území Prackovice. Dvě zkoušky byly zaměřené na dlouhodobé sekundární stlačitelnosti trvající 74 dní. Třetí zkouška byla provedena jako multi – stage creep test, s každou creepovou fází trvající 7 dní. Zároveň byla pro každou zkoušku stanovena křivka stlačitelnosti (*NCL – normal compression line*) z jednotlivých zatěžovacích fází. Kromě těchto oedometrických zkoušek byla nově vyhodnocena data pro creep testy z diplomové práce Jerman a Pospíchal (2024) za účelem zachování maximální konzistence při vyhodnocování dat creepu studovaných slínovců.

### 5.1 Data z předchozích prací

V rámci diplomové práce Pospíchala (2024) „Analýza svahového pohybu Dubičná – mechanické vlastnosti slínovců a stabilitní poměry“ byly provedeny celkem tři zkoušky creepu na rekonstituovaných vzorcích slínovců ze sesuvného území Prackovice, z vrtu INP 1009, hloubky 17–19 metrů. Tedy identických vzorků použitých pro mé vlastní laboratorní měření. Postup laboratorních zkoušek byl, v určitých vstupních parametrech zeminy, postupech provádění přípravy a měření, odlišný. U přípravy rekonstituovaného vzorku lze pozorovat první rozdíly. V práci není zcela přesně specifikována doba míchání vzorku, pouze je zde naznačeno, že se jednalo o dobu několika hodin. Tato doba byla kratší než mnou prováděné míchání po dobu šesti hodin (ústní sdělení, Jerman) a neprobíhaly pravidelné půlhodinové přestávky (kvůli zajištění konzistentního promíchání celého vzorku a aby část zeminy neulpívala na okrajích nádoby). O procesu snižování vlhkosti na požadovanou vlhkost pro laboratorní zkoušky se zde autor práce nezmiňuje. Tento proces mohl být urychlen a neprobíhal pouze při

pokožkové teplotě (ústní sdělení, Jerman), ale přemístěním zeminy do místnosti s vyšší teplotou, kde opět mohlo dojít k tvorbě nehomogenit v rámci vzorku díky různé rychlosti vysychání jeho různých částí. Důsledek rozdílného postupu přípravy vzorku bude dále diskutován v kapitole (6). Vstupní parametry pro jednotlivé zkoušky se odlišují počáteční vlhkostí  $w_0$ , změřenou pomocí vysušení vzorku před zkouškou, která byla 56 % (rek. creep A) a 59 % (rek. creep 4) – tedy o 16–22 % nižší než u mnou provedených zkoušek. Při laboratorním měření byly zatěžovací kroky obdobné, jako v této bakalářské práci. Měření dlouhodobého creepu však probíhalo při jiném napětí. Kromě rozdílného napětí pro jednotlivé zkoušky byla také odlišná doba jejich trvání. Tato doba odpovídala 37 a 10 dnům pro zkoušku A (150, 300 kPa) a 57 dnům pro zkoušku 4 (300 kPa). Souhrn jednotlivých zkoušek je uveden v Tab. 4. Veškerá data pro tyto oedometrické zkoušky byla v rámci této bakalářské práce znovu vyhodnocena, aby byla zajištěna konzistentnost.

Rek. creep A	$w_0$	58%	Rek. creep 4	$w_0$	60%
Loading (kg)	(kPa)		Loading (kg)	(kPa)	
0	0		0	0	
0.5	25		0.5	25	
1	50		1	50	
2	100		2	100	
3	150 Creep		3	150 Creep	
4	200		4	200	
6	300 Creep		6	300	

Tab. 4 – Laboratorní měření creepu z diplomové práce Pospíchal (2024).

## 5.2 Křivka stlačitelnosti

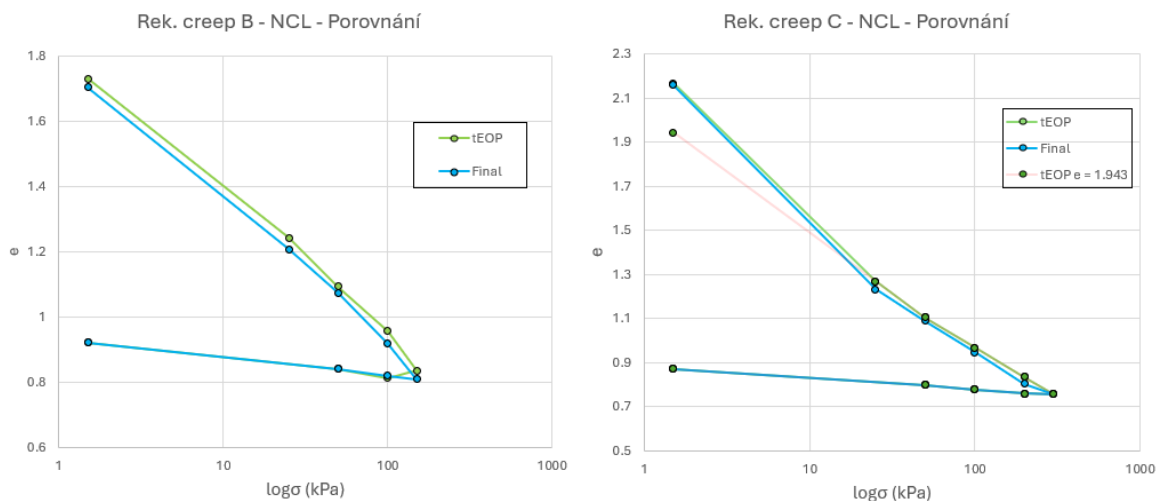
Křivka stlačitelnosti, dále jen *NCL* (*normal compression line*), vyjadřuje závislost změny čísla pórovitosti na aplikovaném napětí. Běžně se znázorňuje v logaritmickém měřítku  $\sigma$ . Její sklon je dán indexem stlačitelnosti ( $C_c$ ), který lze aplikovat pro sklon mezi jednotlivými kroky, tak pro sklon celé křivky. Pro všechna laboratorní měření byly vypočteny  $C_c$  a zkonstruována *NCL*. Křivka pro odlehčovací fáze *UL* (*unloading line*) bylo vytvořena pouze pro vlastní laboratorní měření, z důvodu nedostatku dat u Pospíchal (2024) pro její vyhodnocení.

Vlastní laboratorní měření zahrnovala vytvoření *NCL* a *UL* pro každý z testů. Pro její vynesení byla vytvořeny dvě metody:

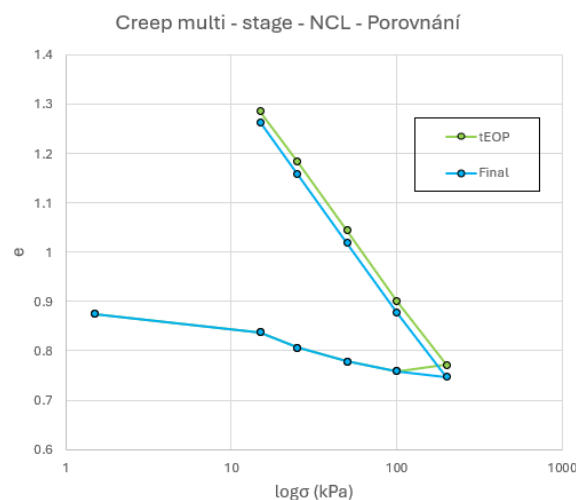
1. Pomocí čísla pórovitosti na konci každého zatěžovacího stupně, včetně jeho snížení způsobeného creepem od dosažení *tEOP* (popisek „Final“ v obrázcích).
2. Pomocí čísla pórovitosti na *EOP* (popisek „*tEOP*“ v obrázcích).

