

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ  
FAKULTA**

**Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky**



# **Mechanické vlastnosti zemin z pískovny Kolný v třeboňské pánvi**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Martina Englmaierová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Konzultant: Mgr. Radek Suchomel

**Praha, září 2010**

Tuto diplomovou práci jsem vypracovala na Ústavu hydrologie, inženýrské geologie a užití geofyziky pod vedením Ing. Jana Boháče, CSc. Prohlašuji, že jsem ji vypracovala samostatně, použila jsem pouze své výsledky a převzaté informace jsem ocitovala. Souhlasím s jejím zapůjčením ke studijním účelům.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala těm, kteří mi při psaní diplomové práce pomáhali. Zejména velice děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Boháčovi, CSc. za vedení práce. Svými cennými radami a připomínkami mi hodně pomohl při vyhotovení této práce. Dále bych chtěla poděkovat i konzultantovi doktorandu Mgr. Radkovi Suchomelovi, který mi pomáhal s realizací a vyhodnocováním laboratorních zkoušek. V neposlední řadě bych chtěla také poděkovat své rodině a přátelům za podporu a poskytnuté zázemí.

V Praze

24. srpna 2010

Martina Englmaierová

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce vznikla jako součást projektu doktoranda Mgr. Radka Suchomela. Pro jeho doktorskou práci bylo nutné provést velké množství laboratorních zkoušek. Laboratorní zkoušky byly navrženy tak, aby bylo možné získat dostatek informací pro kalibraci hypoplastického konstitučního modelu pro hrubozrnné zeminy. Hypoplastický model pro hrubozrnné zeminy má osm materiálových parametrů (von Wolffersdorff, 1996). Jeden z osmi parametrů je kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_c'$ , který lze stanovit přímo z úhlu přirozené sklonitosti. Ostatní parametry se stanovují z výsledků experimentů i empiricky.

Cílem předkládané diplomové práce bylo provést polní a laboratorní zkoušky a stanovení vybraných vlastností zemin a jejich interpretace s ohledem na variabilitu zeminy ve stěně pískovny.

Pro odběr vzorků byla zvolena pískovna Kolný, která leží v západní části třeboňské pánve v klikovském souvrství. Souvrství se vyznačuje fluvialní sedimentací a je charakteristické horizontálním zvrstvením a střídáním štěrkopísků, písků a písků s tmavě šedými jílovitými vložkami. Vzorky byly odebrány ve stěně pískovny v pravidelné síti s rozměry 9 x 36 m.

Na odebrané zemině byly provedeny tyto zkoušky: 38 triaxiálních zkoušek, 38 edometrických zkoušek, 38 měření úhlu přirozené sklonitosti, 37 zrnitostí a 5 stanovení objemové hmotnosti pomocí membránového objemoměru.

Výsledky ukazují, že odebraná zemina měla charakter štěrkopísku s průměrným obsahem částic menších než 0,063 mm do 13%. Z výsledků vztahu mezi  $\varphi_c'$  a zrnitostí se prokázalo, že hodnota  $\varphi_c'$  je závislá na obsahu částic větších než 2 mm a na obsahu částic od 0,63 mm až do 0,2 mm. Dále výsledky ukázaly, že hodnota vrcholového úhlu  $\varphi_p'$  stanovená z triaxiální zkoušky je závislá na pórovitosti. Hodnota indexu stlačitelnosti  $C_C$  zjištěná z edometrické zkoušky je závislá na čísle křivosti a na čísle nestejnozrnnosti, dále je  $C_C$  závislý na pórovitosti vzorku. To naznačuje, že se jedná o různé zeminy.

## ABSTRACT

This thesis originated as a part of the PhD research carried out by Mgr. Radek Suchomel. To calibrate a hypoplastic model for granular materials a large number of laboratory tests was needed and a part of the testing constitutes the present thesis. The hypoplastic model by von Wolffersdorff (1996) has eight materials parameters. The critical state friction angle  $\varphi_c'$ , which was obtained directly by the measurement of the angle of repose, is one of the eight parameters. Other parameters are determined from the results of experiments and empirically.

Aim of this thesis was to carry out field and laboratory tests, to determine selected soil properties and to interpret them with regard to the variability of the soil in the selected face of the sand pit.

The material for investigation comes from the south part of the Cretaceous Třeboň Basin in the South Bohemia from the Kolný sand pit. The pit is located in the upper part of the Klikov layers. The fluvial layers are characterised by rhythmical variation of gravelly sands, sands and sands with dark grey clayey inclusion. Samples were taken in the face of the sand pit with the dimensions of 9 x 36 m.

The following tests were performed: drained triaxial compression test (38 samples), oedometric compression test (38 samples), measurement of the angle of repose (38 samples), determination of particle size distribution (37 samples) and determination of density in situ (5 points).

The results show, that the soil had the character of gravelly sands with an average content of particles smaller than 0.063 mm to 13%. The results show that the value of the critical friction angle  $\varphi_c'$  depends on the content of particles larger than 2 mm and the content of particles from 0.63 mm to 0.2 mm. The value of the peak friction angle  $\varphi_p$  obtained from the triaxial tests is dependent on the porosity. The value of the compression index  $C_C$  obtained of oedometre test depends on the shape of the grading curve - the curvature coefficient and the non-uniformity coefficient. The  $C_C$  was also dependent on the porosity of the sample, which shows that different soils were tested.

## OBSAH

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE.....	1
2	PARAMETRY HYPOPLASTICKÉHO MODELU PRO HRUBOZRNNÉ ZEMINY.....	2
2.1	Parametry.....	2
2.2	Stanovení parametrů.....	2
3	METODIKA PRÁCE .....	4
3.1	Popis lokality.....	4
3.1.1	Geologická charakteristika lokality.....	4
3.1.1.1	Klikovské souvrství.....	5
3.2	Odběr vzorků.....	6
3.3	Stanovení pórovitosti pomocí membránového objemoměru.....	6
3.3.1	Postup měření.....	7
3.4	Zrnitost.....	8
3.4.1	Příprava zeminy pro zkoušku.....	9
3.4.2	Popis zkoušky.....	9
3.5	Měření úhlu přirozené sklonitosti.....	9
3.5.1	Příprava zeminy pro zkoušku.....	9
3.5.2	Popis sypání kuželu a měření úhlu přirozené sklonitosti.....	10
3.6	Triaxiální zkouška.....	10
3.6.1	Příprava zeminy pro zkoušku.....	11
3.6.2	Popis přípravy vzorku.....	11
3.6.3	Vyhodnocení triaxiální zkoušky.....	13
3.7	Edometrická zkouška.....	14
3.7.1	Příprava zeminy pro zkoušku.....	14
3.7.2	Popis přípravy vzorku.....	14
3.7.3	Vyhodnocení edometrické zkoušky.....	15

3.8	Statistické vyhodnocení dat .....	16
4	VÝSLEDKY .....	17
4.1	Pórovitost.....	17
4.2	Zrnitost .....	17
4.3	Úhel přirozené sklonitosti .....	21
4.4	Triaxiální zkouška .....	26
4.5	Edometrická zkouška .....	31
5	ZÁVĚR .....	37
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	38
7	PŘÍLOHY .....	40

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozšíření svrchnokřídových a terciérních sedimentů v jihočeských pánvích.....	4
Obrázek 2: Profil odběru vzorků.....	6
Obrázek 3: Membránový objemoměr.....	7
Obrázek 4: Schéma použití membránového objemoměru .....	8
Obrázek 5: Stanovení kritického úhlu vnitřního tření.....	10
Obrázek 6: Schéma komory pro triaxiální zkoušku .....	12
Obrázek 7: Edometrická buňka .....	15
Obrázek 8: Četnost kritického úhlu vnitřního tření $\varphi_c'$ .....	21
Obrázek 9: Závislost úhlu přirozené sklonitosti $\varphi_c'$ na obsahu zrn nad 2 mm v % .....	23
Obrázek 10: Závislost úhlu přirozené sklonitosti $\varphi_c'$ na obsahu zrn 0,2 mm– 0,63 mm .....	23
Obrázek 11: Závislost úhlu přirozené sklonitosti $\varphi_c'$ na čísle křivosti $C_c$ .....	24
Obrázek 12: Závislost úhlu přirozené sklonitosti $\varphi_c'$ na čísle nestejnozrnnosti $C_u$ .....	24
Obrázek 13: Úhel přirozené sklonitosti $\varphi_c'$ v profilu místa odběru vzorků.....	25
Obrázek 14: Obsah částic > 2 mm v profilu místa odběru vzorků.....	25
Obrázek 15: Četnost zastoupení vrcholového úhlu vnitřního tření $\varphi_p'$ .....	26
Obrázek 16: Závislost objemového přetvoření $\varepsilon_v$ na pórovitosti $n_0$ .....	27
Obrázek 17: Závislost vrcholového úhlu vnitřního tření $\varphi_p'$ na pórovitosti $n_{po}$ konsolidaci .....	28
Obrázek 18: Početní zastoupení pórovitosti vzorků před konsolidací $n_0$ .....	29
Obrázek 19: Početní zastoupení pórovitosti vzorků po konsolidaci $n_{po}$ konsolidaci.....	29
Obrázek 20: Vrcholový úhel $\varphi_p'$ v profilu místa odběru vzorků.....	30
Obrázek 21: Stanovení zrnitosti před a po edometrické zkoušce na vzorku A1 a E1.....	32
Obrázek 22: index stlačitelnosti $C_c$ v profilu odběru vzorků.....	33
Obrázek 23: Závislost indexu stlačitelnosti $C_c$ na čísle nestejnozrnnosti $C_u$ .....	34

Obrázek 24: Závislost indexu stlačitelnosti $C_C$ na čísle křivosti $C_c$ .....	34
Obrázek 25: Graf závislosti indexu stlačitelnosti $C_C$ na pórovitosti $n_0$ .....	35
Obrázek 26: Graf závislosti indexu stlačitelnosti $C_C$ na pórovitosti $n_{sat}$ .....	36
Obrázek 27: Závislost indexu stlačitelnosti $C_C$ na pórovitosti $n_{fin}$ .....	36



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty efektivní průměr zrn $D_{13}$ , číslo nestejnozrnnosti $C_u^*$ , číslo křivosti $C_c^*$ .	18
Tabulka 2: Charakteristiky křivky zrnitosti při stanovení $\varphi_c'$ (číslo nestejnozrnnosti $C_u$ , číslo křivosti $C_c$ ) .....	20
Tabulka 3: Výsledky měření kritického úhlu vnitřního tření $\varphi_c'$ .....	22
Tabulka 4: Výsledky traxiální zkoušky: vrcholový úhel $\varphi_p'$ , pórovitost před konsolidací $n_0$ , pórovitost před smykovou fází $n_{po\ konsolidaci}$ .....	30
Tabulka 5: Výsledné hodnoty z edometrické zkoušky: číslo pórovitosti na počátku při napětí 0 kPa $e_0$ , číslo pórovitosti po zalití při napětí 10 kPa $e_{sat}$ , číslo pórovitosti na konci přitěžování při napětí 6400 kPa $e_{fin}$ , index stlačitelnosti $C_C$ .....	33

# 1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

Tato diplomová práce vznikla jako součást projektu doktoranda Mgr. Radka Suchomela. Pro jeho doktorskou práci bylo nutné provést velké množství laboratorních zkoušek. Velké množství potřebných zkoušek předurčilo výběr materiálu na hrubozrnnou zeminu, u které je možné zkoušky realizovat v relativně krátkém čase. Laboratorní zkoušky byly navrženy tak, aby bylo možné získat dostatek informací pro kalibraci hypoplastického konstitučního modelu pro hrubozrnné zeminy. Hypoplastický model pro hrubozrnné zeminy má osm parametrů (von Wolffersdorff 1996). Jeden z osmi parametrů je  $\varphi_c'$  kritický úhel vnitřního tření, který lze stanovit přímo z úhlu přirozené sklonitosti. Ostatní parametry se stanovují z výsledků experimentu i empiricky.

Cílem mé diplomové práce bylo provést laboratorní a polní zkoušky na zemině z pískovny Kolný a stanovení vybraných vlastností zemin a jejich interpretace s ohledem na variabilitu zeminy ve stěně pískovny.

Na zemině jsem provedla tyto zkoušky:

1. Stanovení pórovitosti in situ pomocí membránového objemoměru.
2. Drénované triaxiální zkoušky na nasycených a hutněných vzorcích tak, aby číslo pórovitosti odpovídalo pórovitosti stanovené membránovým objemoměrem v pískovně Kolný. Všechny triaxiální zkoušky byly provedeny za stejných podmínek se stejným komorovým tlakem 200 kPa.
3. Úhel přirozené sklonitosti, který se připravoval na suché zemině s odstraněnou frakcí  $< 0,063$  mm. Z úhlu přirozené sklonitosti se stanovil kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_c'$ .
4. Edometrické zkoušky na vodou prolitých vzorcích. Všechny vzorky byly provedeny za stejných podmínek s přitěžovacími stupni 10, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 kPa.
5. Stanovení zrnitosti pomocí síťového rozboru mokrou cestou.