Podle normy ČSN EN ISO 17892-5 (2017) je standardním postupem sestavení *NCL* z čísel pórovitosti po 24 hodinách měření, ačkoliv k ukončení konsolidace může docházet v závislosti na druhu zeminy dříve nebo později. Na Obr. 26 a Obr. 27 je názorně ukázán rozdíl mezi  $e$  na *EOP* a  $e$  na konci zatěžovacího kroku. Všechny křivky *NCL* podle  $e$  na konci zatěžovacího kroku jsou shrnuty na Obr. 28, kde je patrné, že poloha křivek je konzistentní. Při porovnání čísel pórovitosti s křivkami stlačitelnosti Pospíchal (2024) je patrné, že tyto křivky leží mírně níže než křivky zhotovené v rámci této práce. Konec konsolidace pro jednotlivé zkoušky byl

v rozsahu půl až dvou hodin. Působením creepu dochází k posunutí daného bodu směrem dolů od *NCL* konstruované z čísla pórovitosti na *EOP*. Tato skutečnost byla pozorována u všech vlastních měření s výjimkou zkoušky C, kde byl rozdíl mezi číslem pórovitosti značně menší než u ostatních zkoušek. Zároveň bylo u této zkoušky pozorováno výraznější vytlačování zeminy, které mohlo vést k nadhodnocení počátečního čísla pórovitosti, které by mělo být u stejné zeminy se stejnou počáteční vlhkostí podobné. Do grafu je tak červenou čarou zaneseno stejné počáteční číslo pórovitosti jako zkouška B. V tomto případě se zdá průběh *NCL* lineární. U předchozích laboratorních zkoušek, které jsem měl k dispozici byly vytvořeny pouze *NCL* podle finálního čísla pórovitosti z důvodu nedostatku dat pro vynesení *UL* a *NCL* podle *EOP*. Výsledná *NCL* jsou uvedena na Obr. 29. Pomocí obou metod byl stanoven index stlačitelnosti  $C_c$  spolu se sklonem křivky *UL*. Hodnoty jsou shrnuty Tab. 5. Hodnoty indexu stlačitelnosti jsou v zásadě stejná při použití obou metod výpočtu (*tEOP*, *Final*). Pomocí  $C_c$  lze zařadit zeminu do kategorie středně až dobře stlačitelných zeminy podle Mitchella a Sogy (2005).

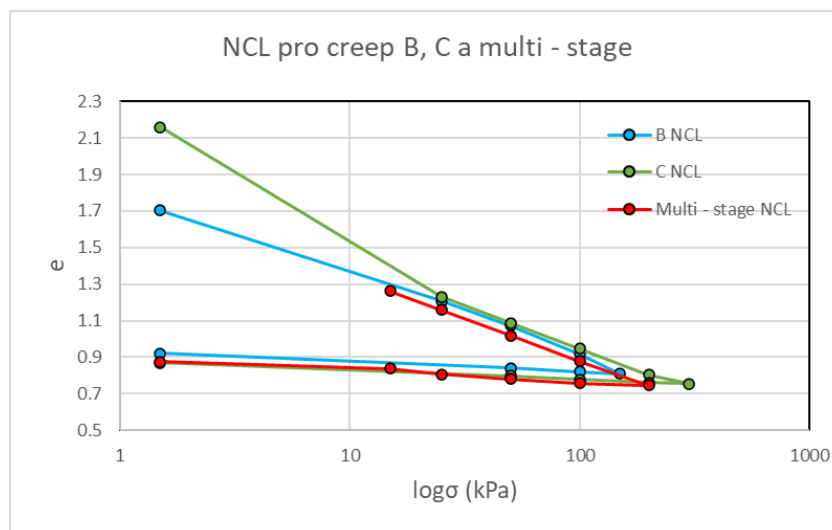


Obr. 26 – Křivka *NCL* pro creep B a C sestavená podle čísla pórovitosti na *tEOP* a čísla pórovitosti (*Final*) s příspěvkem creepu.

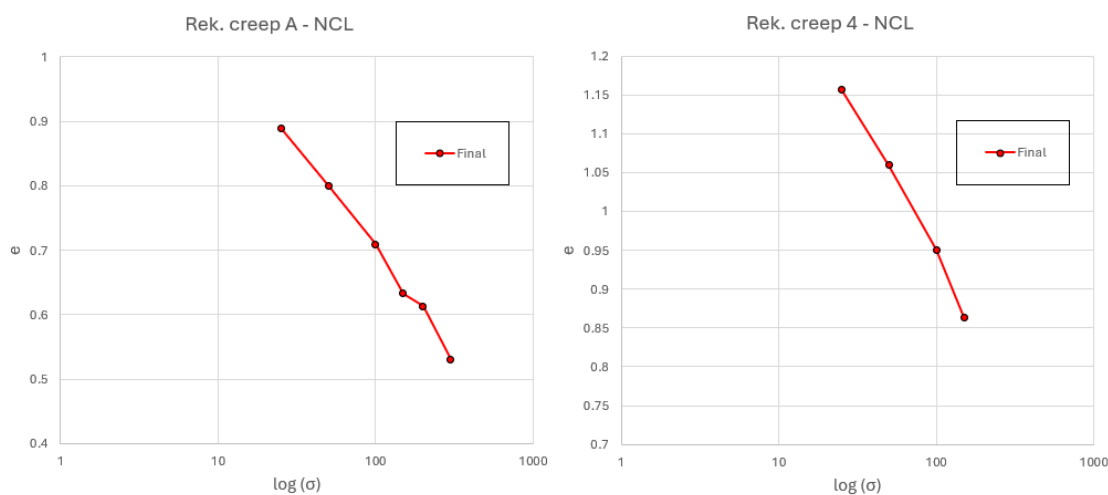


Obr. 27 – Křivka *NCL* pro creep multi – stage sestavená podle čísla pórovitosti na *tEOP* a čísla pórovitosti (*Final*) s příspěvkem creepu.





Obr. 28 – Porovnání NCL pro creep B, C a multi – stage.



Obr. 29 – NCL pro creep A a 4 podle finálního čísla pórovitosti.

	Cc (tEOP)	Cc (Final)	Cr
Rek creep. A		0.332	
Rek creep. B	0.447	0.448	0.056
Rek creep. C	0.613	0.610	0.052
Rek creep. 4		0.377	0.064
Creep multi - stage	0.457	0.456	

Tab. 5 – Hodnoty indexu stlačitelnosti vypočtené pomocí čísla pórovitosti na tEOP a konečného čísla pórovitosti s příspěvkem creepu (Final) se sklonem UL.

### 5.3 Výsledky zkoušek sekundární stlačitelnosti

Celkem byly v rámci laboratorních měření provedeny tři zkoušky sekundární stlačitelnosti na vzorcích slínovců z vrtu INP 1009 (17–19 m). Jednalo se o dvě dlouhodobé zkoušky creepu, s dobou trvání 74 dní, na které bylo navázáno kratším týdenním měřením creepu při zvýšeném

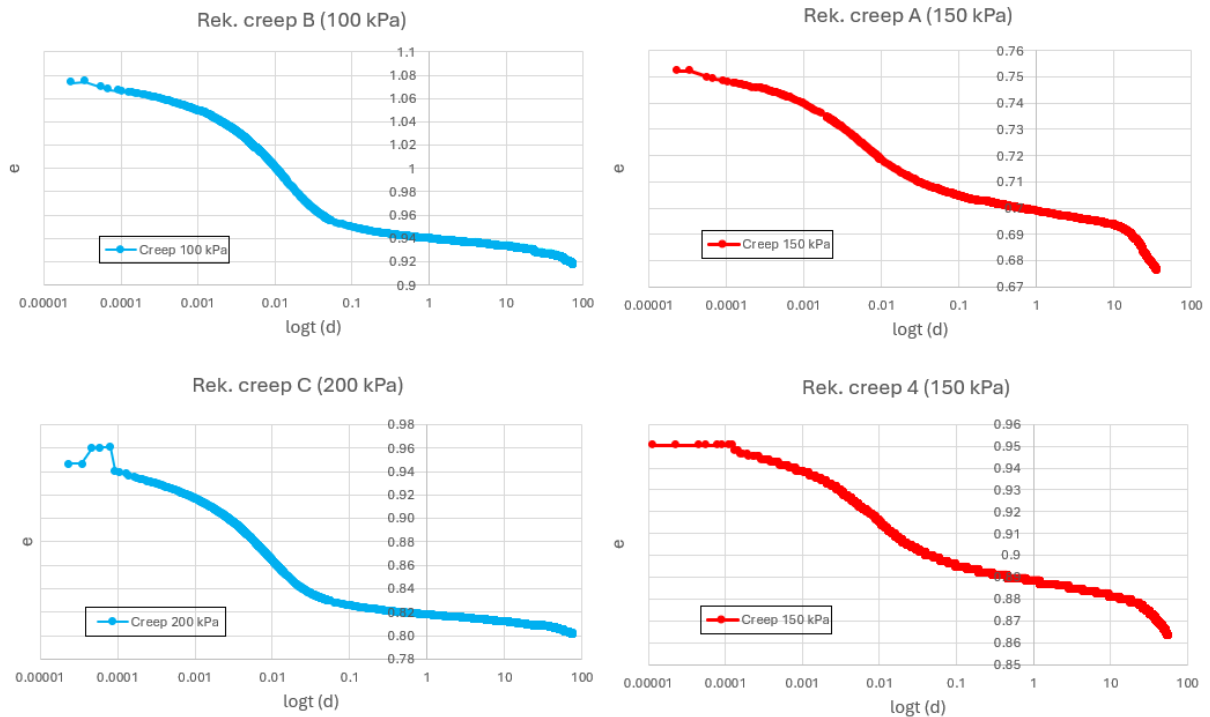
působícím napětí 1,5násobku předchozího napětí. Třetí zkouška zahrnovala multi – stage creep test, s jednotlivými měřeními creepu po dobu 7 dní pro čtyři po sobě jdoucí zatěžovací fáze (viz kapitola 5.4). Veškerá laboratorní měření jsou uvedena v Tab. 6, spolu s počáteční vlhkostí pro jednotlivé zkoušky ( $w_0$ ), jednotlivými zatěžovacími kroky, než došlo ke creepovým zkouškám, napětím, při kterém probíhal creep, časem konce konsolidace ( $t_{EOP}$ ) a dobou trvání creepu ve dnech.

	$w_0$	Zatěžovací kroky (kPa)	Creep	$t_{EOP}$ (m)	Doba trvání (d)
Rek. creep A	56	1.5, 25, 50, 100	150	41.0	37
	56		300	30.1	10
Rek. creep B	78	1.5, 25, 50	100	76.1	74
	78		150	68.6	8.9
Rek. creep C	78	1.5, 25, 50, 100	200	53.4	74
	78		300	39.2	8.9
Rek. creep 4	59	1.5, 25, 50, 100	150	59.6	57
Creep mult.	72	1.5, 5, 15	25	129.6	8.2
	72		50	111.5	8
	72		100	95.5	7.8
	72		200	76.4	9

Tab. 6 – Vstupní parametry pro jednotlivé zkoušky creepu.

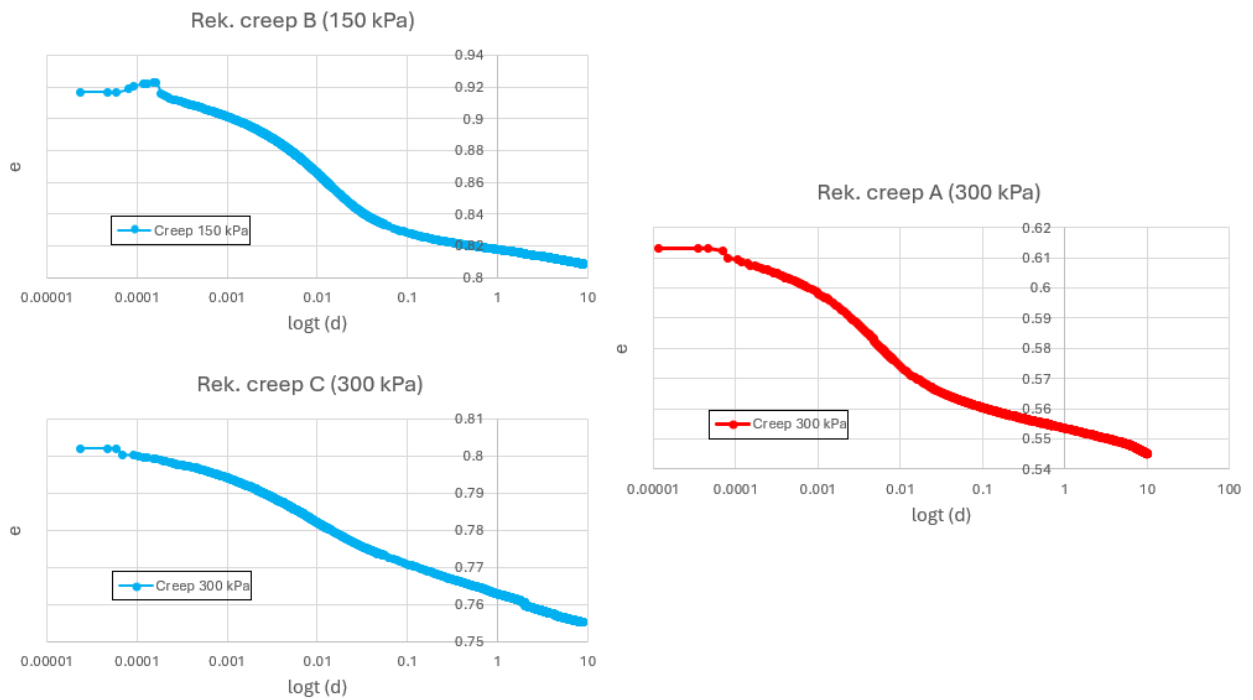
Pro vyjádření změny výšky vzorku bylo použito číslo pórovitosti, které během všech zkoušek klesá s časem a zvyšujícím se napětím. Jednotlivé creepové fáze jsou graficky vyjádřeny v semilogaritmickém měřítku závislosti  $e$  na  $t$  v jednotkách dnů. Vlastní laboratorní měření zahrnují zkoušky B, C a Creep multi – stage. Kromě vlastních měření byla přepracována naměřená data od Pospíchala (2014), tedy data A a 4, které byla naměřena v rámci jeho diplomové práce, aby bylo zachováno konzistentní zpracování všech měření. Pro lepší přehlednost jsou vlastní měření vynesena v grafech modrou čarou a přepracovaná data jsou znázorněna červeně.