## 2 PARAMETRY HYPOPLASTICKÉHO MODELU PRO HRUBOZRNNÉ ZEMINY

### 2.1 Parametry

Hypoplastický model pro hrubozrnné zeminy (von Wolffersdorff 1996) má osm materiálových parametrů. Parametry pro hypoplastický model jsou: kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_c'$ ,  $h_s$ , ovlivňující sklon edometrické křivky,  $n$  ovlivňující křivost edometrické křivky, kritické číslo pórovitosti při nulovém napětí  $e_{c0}$ , minimální číslo pórovitosti při nulovém napětí  $e_{d0}$ , maximální číslo pórovitosti při nulovém napětí  $e_{i0}$ , parametr ovlivňující vrcholovou pevnost  $\alpha$ , parametr ovlivňující smykovou tuhost zeminy  $\beta$ .

### 2.2 Stanovení parametrů

$\varphi_c'$  - úhel vnitřního tření: stanovuje se buď přímo z úhlu přirozené sklonitosti suché zeminy, anebo pomocí smykové zkoušky. Ačkoliv tvar kužele není úplně kónický a měřený úhel může být mírně ovlivněn metodou přípravy, hodnoty  $\varphi_c'$  určené touto cestou velmi dobře korespondují s hodnotami získanými ze smykové zkoušky (Herle a Gudehus, 1999).

$h_s$  - tvrdost zrn: ovlivňuje sklon edometrické křivky. Stanovuje se přímo z edometrické křivky v zobrazení  $e$  na  $\ln p$ . Jediný parametr s rozměrem (napětí) (Herle a Gudehus, 1999).

$n$  - parametr: ovlivňuje zakřivení edometrické křivky. Vystihuje stlačitelnost zeminy. Stanovuje se přímo z edometrické křivky (Herle a Gudehus, 1999).

$e_{c0}$  - kritické číslo pórovitosti při nulovém napětí: podle postupu, který byl uveden Herlem a Gudehusem (1999) se jako  $e_{c0}$  zvolila hodnota maximálního čísla pórovitosti edometrického vzorku  $e_{max}$ . Vzorek pro edometrickou zkoušku byl sypán co nejkypřeji z konstantní výšky.

$e_{i0}$  - maximální číslo pórovitosti při nulovém napětí: reprezentuje průsečík čáry isotropní stlačitelnosti s přímkou  $p = 0$ . Fyzikální význam  $e_{i0}$  je číslo pórovitosti maximálně kyprém uspořádání částic zeminy předtím, než se začnou tvořit tzv. makropóry. Hodnota čísla pórovitosti se získá vynásobením  $e_{c0}$  faktorem 1,2. Hodnota tohoto faktoru je empiricky získána z maximálně kyprého uspořádání zeminy, která má zrna ideálního tvaru, jako například koule nebo krychle (Herle a Gudehus 1999).

$e_{d0}$  - minimální číslo pórovitosti při nulovém napětí: nejlepšího zhutnění se dosáhne pomocí cyklického vibrování s konstantním napětím. Závisí hlavně na nestejnozrnnosti a tvaru zrn. Stanovuje se z  $e_{c0}$ .

$\alpha$  - parametr: ovlivňuje vrcholovou pevnost zeminy při triaxiální zkoušce. A byl kalibrován na základě single element simulací drénované triaxiální zkoušky (Suchomel a Mašín, 2010b).

$\beta$  - parametr: ovlivňuje smykovou tuhost zeminy při triaxiální zkoušce (Herle a Gudehus, 1999). A byl kalibrován na základě single element simulací drénované triaxiální zkoušky (Suchomel a Mašín, 2010b).

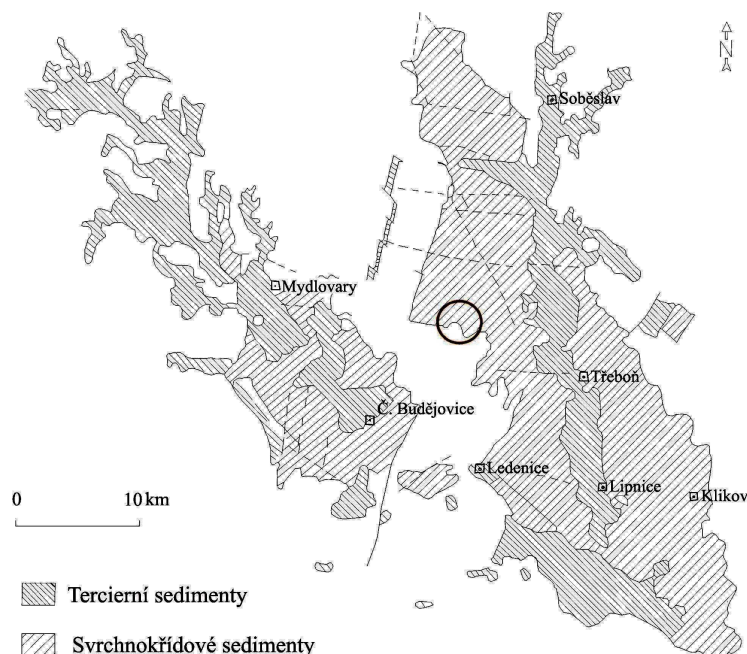
### 3 METODIKA PRÁCE

#### 3.1 Popis lokality

Lokalitu pro odběr vzorků vybral Mgr. Radek Suchomel s ohledem na svou doktorskou práci. Jako místo odběru byla zvolena pískovna, která se nachází cca 12 km severovýchodně od Českých Budějovic u vesnice Kolný. Pískovna leží v nadmořské výšce 500 m.n.m. Jedná se o malou pískovnu na těžbu písku pro stavební účely. Pro odběry vzorků byla vybrána západní stěna pískovny, která se vyznačovala velkou variabilitou v uložení písků. Písky byly uloženy chaoticky a na stěně se nedal vysledovat pozitivní ani negativní sled ukládání písků. Výška stěny pískovny byla cca 10 m.

##### 3.1.1 Geologická charakteristika lokality

Pískovna Kolný leží v západní části třeboňské pánve. Třeboňská pánev spolu s českobudějovickou pánví je obklopena horninami moldanubika a variskými granitoidy (Chlupáč et al. 2002). Pánve vznikly při procesech saxonské zlomové tektoniky během křídý a terciéru jako reakce na horotvorné procesy alpinského vrásnění v alpínsko-karpatské oblasti. Hlavní systémy zlomů, aktivních při vzniku i vyplňování pánví, měly směr SZ-JV. Pánve jsou v dnešním stadiu denudace odděleny krystalickým lišovským hřbetem, původně však spolu přinejmenším dočasně souvisely. Výplň pánví tvoří sladkovodní svrchnokřídové a terciérní uloženiny (Chlupáč et al. 2002). Rozšíření a výplň pánví ukazuje obrázek 1.



Obrázek 1: Rozšíření svrchnokřídových a terciérních sedimentů v jihočeských pánvích (Chlupáč 2002), místo odběru vzorků je zakroužkováno.

### 3.1.1.1 Klikovské souvrství

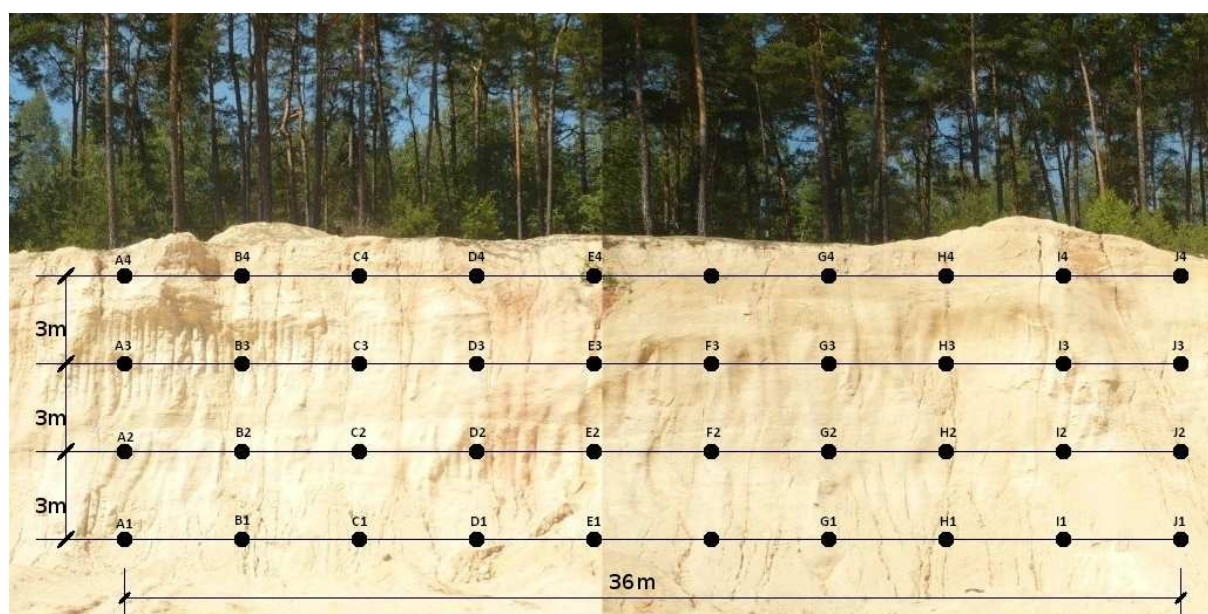
Výplň pánví tvoří sladkovodní křídové sedimenty a terciární uloženiny. Svrchnokřídovou část výplně reprezentuje klikovské souvrství. Podle nálezů flóry patří klikovské souvrství nejspíše intervalu koniak-santon. Maximální mocnost je v třeboňské pánvi 450 m (Chlupáč et al. 2002). Klikovské souvrství je produktem sladkovodní mělké sedimentace ve slabě proudících i stojatých vodách, při níž byl do tektonicky predisponovaných sníženin snášen materiál kaolinicky zvětralých žul, ortorul a jiných krystalických břidlic z okolí. Odpovídají tomu jak úložné poměry sedimentů, tak i jejich petrografický ráz. Zanášení pánevních prostorů postupovalo zvolna spolu s dlouhotrvajícími poklesovými pohyby dna pánví (Čech et al. 1962). Původní rozsah tohoto souvrství byl značně větší, než je dnes (Suk et al. 1978). Litologický vývoj sedimentů klikovského souvrství se dělí Čech et al. (1978) na tři základní typy hornin:

- *hrubě písčité vrstvy* (písky, štěrky, pískovce, slepence – arkózové). Rezavé písky a štěrky mají neopracovaná nebo jen poloopracovaná zrna, tvořená převážně křemenem. V malém množství se v minerálním složení uplatňuje kaolinicky navětralý živec a slída (muskovit, biotit). Většinou obsahují velké množství jílu. Vrstevnatost pískovců není zpravidla zřetelná.
- *pestré vrstvy* (červenohnědě, fialově, šedě, zelenošedě skvrnitě nebo mramorované jílovce až pískovce). Přechody mezi jílovci a pískovci jsou zpravidla pozvolné a dochází k nim jak ve vertikálním směru, tak i ve směru horizontálním nebo zcela nepravidelně. Červenohnědé zbarvení způsobují hydroxidy železa. Šedé zbarvení souvisí s přítomností chloritu.
- *tmavošedé vrstvy* (jílovce až pískovce, často s bohatým obsahem zuhelnatělé rostlinné drti, úlomky a otisky křídové flóry). Hranice mezi jednotlivými typy sedimentů, jílovci a pískovci jsou poměrně ostré.

V sedimentech klikovského souvrství se jako hlavní složka uplatňuje křemen, který tvoří nejpodstatnější část pískovců, dále v menší míře živce, kaolinicky zvětralé, ze slíd je většinou zastoupen muskovit, biotit a v menší míře chlorit. V asociaci těžkých minerálů je především přítomen zirkon a turmalín, rutil, disten a opaktní minerály. Jílová komponenta pískovců je kaolinická (Suk et al. 1978).

### 3.2 Odběr vzorků

Vzorky byly odebrány ve spolupráci s konzultantem Mgr. Radkem Suchomelem v březnu roku 2008. Vzhledem k charakteru zeminy nebylo možné odebrat neporušené vzorky. Odebralo se celkem 38 porušených vzorků zeminy, dva vzorky nebylo možné odebrat. Vzorek, který by měl označení F1 nebylo možné odebrat, protože místo odběru bylo zapadané pískem ze stěny. Vzorek, který by měl označení F4 se nedal odebrat, protože na jeho místě odběru se nacházela prohlubeň, vzdálená od osy profilu stěny 5 až 6 m. Vzorky byly odbírány ve čtyřech řadách po deseti sloupcích. Rozestupy mezi jednotlivými místy odměru jsou 4 m na šířku a 3 m na výšku. Celkově se jednalo o obdélník s rozměry 36 m x 9 m. Schéma odběru vzorků je na obrázku 2.



Obrázek 2: Profil odběru vzorků (Suchomel a Mašín, 2010a,b)

### 3.3 Stanovení pórovitosti pomocí membránového objemoměru

Zjištění pórovitosti in situ jsme prováděli pomocí membránového objemoměru (obrázek 3), který nám byl zapůjčen firmou Stavební geologie - Geotechnika, a.s. Jedná se o plastový válec na dně opatřený membránou a pístem. Tímto přístrojem se zjišťuje objem, ze kterého se dá vypočítat objemová hmotnost a ulehlost hrubozrnných zemín.



Obrázek 3: Membránový objemoměr

### 3.3.1 Postup měření

Nejprve jsme si srovnali terén, aby byl bez nerovností. Na urovnanou plochu jsme osadili základní desku a zabezpečili proti posunutí.