Po vnesení dlouhodobých zkoušek creepu B a C do semilogaritmického zobrazení  $e$  na  $t$  je průběh křivky charakteristický přibližně lineárním průběhem. Je patrné, že deformace je závislá jak na počátečním čísle pórovitosti, tak času a především napětí, neboť číslo pórovitosti klesá při větším zatížení. Ke konci měření dochází k menšímu zrychlení deformace, které však nebylo dále měřeno z důvodu ukončení zkoušek po uplynutí předem stanovené doby. Porovnáním naměřených dat s daty z předchozích prací lze pozorovat zcela odlišný průběh creepu A a 4. V případě dlouhodobých zkoušek creep A i 4 dochází během zkoušky po uplynutí 15 a 30 dnů k náhlému zrychlení deformace způsobené creepem. Zde je opět vhodné zmínit, že během těchto zkoušek byl použit identický vzorek zeminy, který by měl mít stejné vlastnosti a průběh křivek sekundární stlačitelnosti by měl mít srovnatelný průběh. Pavlová (2014) přirovnávají tento tvar křivky ke křivkám difuzního kolapsu. Průběhy jednotlivých zkoušek jsou uvedeny na Obr. 30.



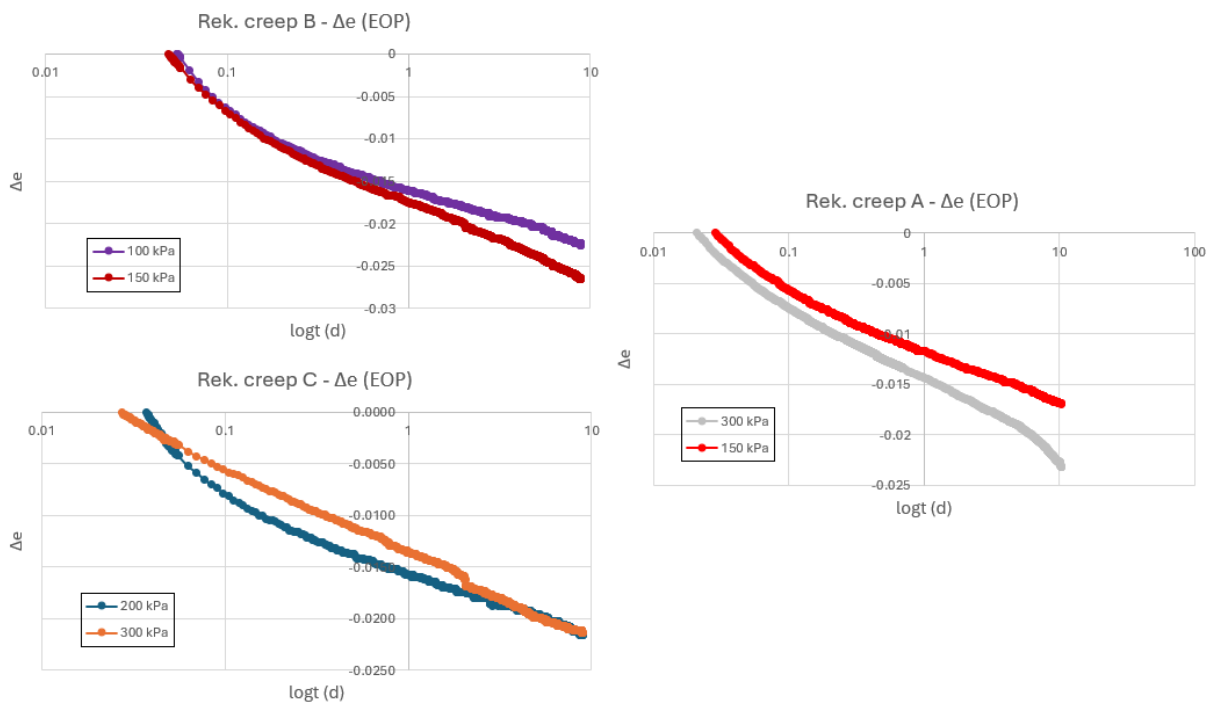
Obr. 30 – Průběh dlouhodobých zkoušek pro creepu A, B, C a 4.

Po uplynutí měření dlouhodobých zkoušek bylo provedeno u zkoušek A, B a C dalšímu přitížení 1.5násobkem předchozího napětí. Doba měření creepu zde byla řádově nižší, a to po dobu 7 (B a C) až 10 (A) dnů. Tyto křivky mají opět tvar typu 1 s výjimkou křivky pro C, který lze přirovnat k typu 2, který má během zkoušky přibližně konstantní závislost snížení  $e$  na  $\log t$ . I v takovém případě lze stanovit  $EOP$ . Zároveň zde není pozorován difuzní kolaps u A. Pokud by však ke kolapsu mělo docházet, musela by být zkouška provedena po delší dobu než 10 dní. Grafy pro jednotlivé zkoušky jsou uvedeny na Obr. 31.



Obr. 31 – Průběh zkoušek při vyšším napětí.

Vhodným parametrem porovnání závislosti rychlosti creepové deformace na působícím napětí je pomocí  $\Delta e$  od  $tEOP$ . Tímto lze porovnat jednotlivé zkoušky sekundární stlačitelnosti v jednom grafu. Počáteční změna čísla pórovitosti je rovna nule, dále je pak vypočtena rozdílem  $e$  na  $tEOP$  a  $e$  v dalším měřeném časovém úseku. Čas creepových zkoušek byl různý, a proto byl vybrán finální čas, tak aby korespondoval vždy s finálním časem kratší zkoušky. Porovnání pro jednotlivé zkoušky je uvedeno na Obr. 32.



Obr. 32 – Vyjádření změny čísla pórovitosti od  $tEOP$ .

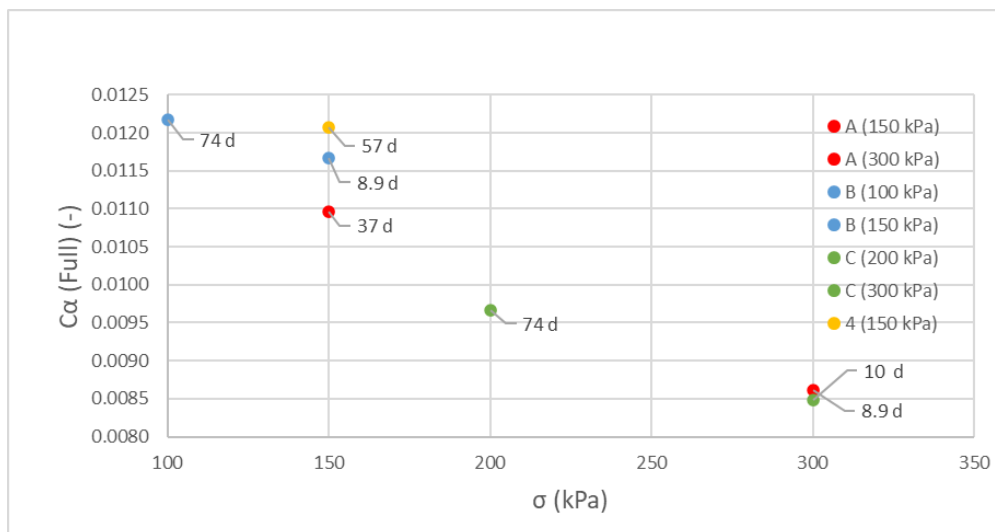
Posledním sledovaným parametrem u dlouhodobých zkoušek byly hodnoty indexu sekundární stlačitelnosti  $C_\alpha$ . Hodnoty pro všechny dlouhodobé zkoušky jsou uvedeny Tab. 7. Pro výpočet indexu stlačitelnosti byla využita rovnice (10) podle Mitchella a Sogy (2005).

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma} \quad (10)$$

	Napětí (kPa)	$C_\alpha$ (7d)	$C_\alpha$ (Full)	$C_\alpha$ (Full) Trvání (d)
Rek. creep A	150	0.0067	0.0110	37
	300	0.0082	0.0086	10
Rek. creep B	100	0.0102	0.0122	74
	150	0.0117	0.0117	8.9
Rek. creep C	200	0.0090	0.0097	74
	300	0.0086	0.0085	8.9
Rek. creep 4	150	0.0085	0.0121	57

Tab. 7 – Hodnoty indexu stlačitelnosti pro dlouhodobé creepové zkoušky. Červeně jsou vyznačeny křivky s difuzním kolapsem.

Tyto hodnoty jsou vyneseny v následujícím Obr. 33, kde je znázorněn vztah  $C_\alpha$  z finálního čísla pórovitosti na aplikovaném napětí pro jednotlivé zkoušky. Je však důležité zmínit, že doba trvání zkoušek byla různá. Výsledné hodnoty budou dále okomentovány v kapitole (6).

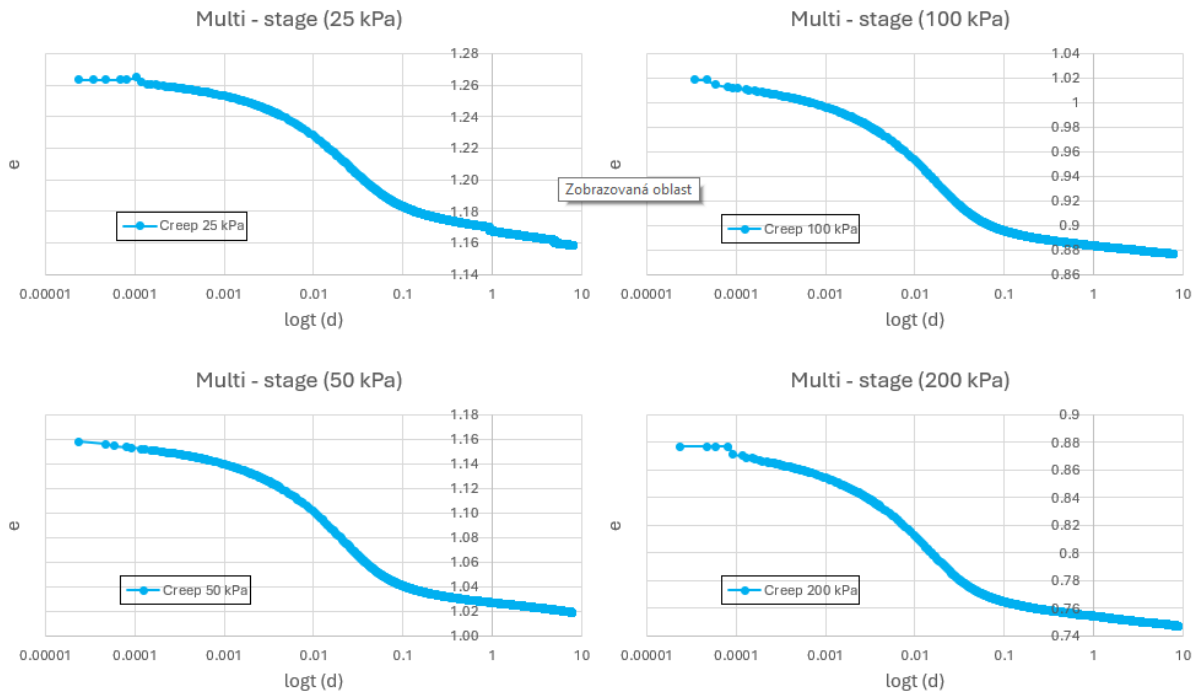


Obr. 33 – Závislost  $C_\alpha$  na napětí vypočítané podle finálního  $C_\alpha$  pro každou zkoušku s vyznačenou dobou trvání.

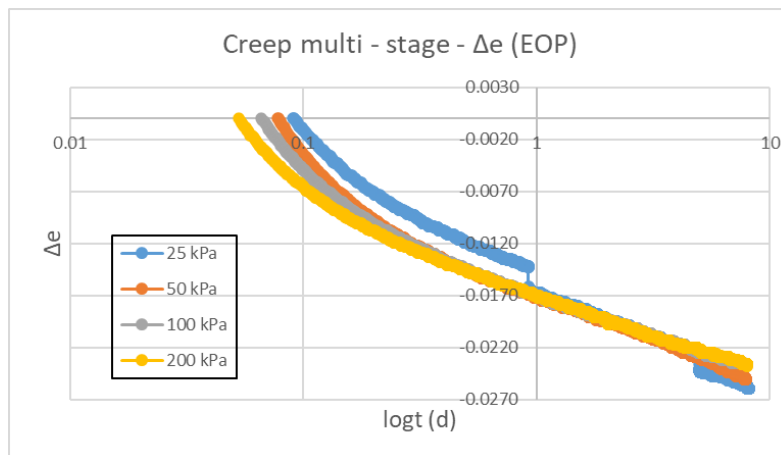
## 5.4 Výsledky multi – stage creep zkoušky

Měření u multi – stage creep testu probíhalo celkem při čtyřech různých napětích (25, 50, 100 a 200 kPa), kterým předcházely konsolidační kroky 1.5, 5 a 15 kPa. Pro každý stupeň bylo měření prováděno po dobu 7 dní, a to během jedné oedometrické zkoušky. Sledované parametry byly stejné jako u dlouhodobých zkoušek. Veškeré grafické přílohy jsou opět vyjádřeny závislostí  $e$  na  $t$  v semilogaritmickém zobrazení. Grafy pro zkoušky creepu jsou uvedeny na Obr. 34. Z výsledků je patrné, že během zkoušky dochází ke snižování čísla

pórovitosti s časem. Tvar všech křivek sekundární stlačitelnosti odpovídá typu 1. Tím potvrzují, že tento tvar je charakteristický pro rekonstituované vzorky. Vynesením  $\Delta e$  od  $tEOP$  je patrná závislost deformace na aplikovaném napětí. S rostoucím napětím je  $\Delta e$  větší pro nižší napětí, a tedy i větší počáteční číslo pórovitosti. Porovnání křivek pro všechny zatěžovací stupně v semilogaritmickém zobrazení  $\Delta e$  na  $t$  je na Obr. 35.