Objemoměr jsme dutou písnicí naplnili vodou a lehce stlačili píst, aby se z válce vytlačil vzduch. Potom jsme přístroj osadili na základní desku a stlačili píst, tím se membrána přitlačila k urovnanému povrchu zeminy. Na stupnici jsme zjistili čtení zdvihu  $L_0$  v cm. Poté jsme povytáhli píst a odstranili přístroj ze základní desky. Kruhovým otvorem v základní desce jsme vyhloubili jamku ve tvaru kulového vrchlíku. Všechnu zeminu z jamky jsme shromažďovali do sáčků. Stěny a dno jamky jsme očistili od ostrých částí a úlomků. Pak jsme znovu osadili přístroj na základní desku a píst jsme stlačovali tak dlouho, dokud se membrána nepřitiskla ke stěně dutiny. Potom jsme na stupnici odečetli hodnotu zdvihu  $L_1$  v cm. Při nezměněné poloze přístroje se vytahováním pístu vtáhne voda z membrány do válce a stanoví se opakovaně hodnota  $L_1$ . Jestliže se dvě přečtené hodnoty neliší vzájemně o více než 2%, udává se střední hodnota výsledného měření  $L_1$ . Postup zjišťování objemu membránovým objemoměrem je na obrázku 4.

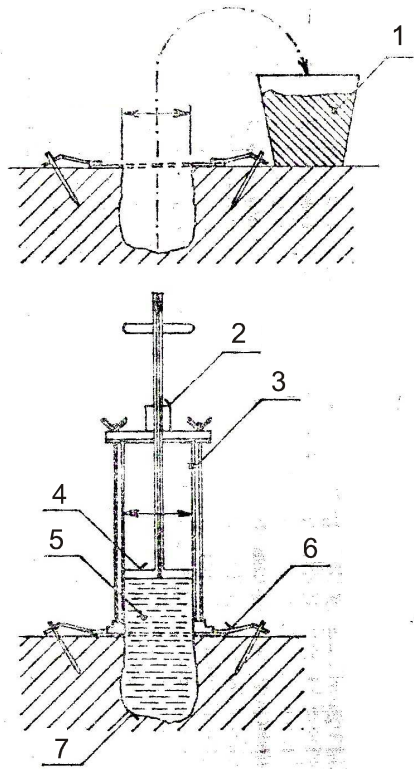
Hodnoty  $L_1$  a  $L_0$  jsme dosadili do vztahu (1) a vyšel objem vyhloubené jamky, který se použil pro vypočtení pórovitosti.

$$V = (L_1 - L_0)F \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1)$$

F je plocha pístu ( $289,38 \text{ cm}^2$ ).

Při měření membránovým objemoměrem jsme postupovali dle normy (ČSN 721010, 6. 4. 1989).





Obrázek 4: Schéma použití membránového objemoměru (Legenda: 1 vybraná zemina z jamky, 2 čtecí stupnice, 3 válec, 4 píst, 5 voda v membráně, 6 upevněná základní deska, 7 membrána) upraveno podle: ČSN 72 1010, 6. 4. 1989

### 3.4 Zrnitost

Zrnitost se obvykle vyjadřuje křivkou zrnitosti. Zrnitost hrubozrnných zemin se stanovuje pomocí síťového rozboru. Ten spočívá v prosévání zeminy sadou sít s různými normalizovanými otvory a ve stanovení hmotnosti nadsítného podílu každého síta a hmotností propadu sítím s nejmenšími otvory. Zrnitost se provádí mokřým nebo suchým způsobem. Suchý způsob stanovení zrnitosti spočívá v prosévání suché zeminy sadou sít, mokřý způsob spočívá v prosévání zeminy sadou sít pomocí promývání vodou.

Stanovení zrnitosti jsem provedla na 37 vzorcích mokrou metodou. U vzorku E2 jsem zrnitost nemohla provést, protože mi po ostatních laboratorních zkouškách nezbylo dostatečné množství materiálu. Při stanovování zrnitosti jsem se řídila (ČSN CEN ISO/TS 17892-4, duben 2005). Zvolila jsem mokřý způsob stanovení zrnitosti, protože zemina ve většině vzorků obsahovala kolem 13% částic menších než 0,063 mm. Hustoměrnou zkoušku jsem neprováděla, protože pro mé účely postačoval síťový rozbor a stanovení procentuálního obsahu částic menších než 0,063 mm.

### 3.4.1 Příprava zeminy pro zkoušku

Zemina odebraná z lokality byla uchována v sáčcích. Pro přípravu vzorku jsem nejprve zeminu v sáčku řádně promíchala a pak jsem část zeminy dala do misky na 24 hodin sušit při 105°C. Po vysušení jsem zeminu lehce rozdužila, zvažila a zalila vodou a nechala cca 1 hodinu odstát. Takto připravenou zeminu jsem použila k síťovému rozboru.

### 3.4.2 Popis zkoušky

Na prosévání zeminy jsem použila síta o velikosti otvorů v milimetrech: 8,0; 6,0; 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063. Síta o velikosti 8,0 – 2,0 mm zachytávají zrna velikosti štěrku a síta o velikosti 2,0 – 0,063 mm zachytávají zrna o velikosti písku. Oky o velikosti 0,063 mm propadnou prachovitá a jílovitá zrna.

Zeminu jsem po vyjmutí ze sušárny lehce rozdužila, zvažila a zalila vodou a nechala hodinu odstát. Pak jsem ji nasypala do soustavy sít a promývala proudem vody. Promývání trvalo tak dlouho, dokud mi ze soustavy sít neodtékala viditelně čirá voda. Zrna, která se na jednotlivých sítích zachytávala, jsem shromažďovala do misek a nechala 24 hodin při 105°C vysušit. Po vysušení jsem stanovila hmotnosti nadsítného na jednotlivých sítích. Hmotnost podsítného pod 0,063 mm jsem vypočítala odečtením všech zachycených zrn na jednotlivých sítích od počáteční navážky. Z hodnot získaných při síťovém rozboru jsem stanovila křivky zrnitosti. Výsledné křivky zrnitosti jsou v příloze.

## 3.5 Měření úhlu přirozené sklonitosti

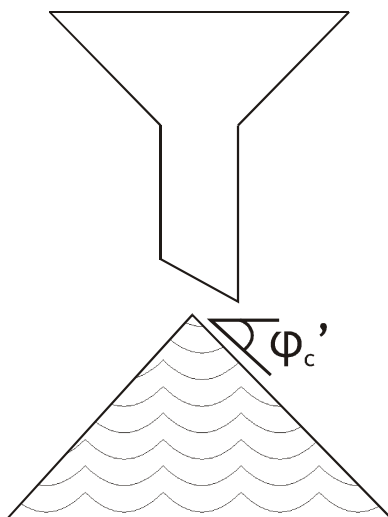
Na všech vzorcích jsem stanovovala úhel přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$ . Tato zkouška se prováděla sypáním zeminy z nálevky z proměnné výšky na umělohmotnou podložku.

### 3.5.1 Příprava zeminy pro zkoušku

Zeminu jsem nasypala do misky a nechala vyschnout volně na vzduchu po dobu 24 hodin. Poté jsem ji nasypala do mixéru, zalila vodou a po dobu 30 vteřin nechala mixovat a dalších 30 vteřin jsem nechala směs ustát. Zeminu jsem mixovala, abych docílila rychlejšího rozpojování částic. Poté jsem přes síto o velikosti ok 0,063 mm zeminu promyla a odstranila všechny jemné částice (jílovitou a prachovitou frakci). Promytou zeminu jsem nasypala do misky a nechala 24 hodin v sušárně při 105°C vysušit. Po vysušení jsem zeminu lehce rozdužila v třecí misce tloučkem. Takto připravenou zeminu jsem použila ke stanovení úhlu přirozené sklonitosti.

### 3.5.2 Popis sypání kuželu a měření úhlu přirozené sklonitosti

Zeminu jsem sypala na desku z plexiskla, která byla ve vodorovné poloze. Zemina se sypala z proměnné výšky. Na stojan jsem připevnila skleněnou nálevku, která byla na dolním konci opatřena cca 4 cm dlouhou gumovou hadičkou. Při uzavřené hadičce jsem nálevku naplnila. Při uvolnění se zemina začala z nálevky vysypávat a vytvořila kužel o průměru dolní podstavy cca 15 cm a výšky cca 6 cm. Těžší zrna se po svahu kutálela směrem k patě svahu. Sypání zeminy a vytvoření kužele ukazuje obrázek 5. Pak jsem pomocí kartičky z tvrdého papíru odřízla na jedné straně patu kužele a došlo ke konečnému sesypání zeminy. Na takto upraveném svahu kužele zeminy jsem měřila kritický úhel zeminy pomocí úhloměru s přesností na minuty. Odříznutí paty kužele jsem provedla na každém kuželu třikrát. Z měření jsem získala tři hodnoty, ze kterých jsem vypočítala průměrnou hodnotu  $\varphi_c'$  a její směrodatnou odchylku.



Obrázek 5: Stanovení kritického úhlu vnitřního tření

Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce 3 na straně 22.

### 3.6 Triaxiální zkouška

Triaxiální zkoušku jsem provedla na všech 38 vzorcích. Pomocí této zkoušky se zjišťoval vrcholový úhel vnitřního tření  $\varphi_p'$ . Jednalo se o zkoušku izotropně konsolidovaného drénovaného vzorku (CID).

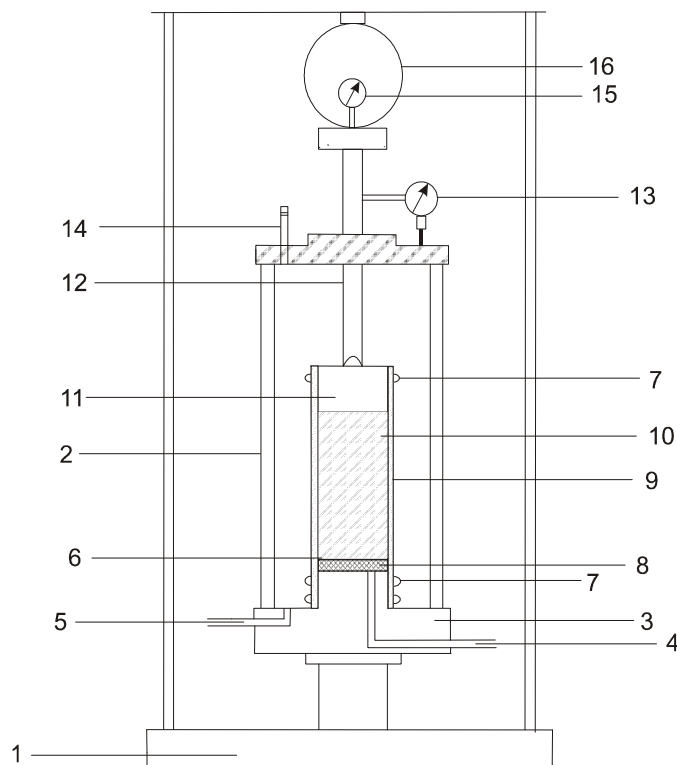
### 3.6.1 Příprava zeminy pro zkoušku

Odebranou zeminu jsem před použitím v sáčku řádně promíchala a pak jsem část zeminy odebrala pro zkoušku. Ze zeminy jsem neodstraňovala jemnou frakci. Zeminu jsem nasypala do misky a zalila destilovanou vodou, aby byl vzorek nasycený. Zalitou zeminu jsem promíchala a takto připravenou zeminu jsem použila pro přípravu vzorků pro triaxiální zkoušku. Při plnění formy část jemné frakce zůstala v misce jako kal.

### 3.6.2 Popis přípravy vzorku

Nejprve jsem odvzdušnila celý systém. Na podstavec jsem položila kruhovou filtrační destičku (5,3 x 38,5 mm), kterou jsem zbavila nečistot v ultrazvukové lázni, na destičku jsem umístila filtrační papír o stejném rozměru plochy jako filtrační destička. Pak jsem osadila membránu o tloušťce 0,346 mm a připevnila jsem ji dvěma O kroužky k podstavě. Okolo membrány jsem umístila kovovou třídílnou formu, se stahovacím prstencem, na přípravu válcového vzorku (šířka 38,5 mm a výška cca 84 mm). Přes horní okraj této formy jsem přehrnula horní okraj membrány. Před samotným plněním takto připravené formy jsem pomocí laboratorní stříčky, stříkla malé množství vody na dno formy, aby bylo zaručeno plnění formy vždy nasycenou zeminou. Při plnění jsem postupovala tak, že jsem vždy po malých vrstvách (objem zeminy cca 4 ml) zeminu přechovala skleněnou tyčinkou o průměru (7,75 mm). Takto jsem postupovala při plnění formy, abych dosáhla co nejnižší pórovitosti vzorku. Po naplnění celé formy jsem vzorek zarovnávala podle okraje formy a osadila jsem horní destičku a horní okraj membrány jsem přetáhla kolem destičky a připevnila pomocí jednoho O kroužku. Sundala jsem kovovou formu. Na takto připraveném vzorku jsem změřila jeho výšku ve třech různých místech a průměr ve třech profilech. Měření se provádělo pomocí posuvného měřidla s přesností 0,02 mm.