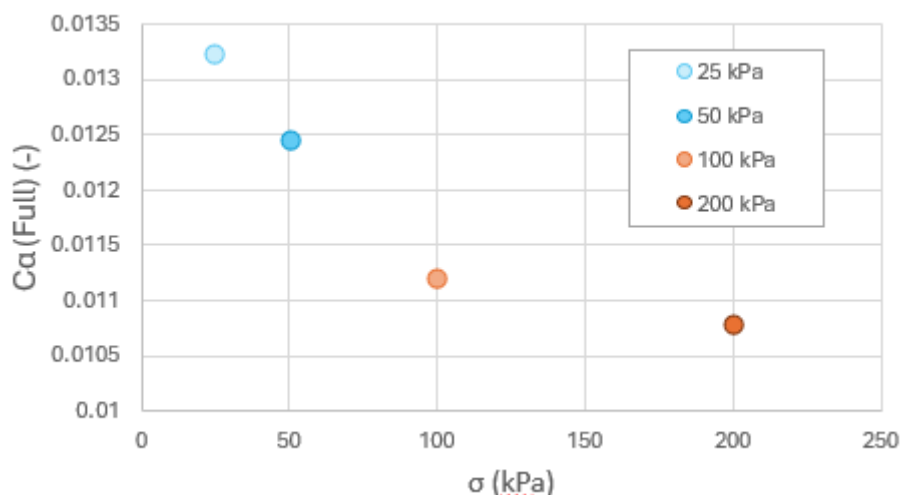


Obr. 34 – Průběh zkoušek multi – stage creep testu.



Obr. 35 - Vyjádření změny čísla pórovitosti od  $tEOP$  pro multi – stage creep test.

Index sekundární stlačitelnosti byl pro tuto zkoušku vypočítán opět stejným způsobem. Zde se opět nabízí využití vynesení jednotlivých  $C_\alpha$  do stejného grafu a sledování jeho změny s rostoucím napětím (Obr. 36). Výsledky poukazují, že  $C_\alpha$  je závislé na napětí. Nižší hodnoty napětí vykazují vyšší hodnoty  $C_\alpha$ , a větší změnu čísla pórovitosti. Shrnutí finálních hodnot  $C_\alpha$  jsou uvedena v Tab. 8.



Obr. 36 - Závislost  $C_\alpha$  na aplikovaném napětí, data znázorněna v následující tabulce

	Napětí (kPa)	$C_\alpha$ (Full)
Creep multi.	25	0.01323
	50	0.01245
	100	0.01121
	200	0.01079

Tab. 8 – Hodnoty  $C_\alpha$  pro multi – stage creep test.

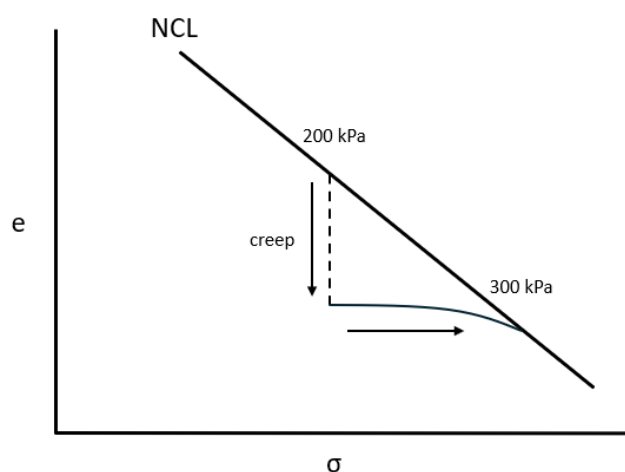
## 6 Diskuse

Výsledky laboratorních měření naznačují, odlišné chování creepu identických slínovců ze sesuvného území Prackovice (vrt INP 1009 17–19 m). Předchozí měření vykazují chování difuzního kolapsu mezi 15 až 30 dnem měření v závislosti na napětí (Pospíchal, 2024). Vlastní zkoušky sekundární stlačitelnosti však výskyt difuzního kolapsu nepotvrzují. Zde je důležité poukázat na rozdílnou přípravu rekonstituovaného vzorku, který by mohl být důležitým parametrem ovlivňující chování creepu. Nedostatečnou homogenizací vzorku a urychlením fáze snižování vlhkosti na začátku zkoušky by mohlo docházet k vzniku druhotné struktury. K jejímu kolapsu dochází během laboratorních zkoušek až po delší době, kdy je zemina vystavena konstantnímu napětí. Pavlová difuzní kolaps pozorovala u neogenních brněnských jílu, a popisují ho jako deformaci slabší struktury zeminy (Pavlová, 2014). Zkoušky prováděla na neporušených a rekonstituovaných vzorcích, které byly před zkouškou rekonsolidovány na požadované napětí. Z metodologie práce vyplývá, že vzorek byl míchán po dobu 20 hodin. Při míchání nevyužila destilované vody, ale převařené vody z kohoutku. Po homogenizaci byl vzorek o umístěn do ledničky pro zachování požadované vlhkosti (Pavlová, 2014).

Problematickou součástí zkoušky je nadále vytlačování zeminy, které bylo pozorované u zkoušky C. Creep B a C mají identickou počáteční vlhkost, která by měla reflektovat podobný objem pevné fáze na konci laboratorních měření. Po vysušení vzorku je patrné, že dochází

k většímu úbytku pevné fáze z oedometrického prstence, které zpětným výpočtem vede k nadhodnocení počátečního čísla pórovitosti. Výsledná *NCL* se tak jeví v semilogaritmickém zobrazení nelineární mezi bodem 25–50 kPa. Pokud bodu 25 kPa dosadí hodnota, odpovídající B průběh se stává lineárním. K odstranění tohoto problému je zapotřebí přidat více konsolidačních kroků před napětím 25 kPa, tak aby k vytlačování během této fáze nedocházelo. Proto bylo pro multi – stage, který byl proveden po dlouhodobých zkouškách, přidáno více konsolidačních kroků (1.5, 5, 15 kPa) před 25 kPa.

Creep C (300 kPa) se dále jeví chováním křivky typu 2, které by mohlo být způsobeno poklesem čísla pórovitosti hluboko pod *NCL* při zatěžovacím stupni 200 kPa tak, že se vzorek projevuje chováním překonsolidované zeminy, kdy se dlouhotrvajícím creepem (72 dní) stav zeminy (*e*) dostal až na hodnoty blízko hodnotě *e* odpovídající dalšímu přitěžovacímu kroku. Schéma je vyobrazeno na Obr. 37.



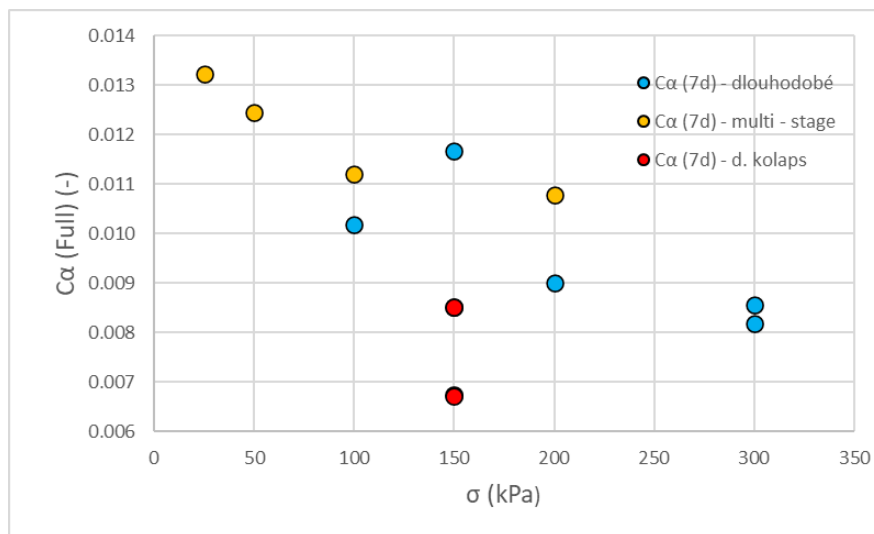
Obr. 37 – Schéma poklesu čísla pórovitosti pro zkoušku C před napětím 300 kPa.

Vlastní naměřené hodnoty  $C_\alpha$  pro dlouhodobé zkoušky vyjádřené v Obr. 33 ukazují, že rychlost creepu je závislá na působícím napětí, ale i počáteční vlhkosti, a tedy číslu pórovitosti před měřením. S rostoucím napětím klesá  $C_\alpha$ , tedy rychlost creepové deformace. Porovnáním vlastních naměřených hodnot se zkouškami A a 4, který byl proveden při nižší počáteční vlhkosti, není potvrzena závislost počátečního čísla pórovitosti na rychlosti deformace. Hodnoty jsou v grafu umístěny výše, než by teorie předpokládala. Tato skutečnost může být způsobena náhlým zrychlením, způsobené difuzním kolapsem, který při výpočtu sklon creepové křivky  $C_\alpha$  nadhodnocuje. Jednotlivé body A a 4 jsou oproti ostatním posunuty směrem nahoru ačkoliv jejich počáteční vlhkost byla v řádu desítek procent nižší. Zajímavým chováním se jeví především zkouška 4, který se dostává svou hodnotou  $C_\alpha$  nad hodnotu zkoušky B (150 kPa).

U multi – stage creep testu lze pozorovat stejnou závislost creepu na napětí. Hodnota  $C_\alpha$  pro jednotlivé zkoušky klesá s rostoucím napětím. Zároveň multi-stage creep test potvrzuje, že k větší změně čísla pórovitosti dochází při menších zatížení, kdy má zemina větší počáteční číslo



pórovitosti před zkouškou. Porovnání všech  $C_\alpha$  v intervalu od  $tEOP$  po dobu 7 dní pro všechny provedené zkoušky je na Obr. 38. Z grafu vyplývá, že historie zatěžování pravděpodobně nemá vliv na rychlost creepu, neboť hodnoty  $C_\alpha$  pro multi – stage creep test dosahují kromě případu zkoušky B (150 kPa) vyšších hodnot, ačkoliv byly konsolidovány ve více krocích. Z výsledků je také patrné, že zkoušky, u kterých byl pozorován difuzní kolaps, vykazují zřetelně nižší hodnoty  $C_\alpha$ , než je trend u ostatních zkoušek. To lze přisuzovat vlivu druhotně vzniklé struktury zeminy na rychlost creepu, kdy dochází ke zrychlení až při změně vytvořené struktury, pravděpodobně při tvorbě rekonstituovaného vzorku. Tato struktura zeminu na počátku zpevňuje, dokud nedojde k jejímu zborcení. Je také třeba podotknout, že k difuznímu kolapsu došlo u obou zkoušek až po uplynutí 7 dní.



Obr. 38 – Porovnání  $C_\alpha$  pro všechny provedené zkoušky od  $tEOP$  po 7 dní.

## 7 Závěr

Stlačitelnost se u zemin projevuje objemovou změnou. Je závislá na složení zeminy. Řídí se odtokem vody při hydraulickém gradientu, který vzniká v důsledku vnějšího zatížení. Tento proces se nazývá konsolidace. Vyjadřuje se indexem stlačitelnosti  $C_c$ , který definuje sklon křivky stlačitelnosti  $NCL$ . Sekundární stlačitelnost (creep) je deformace při nulovém přírůstku efektivního napětí. Projevuje se především u jemnozrnných zemin. Je řízena odlišnými procesy než konsolidace, mezi které patří porušení vazeb mezi částicemi, přeskupení struktury a pozice částic, vytlačování pórové tekutiny z mikropórů, pohyb iontů a deformace způsobené strukturní viskozitou. Creep je ovlivněn faktory, které vedou ke zrychlení nebo zpomalení deformace. Patří mezi ně působící napětí, teplota, překonsolidace, druhy fluid v zemině, obsah jílové frakce a plasticita. Sekundární stlačitelnost se vyjadřuje indexem sekundární stlačitelnosti  $C_\alpha$ , který se vyjadřuje jako poměr změny čísla pórovitosti  $e$  a logaritmu  $t$ . Jeho hodnota klesá s časem a aplikovaným napětím. Při laboratorních měřeních lze očekávat tři druhy křivek sekundární stlačitelnosti. Nejběžnějším tvarem je typ 1, v literatuře pojmenován

jako tvar S. Zajímavý se jeví tvar 3, který vykazuje charakter difuzního kolapsu. Procesu, při kterém dochází k náhlému nárůstu rychlosti deformace s časem.

V rámci bakalářské práce byl stanoven  $C_c$  pro slínovce březenského souvrství, který nabývá hodnot 0,332 – 0,613. Dále byly sestrojeny křivky stlačitelnosti pro všechny oedometrické zkoušky. Nestandardní chování je pozorováno u zkoušky C, během které docházelo k vytlačování zeminy, a tedy nadhodnocení počátečního čísla pórovitosti způsobeného redukcí pevné fáze při zpětném výpočtu. Pro další měření jílových zemin je vhodné zvýšit počet konsolidačních kroků na začátku zkoušky, aby se tomuto faktoru předešlo. Tento postup byl aplikován pro pozdější zkoušky creep multi – stage.