Na podstavu s připraveným vzorkem jsem osadila komoru s pístem, která byla naplněna vodou a odvzdušněna. Komoru jsem usadila do triaxiálního lisu (TRI-SCAN 50) a napojila komoru a dolní drenáž na kontroléry tlaků. Na triaxiálním lisu byly připevněny úchylkoměry měřící posun komory a deformaci siloměrného třmenu. Všechny měřené hodnoty (posun komory a deformace siloměrného třmenu, změna objemu dolní drenáže) byly zaznamenány počítačem s časovým intervalem 1 vteřina. Schéma komory pro triaxiální zkoušku ukazuje obrázek 6.



Obrázek 6: Schéma komory pro triaxiální zkoušku (Legenda: 1 triaxiální lis, 2 triaxiální komora, 3 podstavec, 4 měření objemu drénující pórové vody, 5 měření komorového tlaku, 6 filtrační papírek, 7 O kroužky, 8 filtrační destička, 9 membrána, 10 vzorek, 11 horní destička, 12 píst, 13 úchylkoměr na měření posunu komory, 14 odvodušňovací šroub, 15 úchylkoměr na měření deformace siloměru, 16 siloměr) upraveno podle ČSN CEN ISO/TS 17892-9 (duben2005)

Po osazení komory do triaxiálního lisu jsem začala se sycením vzorku. Sycení probíhalo tak že, jsem při otevřené drenáži nejprve zvýšila tlak v komoře na 15 kPa, abych zajistila kladné efektivní napětí ve vzorku. Pak jsem současně zvyšovala komorový a sytící tlak rychlostí 999 kPa/hod, komoru na 215 kPa a dolní drenáž na 200 kPa. Poté jsem vzorek konsolidovala zvýšením komorového tlaku na 400 kPa rychlostí 360 kPa/hod. Celá doba konsolidace trvala cca 45 minut. Při konsolidaci jsem měřila změnu objemu vody ( $\Delta V_k$ ) v komoře. Po konsolidaci vzorku jsem začala se smykáním vzorku, kdy rychlost posunu triaxiálního lisu byla 0,3 mm/min. Rychlost smykání musí být dostatečně pomalá, aby byl vzorek během smykání drénován a zkouška byla odvodněná. Posun komory byl vždy cca do 25 mm tj. asi 30% z celkové výšky vzorku.

Po skončení smykání vzorku jsem snížila hodnoty tlaků na nulu a vypustila jsem vodu z komory. Všechnu zeminu ze vzorku jsem zachytila a vysušila v sušárně při 105°C po dobu cca 24 hodin. Po vysušení jsem vzorek zvážila a jeho hmotnost sušiny zaznamenala.

Zkoušky na některých vzorcích jsem musela opakovat z důvodu kolísajícího komorového tlaku při smyku a z důvodu nereálně nízké stanovené hodnoty pórovitosti, způsobené patrně ztrátou zeminy při vymývání membrány po skončení zkoušky. Postup přípravy zeminy pro opravené vzorky a průběh zkoušky byl stejný. Vzorky, u kterých jsem triaxiální zkoušku opakovala, jsou: D1, G1, J1, F2, B3, F3 (změna tlaku v komoře během smykání vzorku) a G3, H3, J3 (nereálně nízká pórovitost).

Při konsolidaci vzorku jsem měla měřit změnu objemu vody ( $\Delta V_k$ ) v komoře, abych mohla zjistit změnu objemu vzorku po konsolidaci a tím zjistit pórovitost vzorku před smykáním.  $\Delta V_k$  jsem však změřila pouze u opakovaných vzorků D1, G1, J1, F2, B3, F3, G3, H3, J3. Pórovitost vzorků jsem stanovila z rozměrů vzorků při jejich přípravě. U již zmíněných vzorků D1, G1, J1, F2, B3, F3, G3, H3, J3 jsem stanovila i pórovitost po konsolidaci vzorku a u ostatních vzorků, u kterých jsem  $\Delta V_k$  neměřila, jsem pórovitost po konsolidaci stanovila výpočtem. Celý postup je uveden v kapitole 4.4.

### 3.6.3 Vyhodnocení triaxiální zkoušky

Při triaxiální zkoušce jsem měřila posun komory, deformaci siloměru, změnu objemu na dolní drenáži. Také jsem zaznamenávala hodnoty tlaku v dolní drenáži a v komoře, aby bylo možné po skončení zkoušky zkontrolovat, zda se v průběhu zkoušky neměnily. Všechna naměřená data se zaznamenávala do počítače s časovým krokem 1 vteřina.

Z těchto naměřených dat jsem stanovila:

Celkový objem vzorku v každém okamžiku smykové fáze zkoušky pomocí vzorce (2).

$$V_t = V_{t,0} - \Delta V \quad (2)$$

Kde  $V_{t,0}$  je objem vzorku před smykovou zkouškou a  $\Delta V$  je změna objemu vzorku při smykové fázi.

Průřezovou plochu vzorku v každém okamžiku smykové fáze zkoušky (3).

$$A = \frac{V_t}{h_0 - \Delta h} \quad (3)$$

Kde  $h_0$  je výška vzorku na před smykovou zkouškou a  $\Delta h$  změna výšky vzorku během smykové fáze, osové přetvoření (4), objemové přetvoření (5), smykové přetvoření (6), deviátorové napětí (7), střední hlavní napětí (8), vrcholový úhel vnitřního tření zeminy (9).

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_{t,0}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2(\varepsilon_a - \varepsilon_v)}{3} \quad (6)$$

$$q = \frac{F_a}{A} = \sigma_a - \sigma_r = \sigma'_a - \sigma'_r \quad (7)$$

$$p' = \frac{\sigma'_a - 2\sigma'_r}{3} \quad (8)$$

$$\sin \varphi'_p = \frac{\frac{1}{2}(\sigma'_a - \sigma'_r)}{c' \cos \varphi'_p + \frac{1}{2}(\sigma'_a + \sigma'_r)}, \quad c' \cos \varphi'_p = 0 \quad (9)$$

Kde  $\sigma_a$  je axiální napětí a  $\sigma_r$  je radiální napětí.

Z hodnot, které jsem získala přímo ze vzorku tj. jeho rozměry  $h_0$ ,  $d_0$  ( $h_0$  je výška vzorku před smykovou fází a  $d_0$  je průměr vzorku před smykovou fází) a hmotnost vysušeného vzorku  $m_s$ , jsem stanovila celkový objem vzorku (10) před konsolidací, 0,346 mm je tloušťka membrány, objem skeletu (11), počáteční číslo pórovitosti (12), počáteční pórovitost (13).

$$V_{t,0} = h_0 \pi \left( \frac{d_0}{2} - 0,346 \right)^2 \quad (10)$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (11)$$

$$e_0 = \frac{V_p}{V_s} \quad (12)$$

$$n_0 = \frac{V_p}{V_{t,0}} \quad (13)$$

Kde  $V_p$  je objem pórů. Hodnotu měrné (specifické) hmotnosti písku  $\rho_s$ , jsme odhadli na 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

Vybrané vypočtené hodnoty jsou v tabulce 4 na straně 25, kam jsem shrnula všechny hodnoty charakterizující vzorky zeminy: pórovitost před konsolidací  $n_0$ , pórovitost  $n_{po}$  konsolidaci po konsolidaci a vrcholový úhel vnitřního tření  $\phi_p'$ .

### 3.7 Edometrická zkouška

Edometrická zkouška byla provedena na všech 38 vzorcích. Všechny edometrické zkoušky provedl Mgr. Radek Suchomel. Stanovovala se stlačitelnost vzorku, z měřených veličin se spočítalo číslo pórovitosti během zkoušky ( $e_0$  viz (14),  $e_{sat}$  viz (15),  $e_{fin}$  viz (16), index stlačitelnosti  $C_c$ . Pro edometrickou zkoušku se jemná frakce ze zeminy neodstraňovala.

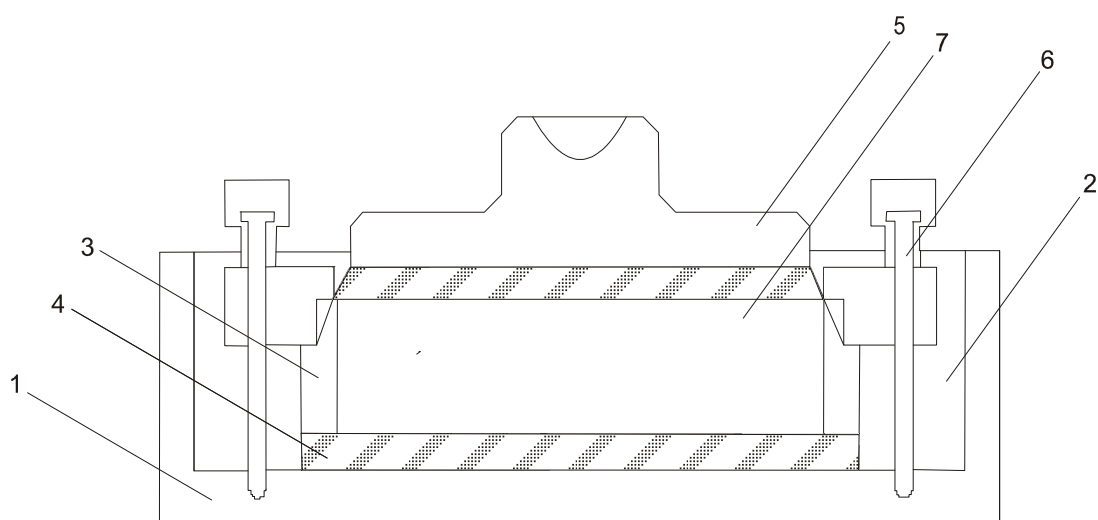
#### 3.7.1 Příprava zeminy pro zkoušku

Pro přípravu vzorku pro edometrickou zkoušku se musela zemina, která byla uchovávaná v sáčcích důkladně promíchat a část promíchané zeminy se odebrala do misky a nechala se 24 hodin sušit při teplotě 105°C. Vysušená zemina se lehce rozdružila v třecí misce tloučkem. Takto připravená zemina se použila ke zkoušce.

#### 3.7.2 Popis přípravy vzorku

Součástí edometru je edometrická buňka, dvě filtrační destičky, edometrický prsteneč s břitem, roznášecí píst, středící kroužek, zatěžovací rám. Na dno edometrické buňky se umístila filtrační destička, na ní edometrický prsteneč o průměru 50 mm. Pak se přišrouboval středící kroužek pomocí dvou šroubů k edometrické buňce. Schéma edometrické buňky ukazuje obrázek 7. Do edometrického prstence se nasypala připravená zemina. Zemina se nasypala do skleněné nálevky na konci opatřené cca 4 cm dlouhou gumovou hadičkou.

S nálevkou se pohybovalo směrem vzhůru, aby se zrna z nálevky sypala pořád z konstantní výšky, co nejkypěji. Poté se přeměřila výška vzorku na čtyřech místech a osadila se druhá filtrační destička spolu s roznášecím pístem. Celá edometrická buňka, se osadila do zatěžovacího rámu, ke kterému byl připevněn úchylkoměr na měření stlačení vzorku během přitěžování. Hodnoty stlačení byly automaticky zaznamenávány počítačem. Poté, co byla edometrická buňka osazena do zatěžovacího rámu, zalil se vzorek vodou. Počkalo se, až se hodnota prosednutí po zalití vzorku ustálí. Pak se zaznamenala hodnota prosednutí vzorku po zalití a začalo se s přitěžováním. Hodnoty přitěžování byly 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1600 kPa, 3200 kPa a 6400 kPa. Vzorek se přitížil a čekalo se, až se hodnota sednutí vzorku ustálí, po ustálení hodnoty se přidalo další závaží, až se došlo k cílové hodnotě 6400 kPa. Po skončení zkoušky se odebrala všechna závaží a edometrická buňka se vyndala ze zatěžovacího rámu. Všechna zemina se z edometrického prstence zachytila a sušila se při 105°C po dobu 24hodin. Poté se zvažila. Pro všech 38 vzorků se použil stejný postup.



Obrázek 7: Edometrická buňka (Legenda: 1 edometrická buňka, 2 rezervoár na vodu, 3 edometrický prsteneček, 4 dolní filtrační destička, 5 horní filtrační destička s roznášecím pístem, 6. šroub, 7 vzorek) upraveno podle ČSN CEN ISO/TS 17892-5 (duben 2005)

### 3.7.3 Vyhodnocení edometrické zkoušky

Při zkoušce v edometru se měřilo stlačení vzorku zeminy po přidání přitěžovacích stupňů. Z těchto hodnot jsem spočítala:

Číslo pórovitosti zeminy nasycené do prstence při nulovém zatížení (14), číslo pórovitosti po zalití vzorku vodou se zatížením 10 kPa (15), číslo pórovitosti na konci zkoušky se zatížením 6400 kPa (16). Kde  $d$  je průměr edometrického prstence,  $h_0$  je počáteční výška vzorku,  $h_{sat}$  je výška vzorku po prolití vodou a přitížením 10 kPa,  $h_{fin}$  je výška vzorku při přitížení 6400 kPa,  $m_s$  je množství vysušené zeminy použité na vzorek a  $\rho_s$  je specifická objemová hmotnost zeminy, odhadnutá na 2,7 g/cm<sup>3</sup>.



$$e_0 = \frac{\left(\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 h_0\right) - \left(\frac{m_s}{\rho_s}\right)}{\frac{m_s}{\rho_s}} \quad (14)$$

$$e_{sat} = \frac{\left(\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 h_{sat}\right) - \left(\frac{m_s}{\rho_s}\right)}{\frac{m_s}{\rho_s}} \quad (15)$$

$$e_{fin} = \frac{\left(\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 h_{fin}\right) - \left(\frac{m_s}{\rho_s}\right)}{\frac{m_s}{\rho_s}} \quad (16)$$

Číslo pórovitosti  $e$  jsem spočítala pro každý přitěžovací stupeň během zkoušky.

Z vypočtených hodnot jsem vypočetla index stlačitelnosti podle rovnice (17).

$$C_C = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (17)$$

Vybrané naměřené a vypočtené hodnoty jsem shrnula do tabulky 5 na straně 33. Tabulka 5 obsahuje čísla pórovitosti  $e_0$ ,  $e_{sat}$ ,  $e_{fin}$  a index stlačitelnosti  $C_C$ .

### 3.8 Statistické vyhodnocení dat

Vstupní data jsem statisticky zpracovala v programu Statgraphic Centurion XV (<http://statgraphic.com>). Pro zjištění závislosti dvou proměnných jsem použila jednoduchou regresi, kde závislost jednotlivých proměnných byla porovnávána pomocí analýzy rozptylu (ANOVA). Pomocí ANOVA jsem zjistila hladinu významnosti  $p$  vztahu mezi sledovanými proměnnými. Když je hladina významnosti  $p < 0,05$ , tak jsou proměnné na sobě závislé z 95 %. V případě, že je  $p > 0,05$ , tak závislost mezi proměnnými není statisticky průkazná. Závislost sledovaných proměnných jsem popsala pomocí lineární rovnice ve tvaru:  $y = b + ax$  a regresní přímky. Hodnota korelačního koeficientu  $r$  udává míru závislosti mezi proměnnými.

## 4 VÝSLEDKY

Celkem jsem vyhodnotila 38 triaxiálních zkoušek, 38 edometrických zkoušek a 38 měření úhlů přirozené sklonitosti. Dále jsem vyhodnocovala 5 měření pomocí membránového objemoměru a zrnitost na 37 vzorcích. Všechny výsledky jsem shrnula v jednotlivých kapitolách. Vybrané závislosti jsou uvedeny v příloze.

### 4.1 Pórovitost

Pórovitost zeminy v jejím přirozeném uložení jsem stanovila na základě hodnot změřených membránovým objemoměrem. Měření jsme prováděla v písčinně na pěti místech. Ze změřeného objemu a hmotnosti zeminy jsem stanovila pórovitost zeminy in situ: 0,267, 0,289, 0,308, 0,298, 0,302.

### 4.2 Zrnitost

Křivky zrnitosti stanovené na všech vzorcích kromě vzorku E2 ukazují zastoupení jednotlivých frakcí a potvrzují jejich velkou variabilitu. Ukázalo se, že vzorky D4 a E4 mají vysoké procento jemných částic, u vzorku D4 29% a u vzorku E4 45%. Podstatné množství jemných částic mají i vzorky A1 16%, E1 17% a J4 14%, u ostatních vzorků je hodnota zastoupení jemných částic do 13%. Nejmenší zastoupení jemné frakce má vzorek A3 a to 9%. Jak je vidět na křivkách zrnitosti, některé vzorky jsou si zrnitostně velmi podobné např.: D2, D3, C2; I1 a I2; G2, G3, E1, H3.

Číselný popis tvaru křivky zrnitosti určují: efektivní (účinný) průměr zrn  $D_{ef}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_u$  a číslo křivosti  $C_c$ . Při výpočtu  $C_u$  a  $C_c$  jsem musela použít  $D_{13}$  místo  $D_{10}$ , protože část vzorků měla propad zrn menších než 0,063 mm větší než 10% a hustoměrnou zkoušku jsem neprováděla, abych zjistila procentuální zastoupení zrn menších než 0,063 mm a tím i velikost zrn při 10% propadu. Hodnoty  $C_u$  a  $C_c$  jsem stanovila na všech vzorcích, kromě vzorků A1, E1, C4, D4, J4, u kterých je vysoké procento jemných částic a nemohla jsem stanovit ani hodnotu  $D_{13}$  a u vzorku E2 u kterého jsem zrnitost nestanovovala. Efektivní průměr zrn jsem stanovila na  $D_{ef} = D_{13}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_u^*$  jsem stanovila pomocí vzorce (18), číslo křivosti  $C_c^*$  pomocí vzorce (19).

$$C_u^* = \frac{D_{60}}{D_{13}} \quad (18)$$

$$C_c^* = \frac{D_{30}^2}{D_{13} D_{60}} \quad (19)$$

Všechny hodnoty  $D_{13}$ ,  $C_u^*$  a  $C_c^*$  jsem shrnula do tabulky 1.

Tabulka 1: Hodnoty efektivní průměr zrn  $D_{13}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_u^*$ , číslo křivosti  $C_c^*$

vzorek	$D_{13}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{60}$	číslo nestejnozrnnosti $C_u^*$	číslo křivosti $C_c^*$
<b>B1</b>	0,063	0,25	0,4	0,8	12,70	3,17
<b>C1</b>	0,063	0,3	0,52	1,1	17,46	3,90
<b>D1</b>	0,17	0,51	0,9	3	17,65	1,59
<b>G1</b>	0,13	0,51	0,9	2,7	20,77	2,31
<b>H1</b>	0,063	0,15	0,26	0,55	8,73	1,95
<b>I1</b>	0,125	0,2	0,3	0,65	5,20	1,11
<b>J1</b>	0,075	0,15	0,25	0,52	6,93	1,60
<b>A2</b>	0,09	0,15	0,2	0,8	8,89	0,56
<b>B2</b>	0,12	0,2	0,31	0,72	6,00	1,11
<b>C2</b>	0,15	0,3	0,4	0,85	5,67	1,25
<b>D2</b>	0,16	0,27	0,4	0,85	5,31	1,18
<b>F2</b>	0,15	0,37	0,6	1,9	12,67	1,26
<b>G2</b>	0,13	0,32	0,56	1,4	10,77	1,72
<b>H2</b>	0,12	0,25	0,21	0,75	6,25	0,49
<b>I2</b>	0,13	0,27	0,48	1,4	10,77	1,27
<b>J2</b>	0,095	0,16	0,28	0,9	9,47	0,92
<b>A3</b>	0,18	0,32	0,52	1,2	6,67	1,25
<b>B3</b>	0,16	0,3	0,51	1,2	7,50	1,35
<b>C3</b>	0,08	0,2	0,31	0,64	8,00	1,88
<b>D3</b>	0,13	0,26	0,4	0,8	6,15	1,54
<b>E3</b>	0,07	0,28	0,4	0,8	11,43	2,86
<b>F3</b>	0,12	0,22	0,32	0,8	6,67	1,07
<b>G3</b>	0,08	0,26	0,41	1,4	17,50	1,50
<b>H3</b>	0,16	0,3	0,54	1,7	10,63	1,07
<b>I3</b>	0,08	0,2	0,3	0,7	8,75	1,61
<b>J3</b>	0,09	0,11	0,35	0,95	10,56	1,43
<b>A4</b>	0,08	0,2	0,3	0,6	7,50	1,88
<b>B4</b>	0,09	0,2	0,3	0,6	6,67	1,67
<b>C4</b>	0,13	0,25	0,31	0,6	4,62	1,23
<b>G4</b>	0,19	0,4	0,74	3,2	16,84	0,90
<b>H4</b>	0,2	0,51	0,95	3,2	16,00	1,41
<b>I4</b>	0,08	0,3	0,5	1	12,50	3,13

Číslo nestejnozrnnosti charakterizuje zeminu, jestli je stejnozrnná, středně stejnozrnná nebo nestejnozrnná. Je-li hodnota  $C_u$  menší než 5 je zemina stejnozrnná, je-li  $C_u$  v rozmezí 5 až 15 je zemina středně stejnozrnná a je-li  $C_u$  větší než 15 jedná se o nestejnozrnnou zeminu. Žádný ze vzorků nemá hodnotu  $C_u$  menší než 5, proto žádná zemina není vyhodnocena jako stejnozrnná. Nejnižší hodnota  $C_u$  je 5,2 u vzorku I1. Vzorky C1, D1, G1, G3 a H3 mají  $C_u$  větší než 15. Největší hodnotu 20,77 má G1. Ostatní vzorky mají hodnoty  $C_u$  mezi 5 až 15 jsou tedy středně stejnozrnné.

Číslo křivosti  $C_c$  určuje, zda je zemina dobře zrněná, když hodnota  $C_c$  je v intervalu od 1 do 3 a zároveň je-li hodnota  $C_u$  větší než 4 až 6. Je-li hodnota  $C_c$  menší než 1 nebo větší než 3 jedná se o zeminu s chybějící frakcí. Dobře zrněné jsou vzorky I1, B2, C2, D2, C4. Ostatní vzorky jsou špatně zrněné.

Pro stanovování úhlu přirozené sklonitosti jsem zeminu upravila. Odstranila jsem promýváním všechna zrna menší než 0,063 mm. Proto jsem i pro takto upravenou zeminu vykreslila křivky zrnitosti a stanovila  $D_{ef}$ ,  $C_u$ ,  $C_c$  a hodnoty shrnula do tabulky 2. Číslo nestejnozrnnosti  $C_u$  jsem stanovila pomocí vzorce (20), číslo křivosti  $C_c$  pomocí vzorce (21).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (20)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (21)$$

Tabulka 2: Charakteristiky křivky zrnitosti při stanovení  $\varphi_c$  (číslo nestejnozrnnosti  $C_u$ , číslo křivosti  $C_c$ )

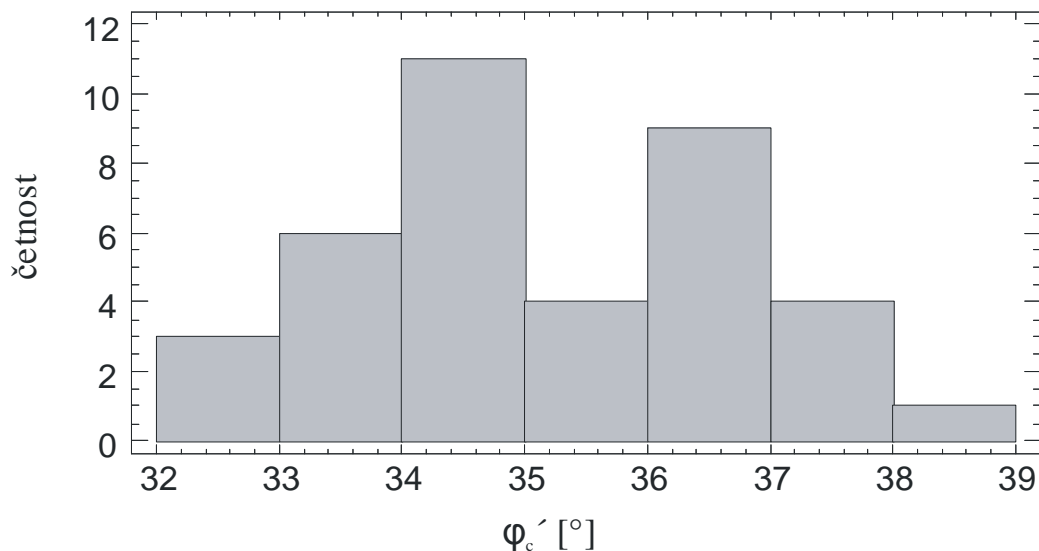
vzorek	$D_{10}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{60}$	číslo nestejnozrnnosti $C_u$	číslo křivosti $C_c$
<b>A1</b>	0,25	0,35	0,47	1,00	4,00	0,88
<b>B1</b>	0,26	0,40	0,51	0,90	3,46	1,11
<b>C1</b>	0,38	0,60	0,75	2,00	5,26	0,74
<b>D1</b>	0,51	0,89	1,20	3,10	6,08	0,91
<b>E1</b>	0,31	0,60	0,80	1,70	5,48	1,21
<b>G1</b>	0,50	0,85	1,20	3,00	6,00	0,96
<b>H1</b>	0,18	0,28	0,31	0,60	3,33	0,89
<b>I1</b>	0,19	0,30	0,37	0,72	3,79	1,00
<b>J1</b>	0,16	0,25	0,30	0,60	3,75	0,94
<b>A2</b>	0,13	0,20	0,30	0,90	6,92	0,77
<b>B2</b>	0,20	0,30	0,41	0,80	4,00	1,05
<b>C2</b>	0,25	0,37	0,50	0,90	3,60	1,11
<b>D2</b>	0,26	0,37	0,50	0,90	3,46	1,07
<b>F2</b>	0,31	0,58	0,76	2,10	6,77	0,89
<b>G2</b>	0,30	0,51	0,70	1,80	6,00	0,91
<b>H2</b>	0,24	0,30	0,40	0,90	3,75	0,74
<b>I2</b>	0,26	0,40	0,60	1,80	6,92	0,77
<b>J2</b>	0,18	0,26	0,51	0,99	5,50	1,43
<b>A3</b>	0,30	0,50	0,61	1,30	4,33	0,95
<b>B3</b>	0,27	0,44	0,60	1,30	4,81	1,03
<b>C3</b>	0,22	0,31	0,40	0,70	3,18	1,04
<b>D3</b>	0,26	0,38	0,50	0,84	3,23	1,14
<b>E3</b>	0,30	0,40	0,50	0,90	3,00	0,93
<b>F3</b>	0,17	0,30	0,40	0,90	5,29	1,05
<b>G3</b>	0,28	0,40	0,60	2,00	7,14	0,64
<b>H3</b>	0,30	0,50	0,70	2,00	6,67	0,82
<b>I3</b>	0,20	0,30	0,40	0,80	4,00	1,00
<b>J3</b>	0,21	0,32	0,49	1,10	5,24	1,04
<b>A4</b>	0,24	0,30	0,40	0,61	2,52	1,10
<b>B4</b>	0,20	0,30	0,40	0,65	3,25	1,23
<b>C4</b>	0,21	0,30	0,40	0,62	2,95	1,23
<b>D4</b>	0,09	0,13	0,22	0,45	5,00	1,20
<b>E4</b>	0,07	0,08	0,09	0,13	1,86	0,89
<b>G4</b>	0,38	0,68	1,05	3,90	10,26	0,74
<b>H4</b>	0,50	0,80	1,30	3,90	7,80	0,87
<b>I4</b>	0,30	0,50	0,60	1,20	4,00	1,00
<b>J4</b>	0,12	0,16	0,19	0,31	2,58	0,97