Pomocí dlouhodobých oedometrických zkoušek sekundární stlačitelnosti byl stanoven parametr  $C_\alpha$  slínovců březenského souvrství ze sesuvného území Prackovice, pohybující se v rozmezí 0,009 - 0,012 v závislosti na aplikované napětí během měření. Hodnoty spadají do stejného intervalu jako přepracovaná měření provedená v rámci diplomové práce Pospíchala (2024), který získal hodnoty  $C_\alpha$  0,067 – 0,012. Podle teorie jsou tyto hodnoty typické pro normálně konsolidované jílové zeminy. Porovnání hodnot  $C_\alpha$  pro interval sedmi dní a průběh celé zkoušky ukazuje, že dochází k zvýšení hodnot  $C_\alpha$  s přibývajícím časem. Hodnoty  $C_\alpha$  se zvyšují o 0,0007 – 0,0020. Data Pospíchala (2024) však vykazují nárůst dosahující až dvojnásobku. K určitému zrychlení deformace dochází v obou případech, liší se však jak časem, tak zvýšením rychlosti deformace, která je pro případ převzatých dat popsána jako difuzní kolaps. Difuzní kolaps vede k nestandardnímu chování této zeminy, které se projevuje výrazným zrychlením creepu při nižším počátečním číslu pórovitosti. Rozdílné chování identických zemin může být způsobeno odlišnou přípravou rekonstituovaného vzorku. Postup byl pro obě práce téměř identický s výjimkou homogenizace vzorku a procesu snižování vlhkosti. Vliv struktury by mohl způsobovat odlišné chování, kdy vzorky s difuzním kolapsem vykazují nižší hodnoty  $C_\alpha$  při výpočtu z intervalu od  $t_{EOP}$  po sedm dní než  $C_\alpha$  stanovené pro průběh celé zkoušky. K ověření, zda při přípravě rekonstituovaného vzorku může docházet ke vzniku druhotné struktury, by bylo vhodné provedení většího množství laboratorních zkoušek s kontrolou přípravy vzorků.

Creep multi – stage s měřením trvajícím jeden týden pro každé napětí (25, 50, 100, 200 kPa) vykazuje standardní chování v souladu s teorií. Poukazuje na zpomalování creepu s časem a aplikovaným napětím. Průběh křivek je lineární se snižujícím se indexem sekundární stlačitelnosti, který nabývá hodnot od 0,010 - 0,013. Tato skutečnost odpovídá předpokladu Yin et al. (2002), že nemůže docházet ke konstantní deformaci, ale deformace musí být po určité době ukončena, a tedy postupně musí docházet ke zpomalování creepu (snižování hodnoty  $C_\alpha$ ).

## 8 Seznam použité literatury

Atkinson, J. (2017). *The mechanics of soils and foundations*. CRC press.

Augustesen, A., Liingaard, M., & Lade, P. V. (2004). Evaluation of time-dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3), 137-156.

Chlupáč, I. (2002). *Geologická minulost České republiky*. Academia.

ČSN EN ISO 17892-5 (2017). Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním. Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví. Praha.

Demek, J., Mackovčín, P., Balatka, B., Buček, A., Cibulková, P., Culek, M., ... & Culek, M. (2006). *Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR*. MŽP ČR.

Falowo, O. O., & Dahunsi, S. D. (2020). Geoengineering Assessment of Subgrade Highway Structural Material along Ijebu Owo–Ipele Pavement Southwestern Nigeria. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, 7(4), 1-10.

Geologická mapa 1: 50 000. In: Geovědní mapy 1: 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2024-04-8]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Head, K. H. (1994). *Manual of soil laboratory testing. Volume 2: permeability, shear strength and compressibility tests (No. Ed. 2)*. Pentech Press Ltd.

Jerman, J. (2022). Development and validation of a hypoplastic model for soft clays incorporating rate effects and strength anisotropy. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Praha: Disertační práce.

Kachlík, V. (2003). *Geologický vývoj území České republiky. SÚRAO, Praha*.

Kaczmarek, Ł., & Dobak, P. (2017). Contemporary overview of soil creep phenomenon. *Contemporary Trends in Geoscience*, 6.

Kaddouri, Z., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2019). Influence of effective stress and temperature on the creep behavior of a saturated compacted clayey soil. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 17, 106-114.

Klimeš, J. (2018). Mapa svahových deformací v širším okolí dálnice D8 v úseku mezi obcemi Dobkovičky a Prackovice nad Labem. *Geoscience Research Reports*, 51, 201-205.

Kycl, P., Fraňek, J., Roháč, J., Rapprich, V., Rapantová, N., Alexa, M., Kučera, R., Florián, T. (2020). 3 D geologický model podél D8 v okolí Prackovické estakády SO A210 a přilehlého násypu N3. Česká geologická služba.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. John Wiley & Sons. New York

Le, T. M., Fatahi, B., & Khabbaz, H. (2012). Viscous behaviour of soft clay and inducing factors. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1069-1083.

Lo, K. Y. (1961). Secondary compression of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 87(4), 61-88.

Mapované svahové deformace, Registrační záznamy, Listoklad ZM 10. In: Svahové deformace [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2024-07-21]. Dostupné z: [https://mapy.geology.cz/svahove\\_deformace/](https://mapy.geology.cz/svahove_deformace/)

Matula, M., & Pašek, J. (1986). *Regionálna inžinierska geológia ČSSR*. Alfa.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3, p. USA). New York: John Wiley & Sons.

Najser, J., & Mašín, D. (2024). An experimental study on thermal relaxation of BCV bentonite. *Applied Clay Science*, 254, 107374.

Nguyen Duy, M., & Jerman, J. (2024). Experimental investigation of influence of soil plasticity on compression characteristics and creep behaviour of clayey soils. In: XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Lisbon. (*v tisku*)

Olek, B. S. (2022). An experimental investigation of the influence of plasticity on creep degradation rate. *Acta Geotechnica*, 17(3), 803-817.

Pavlová, M. (2014). Sekundární stlačitelnost brněnského téglu. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Praha: Diplomová práce.

Pospíchal, V. (2024). Analýza svahového pohybu Dubičná – mechanické vlastnosti slínovců a stabilitní poměry. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Praha: Diplomová práce.

QUITT, E. (1971). Klimatické oblasti Československa [Climatic regions of Czechoslovakia]. Brno. Geografický ústav ČSAV. *Studia geographica*.

Raška, P., & Cajz, V. (2016). Neovolcanic terrain of the České středohoří mountains. *Landscapes and landforms of the Czech Republic*, 139-152.

Rotová, P., Alferi, K., (2017). Inženýrskogeologické poměry v oblasti Prackovic a vznik svahové deformace na novém úseku dálnice D8. ŘSD ČR. Praha.

Stemberk, J., Mašín, D., Balek, J., Blahůt, J., Hartvich, F., Chaloupka, D., Kadlečík, P., Kalinová, R., Klimeš, J., Král, J., Kusák, M., Rott, J., Rybář, J., Špaček, P., Tábořík, P. (2016). Analýza příčin vzniku sesuvu na dálnici D8 u Dobkoviček. Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR. Praha.

Varatharajan, S. (2011). 1D comperssion creep behavior of kaolinite and bentonite clay. *department of civil engineering Calgary, Phd Thesis, Alberta*.

Wood, D. M. (1990). *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge university press.