Pro zeminu zbavenou částic menších než 0,063 mm jsou hodnoty  $C_u$  mezi 1,9 až 10,3. Nejnižší  $C_u$  má vzorek E4 a nejvyšší  $C_u$  má vzorek G4. Vzorky C1, D1, E1, G1, A2, F2, G2, I2, J2, F3, G3, H3, J3, D4, G4 a H4 mají  $C_u$  větší než 5 jedná se o zeminu středně stejnozrnnou. Ostatní vzorky mají hodnotu  $C_u$  menší než 5 a jedná se o zeminu stejnozrnnou. Žádný ze vzorků neměl  $C_u$  větší než 15. Hodnota  $C_c$  se pohybuje mezi 0,74 až 1,43. Nejvyšší  $C_c$  má J2 a nejnižší hodnotu  $C_c$  mají vzorky C1, H2, G4. Dobře zrněné jsou vzorky E1, B2, J2, B3, F3, I3, J3, D4, I4.

### 4.3 Úhel přirozené sklonitosti

Při přípravě zeminy pro stanovení úhlu přirozené sklonitosti jsem ze zeminy odstranila frakci menší než 0,063 mm. Naměřené hodnoty úhlu přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$  se pohybovaly v rozmezí od 32,2° do 38,3°. Nejvyšší hodnotu jsem naměřila u vzorků G1 a E4. Jedná se o zeminu, která je podle křivky zrnitosti středně stejnozrnná. Nejnižší hodnotu jsem naměřila u vzorků C4, D4, J4. Jedná se o zeminu stejnozrnnou, ale obsahem jednotlivých frakcí rozdílnou. Jak ukazuje histogram na obrázku 8 nejčastější naměřené hodnoty  $\varphi_c'$  byly kolem 34° a 37°. Vzorky zeminy E1 a F2 mají stejnou hodnotu  $\varphi_c'$  36,8°. Tyto vzorky jsou si velmi podobné jak tvarem zrnitostní křivky, tak i obsahem jednotlivých frakcí.

Výsledky měření jsem shrnula do tabulky 3.



Obrázek 8: Četnost kritického úhlu vnitřního tření  $\varphi_c'$

Tabulka 3: Výsledky měření kritického úhlu vnitřního tření  $\varphi_c'$

Vzorek	A1	B1	C1	D1	E1	G1	H1	I1	J1
průměr $\varphi_c'$ [°]	36	37,5	37	37,7	36,8	38	36,4	36,7	36,8
směrodatná odchylka	0	1,1	0,5	1,3	0,6	0	0,4	0,6	0,6

Vzorek	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2
průměr $\varphi_c'$ [°]	36,2	36,7	36,6	34,5	35,3	36,8	37,5	35,4	34,2	34,7
směrodatná odchylka	0,2	0,2	1	0,4	1	0,8	0,7	0,2	0,2	0,2

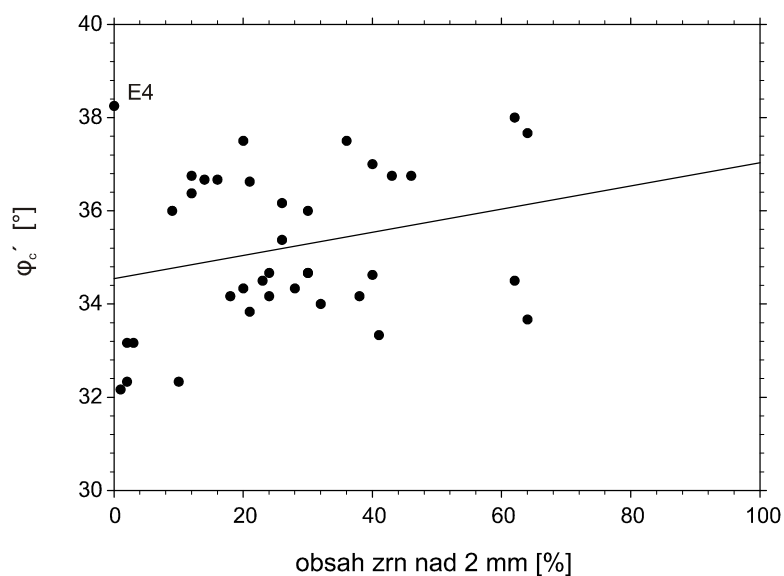
Vzorek	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3
průměr $\varphi_c'$ [°]	34,3	34,7	36	34,2	34,3	34,2	34,6	33,3	33,8	34,7
směrodatná odchylka	0,2	0,5	1,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

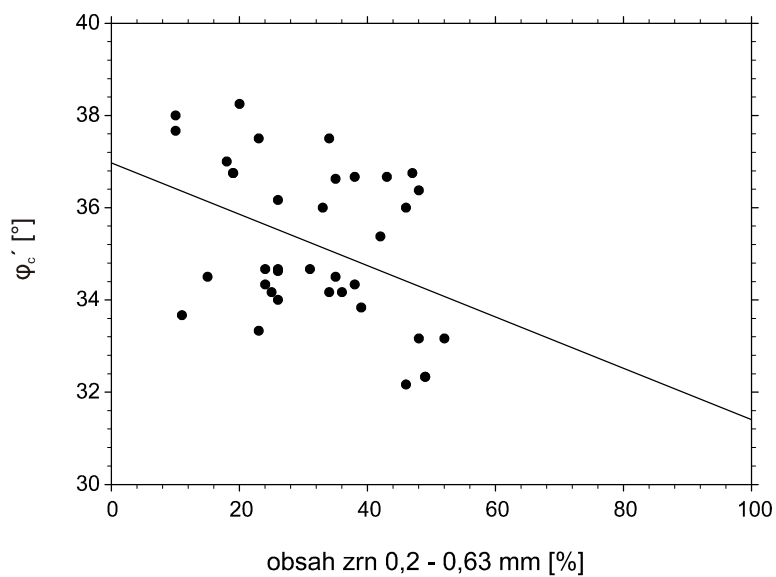
Vzorek	A4	B4	C4	D4	E4	G4	H4	I4	J4
průměr $\varphi_c'$ [°]	33,2	33,2	32,3	32,2	38,3	34,5	33,7	34	32,3
směrodatná odchylka	0,2	0,2	0,2	0,2	1,3	0,4	0,2	0,4	0,2

Úhel přirozené sklonitosti jsem vyhodnocovala pomocí obsahu jednotlivých zrnitostních frakcí. Na základě toho, že zemina použitá pro stanovení úhlu přirozené sklonitosti neobsahovala žádné částice menší než 0,063 mm jsem si vytvořila čtyři skupiny podle velikosti zrn, na jemný písek ten zahrnuje částice od 0,063 mm až do 0,2 mm, střední písek od 0,2 mm – 0,63 mm, na hrubý písek 0,63 mm – 2 mm a na štěrk zrna větší než 2 mm. Pro každý vzorek jsem spočítala, kolik procentuálně obsahuje zrn pro každou kategorii. Do grafu jsem vynesla hodnotu  $\varphi_c'$  pro každý vzorek a jemu příslušnou hodnotu obsahu zrn v dané kategorii. Vynesenými body jsem proložila regresní křivku a určila její rovnici a korelační koeficient, abych zjistila, jestli je mezi body statisticky významný vztah. Jak ukazuje obrázek 9 a obrázek 10 úhel přirozené sklonitosti je ovlivněn přítomností částic větších než 2 mm a částic od 0,63 mm až do 0,2 mm. Rovnice regresní přímky pro  $\varphi_c'$  vs. obsah částic větších než 2 mm je  $\varphi_c' = 34,2 + 0,034 \cdot \text{obsah}$ , hodnota korelačního koeficientu  $r = 0,365$ ,  $p = 0,024$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Rovnice regresní přímky pro  $\varphi_c'$  vs. obsah částic větších než 0,2 mm – 0,63 mm je  $\varphi_c' = 36,97 - 0,056 \cdot \text{obsah}$ , hodnota korelačního koeficientu  $r = -0,398$ ,  $p = 0,0147$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Jak ukazuje graf na obrázku 9 přítomnost částic větších než 2 mm zvyšuje hodnotu  $\varphi_c'$ . Z grafu na obrázku 10 je vidět, že zvyšující se obsah částic 0,2 mm – 0,63 mm snižuje hodnotu  $\varphi_c'$ . Vzorek E4, který na obrázku 9 je odlehlou hodnotou, obsahuje více jak 80% částic menších než 0,2 mm. To mohlo ovlivnit výsledek jeho nepřirozeně vysoké hodnoty  $\varphi_c'$ . Malé zvýšení hodnoty  $\varphi_c'$  bylo

sledováno pro  $D_{50} < 0,2$  mm a může být způsobeno kapilární vodou ze vzdušné vlhkosti (I. Herle and G. Gudehus 1999).

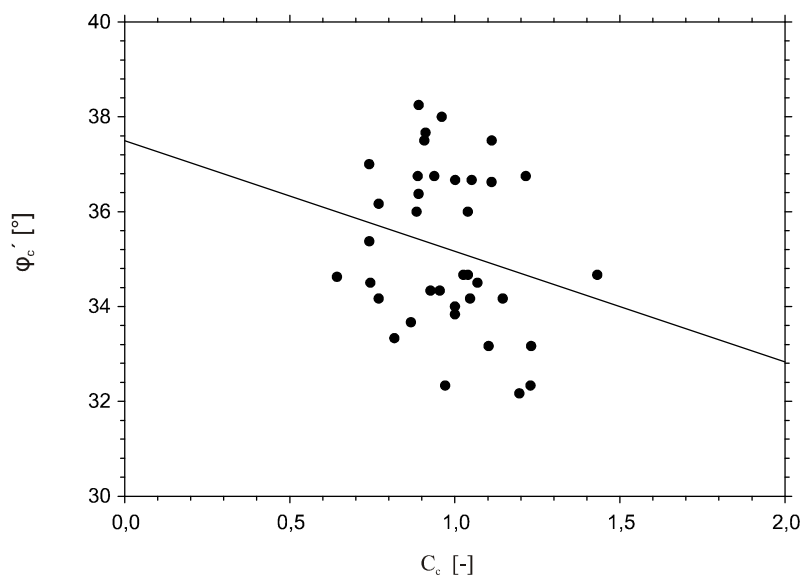


Obrázek 9: Závislost úhlu přirozené sklonitosti  $\phi_c'$  na obsahu zrn nad 2 mm v %

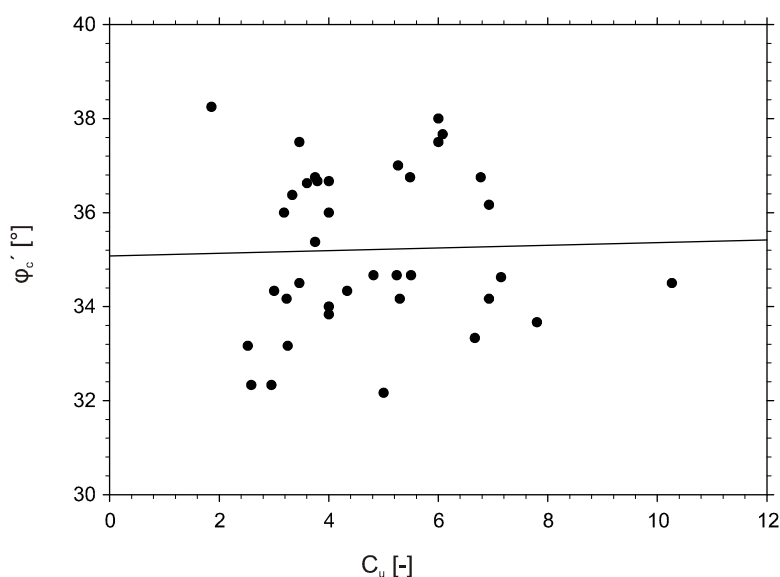


Obrázek 10: Závislost úhlu přirozené sklonitosti  $\phi_c'$  na obsahu zrn 0,2 mm–0,63 mm v %





Obrázek 11: Závislost úhlu přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$  na čísle křivosti  $C_c$

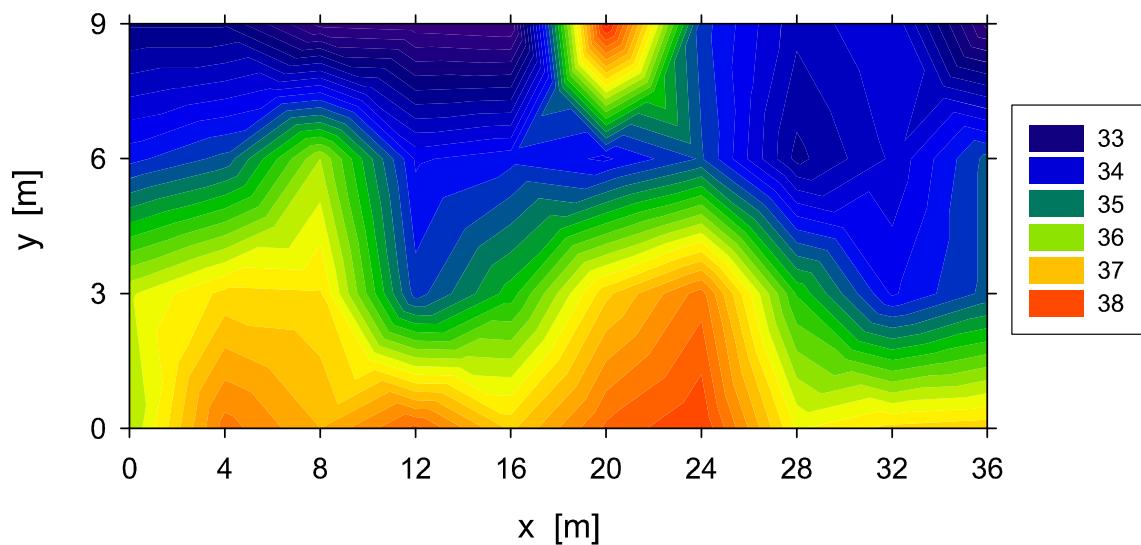


Obrázek 12: Závislost úhlu přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$  na čísle nestejnozrnnosti  $C_u$

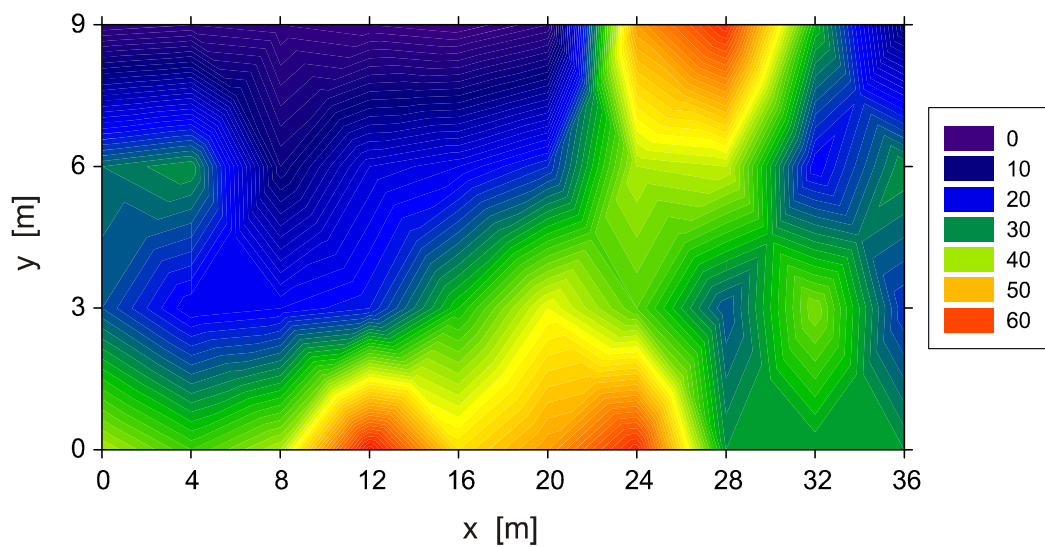
Grafy na obrázku 11 a na obrázku 12 ukazují závislost  $\varphi_c'$  na čísle křivosti  $C_c$  a na čísle nestejnozrnnosti  $C_u$ . Jak ukazují korelační koeficienty mezi hodnotami  $\varphi_c'$  a  $C_c$ ,  $C_u$  není žádná závislost. Rovnice regresní přímky pro  $\varphi_c'$  vs.  $C_c$  je  $\varphi_c' = 37,51 - 2,333 C_c$ , hodnota korelačního koeficientu  $r = -0,227$ ,  $p = 0,1766$  hodnota  $p > 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami není statisticky významný vztah. Rovnice regresní přímky pro  $\varphi_c'$  vs.  $C_u$  je  $\varphi_c' = 35,07 + 0,032 C_u$ , hodnota korelačního koeficientu  $r = 0,0337$ ,  $p = 0,8444$ , hodnota  $p > 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami není statisticky významný vztah.

Z obrázku 13 je patrné, že hodnota úhlu přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$  se mění ve vertikálním směru. Hodnoty  $\varphi_c'$  směrem do podloží stoupají. Jedinou anomálii představuje vzorek E4, který má vysoké procento částic  $< 0,063$  mm až 45%, to vysvětluje zvýšenou hodnotu  $\varphi_c'$

tohoto vzorku. Jak ukazuje obrázek 14, v podloží zemina obsahuje více částic větších než 2 mm, což potvrzuje, že v podloží má zemina vyšší hodnoty  $\varphi_c'$ .



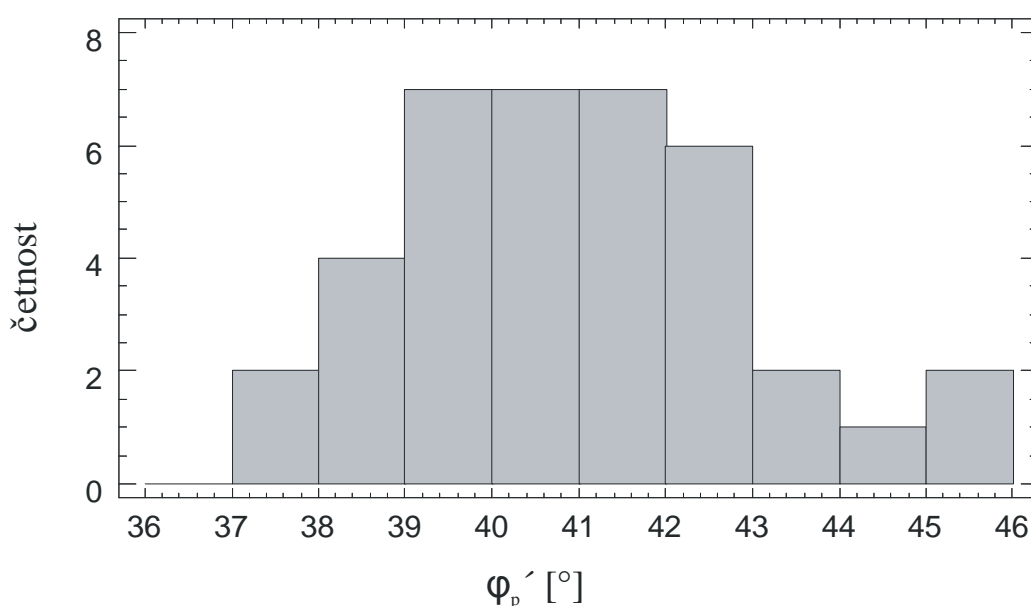
Obrázek 13: Úhel přirozené sklonitosti  $\varphi_c'$  v profilu místa odběru vzorků



Obrázek 14: Obsah částic > 2 mm v profilu místa odběru vzorků

#### 4.4 Triaxiální zkouška

Z této zkoušky jsem stanovovala vrcholový úhel vnitřního tření zeminy  $\varphi_p'$ . Hodnoty  $\varphi_p'$  se pohybovaly mezi  $37,3^\circ$  až  $45,1^\circ$ . Nejčastější hodnota  $\varphi_p'$  byla mezi  $39^\circ$  až  $43^\circ$ . Nejmenší  $\varphi_p'$  jsem naměřila u vzorku I1 a jeho hodnota byla  $37,3^\circ$ . Jedná se o vzorek zeminy, která je podle křivky zrnitosti středně stejnozrná s 10% obsahem jemné frakce. Nejvyšší hodnotu  $\varphi_p'$  jsem naměřila na vzorcích A3, B3 a jejich hodnota byla  $45,1^\circ$ . Jedná se o vzorky zeminy, které si jsou podle křivky zrnitosti velmi podobné, středně stejnozrné s obsahem jemné frakce pod 10%. Četnostní rozdělení  $\varphi_p'$  je na obrázku 15. Jednotlivé hodnoty  $\varphi_p'$  jsou uvedeny v tabulce 4.

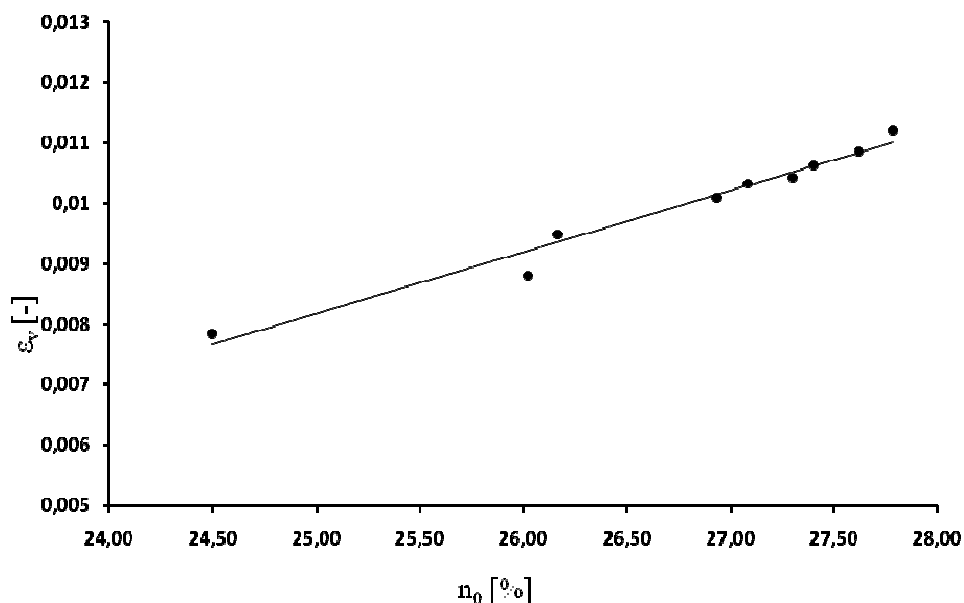


Obrázek 15: Četnost zastoupení vrcholového úhlu vnitřního tření  $\varphi_p'$

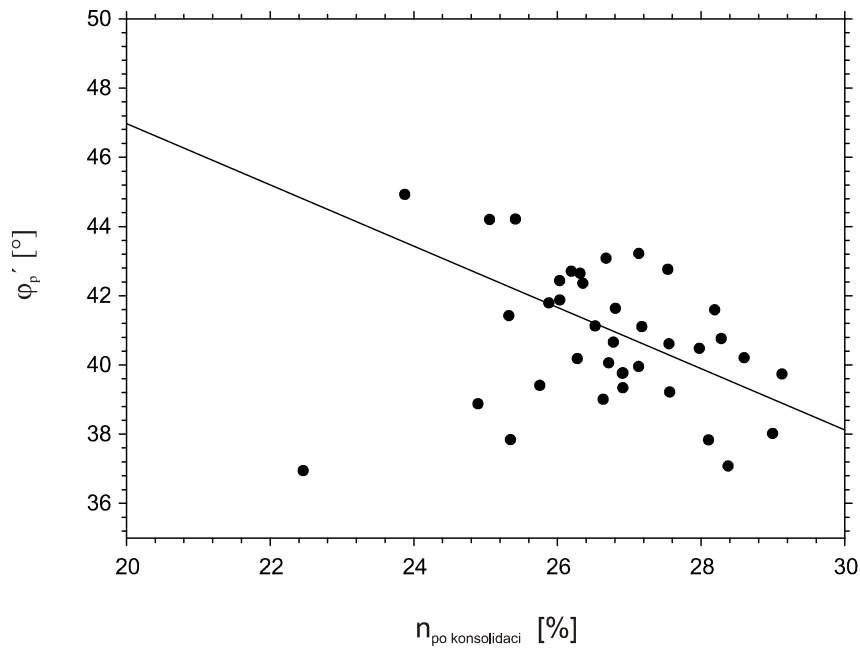
Pórovitosti  $n_0$  jsem stanovila z rozměrů vzorku před zkouškou, kdy ještě neproběhla konsolidace vzorku komorovým tlakem. Při konsolidaci jsem měla měřit  $\Delta V_k$ , abych byla schopná stanovit objem vzorku po konsolidaci a tím i jeho pórovitost před smykovou fází.  $\Delta V_k$  jsem změřila pouze při opakovaných zkouškách vzorků, D1, G1, J1, F2, B3, F3, G3, H3, J3, na ostatních vzorcích jsem  $\Delta V_k$  neměřila. Pro stanovení pórovitosti na začátku smyku jsem proto použila následující postup. Obrázek 16 ukazuje objemové přetvoření  $\varepsilon_v$  v závislosti na  $n_0$ . Body vyjadřují lineární závislost, rovnice závislosti  $\varepsilon_v$  vs.  $n_0$  je  $\varepsilon_v = 0,001 n_0 - 0,0173$ ,  $p > 0,001$ . Na základě této rovnice jsem každému vzorku, u kterého jsem  $\Delta V$  neměřila, dopočetla příslušnou hodnotu  $\Delta V_k$ , která by mu náležela podle jeho hodnoty pórovitosti  $n_0$ .  $\Delta V_k$  jsem odečetla od původního objemu vzorku a stanovila jsem pórovitost po konsolidaci  $n_{po}$  konsolidaci pro každý vzorek. Závislost mezi vrcholovým úhlem a pórovitostí po konsolidaci ukazuje graf na obrázku 17. Při statistickém vyhodnocování jsem ze skupiny vzorků vyřadila vzorky A1, D4, jedná se o odlehlé hodnoty. Jedná se o vzorky zeminy, která měla vysoký podíl

jemnozrné frakce u D4 až 30%. U vzorku D4 došlo patrně i k velké chybě při měření rozměrů. Z těchto důvodů jsem i dané vzorky vyřadila ze statistického vyhodnocení. Po vyloučení A1 a D4 ze statistického vyhodnocení rovnice regresní přímky závislosti  $\varphi_p'$  vs.  $n_{po}$  konsolidaci získala tvar:  $\varphi_p' = -1,1263 n_{po \text{ konsolidaci}} + 71,437$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,634$ ,  $p = 0,021$ ,  $p < 0,05$ , to značí, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah a jsou na sobě závislé. Potvrzuje se, že čím menší je pórovitost písku, tím vyšší je vrcholový úhel vnitřního tření.

Hodnota  $\varphi_p'$  by měla být závislá i na zrnitosti zeminy. Zeminy, které mají strmou křivku zrnitosti (stejnozrné zeminy) jsou hůře zhutnitelné než zeminy, které jsou nestejnozrné. Při přípravě vzorku pro triaxiální zkoušku jsem zeminu hutnila, viz kapitola 3.6.2 Popis přípravy vzorku. Podle zrnitosti mají nestejnozrnou zeminu vzorky C1, D1, G1, G4, H4, jejich hodnota  $\varphi_p'$  je C1 38°, D1 44,2°, G1 43,1°, G4 39,4°, H4 42,7°. všechny vzorky, kromě C1, s nestejnozrnou zeminou mají vyšší hodnotu  $\varphi_p'$ , to by odpovídalo tomu, že nestejnozrné zeminy jsou lépe zhutnitelné. Závislost mezi  $\varphi_p'$  a číslem nestejnozrnnosti  $C_u$ , podle kterého se stanovuje, jestli je zemina stejnozrná, středně stejnozrná nebo nestejnozrná, se nepodařilo dokázat. Dále se nepodařilo nalézt vztah mezi  $\varphi_p'$  a číslem křivosti  $C_c$ , které stanovuje, jestli je zemina dobře zrněná nebo jestli nějaká frakce nechybí.



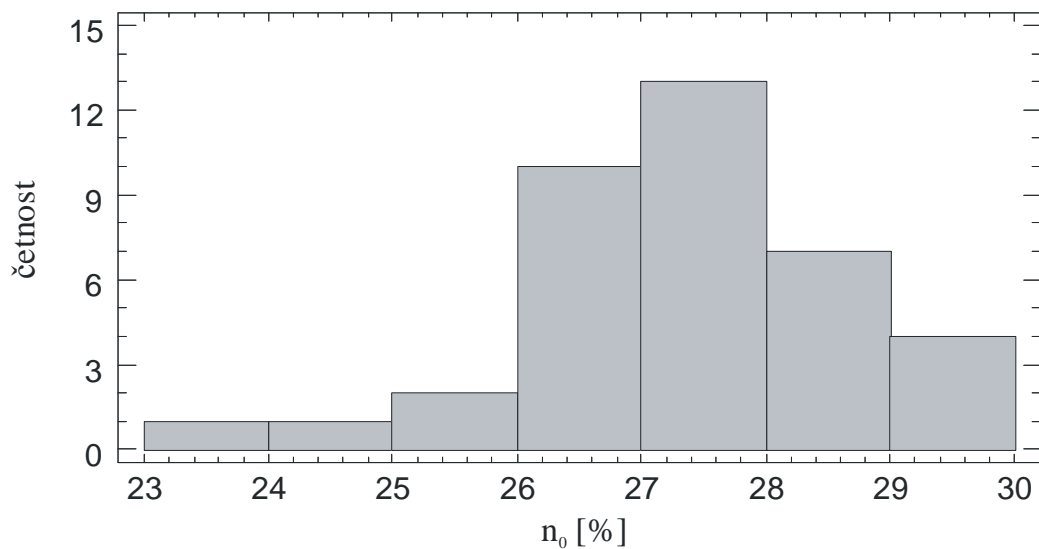
Obrázek 16: Závislost objemového přetvoření  $\varepsilon_v$  na pórovitosti  $n_0$



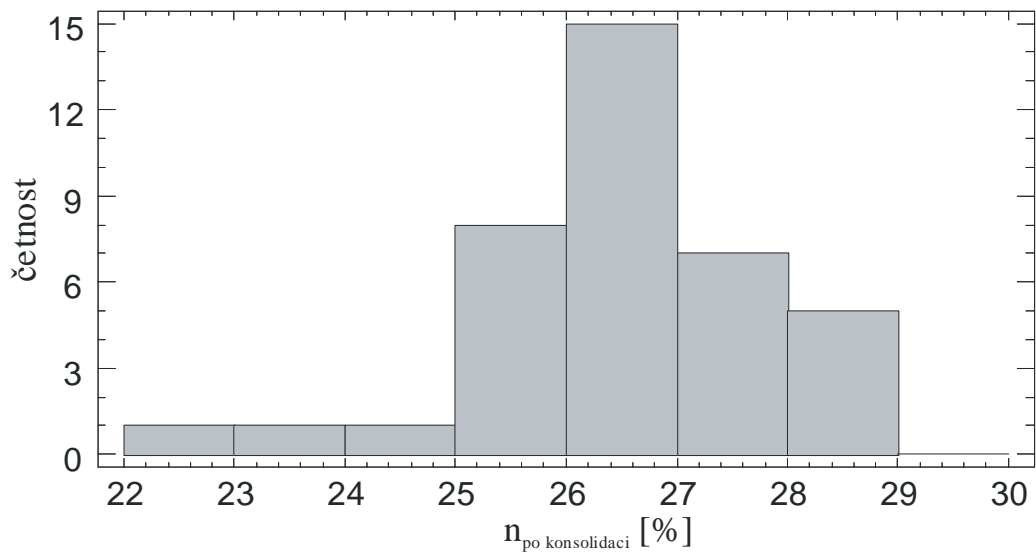
Obrázek 17: Závislost vrcholového úhlu vnitřního tření  $\varphi_p'$  na pórovitosti  $n_{po\ konsolidaci}$

Pórovitost stanovená z rozměrů vzorku před konsolidací byla v rozmezí 23% až 30%. Obrázek 18 ukazuje četnostní zastoupení pórovitosti před konsolidací. Nejnižší hodnotu měl vzorek D4 23,15%, ale hodnota pórovitosti tohoto vzorku není zřejmě správně stanovená, asi došlo k chybě při měření rozměrů vzorku, a tím i ke zkreslení výsledku pórovitosti. Nejmenší uvažovaná hodnota pórovitosti tedy je 24,5% u vzorku B3. Vzorek B3 je podle křivky zrnitosti středně stejnozrnný s podílem jemné frakce pod 10%. Největší hodnota je stanovena na vzorku E2 29,8%. U E2 se jedná o středně stejnozrnnou zeminu s podílem jemné frakce nad 10%. Nejčastější pórovitost je mezi 26% až 28%. Rozsah pórovitostí vzorků připravených v laboratoři se shoduje s hodnotami pórovitosti naměřenými na lokalitě odběru vzorků. Obrázek 19 ukazuje graf četnostního zastoupení pórovitosti po konsolidaci. Pórovitost stanovená po konsolidaci je v rozmezí 22% až 29%. Nejmenší pórovitost je určena pro vzorek D4, ale jak již bylo řečeno, tento vzorek je špatně stanoven, proto se za nejmenší hodnotu  $n_{po\ konsolidaci}$  bere vzorek B3 s hodnotou 23,9%. Největší hodnotu jsem stanovila pro vzorek E2 29,1%. Nejčastější výskyt hodnot je mezi 25% a 28%. Podle tvaru a popisu křivky zrnitosti, lze říci, že vzorky s největší a nejmenší hodnotou pórovitosti se od sebe liší jak ve velikosti a obsahu zrn tak i v obsahu jemné frakce.

Všechny hodnoty  $\varphi_p'$  a  $n_0$ ,  $n_{po\ konsolidaci}$  jsou uvedeny v tabulce 4.



Obrázek 18: Početní zastoupení pórovitosti vzorků před konsolidací  $n_0$



Obrázek 19: Početní zastoupení pórovitosti vzorků po konsolidaci  $n_{po\ konsolidaci}$

Tabulka 4: Výsledky traxiální zkoušky: vrcholový úhel  $\varphi_p'$ , pórovitost před konsolidací  $n_0$ , pórovitost před smykovou fází  $n_{po}$  konsolidaci

Vzorek	A1	B1	C1	D1	E1	G1	H1	I1	J1
$\varphi_p'$ [°]	38,6	40,2	38,0	44,2	42,4	43,1	39,2	37,1	43,2
$n_0$ [%]	25,6	29,2	29,6	26,2	26,7	27,4	28,2	29,0	27,8
$n_{po}$ konsolidaci [%]	24,9	28,6	29,0	25,4	26,0	26,7	27,6	28,4	27,1

Vzorek	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2
$\varphi_p'$ [°]	37,8	39,8	40,6	41,6	39,7	42,6	41,9	39,8	41,4	41,6
$n_0$ [%]	28,7	27,6	28,2	28,8	29,8	26,9	26,7	27,6	26,0	27,5
$n_{po}$ konsolidaci [%]	28,1	26,9	27,6	28,2	29,1	26,3	26,0	26,9	25,3	26,8

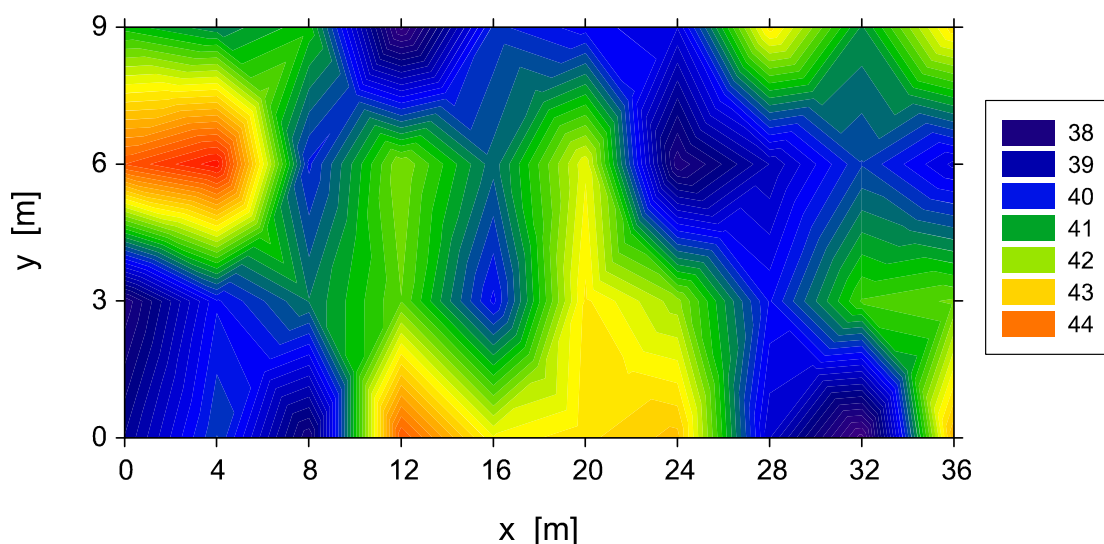
  

Vzorek	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3
$\varphi_p'$ [°]	44,2	44,9	40,0	41,8	40,5	42,4	37,8	39,0	40,2	39,3
$n_0$ [%]	25,8	24,5	27,8	26,6	28,6	27,1	26,0	27,3	27,0	27,6
$n_{po}$ konsolidaci [%]	25,1	23,9	27,1	25,9	28,0	26,4	25,3	26,6	26,3	26,9

Vzorek	A4	B4	C4	D4	E4	G4	H4	I4	J4
$\varphi_p'$ [°]	41,1	40,7	41,1	37,3	40,1	39,4	42,7	40,8	42,8
$n_0$ [%]	27,8	27,4	27,2	23,2	27,4	26,4	26,9	28,9	28,2
$n_{po}$ konsolidaci [%]	27,2	26,8	26,5	22,4	26,7	25,8	26,2	28,3	27,5

Z hodnot vrcholového úhlu  $\varphi_p'$  nelze vysledovat žádné pravidelné uspořádání v prostorové variabilitě v profilu stěny (obrázek 20).



Obrázek 20: Vrcholový úhel  $\varphi_p'$  v profilu odběru vzorků

## 4.5 Edometrická zkouška

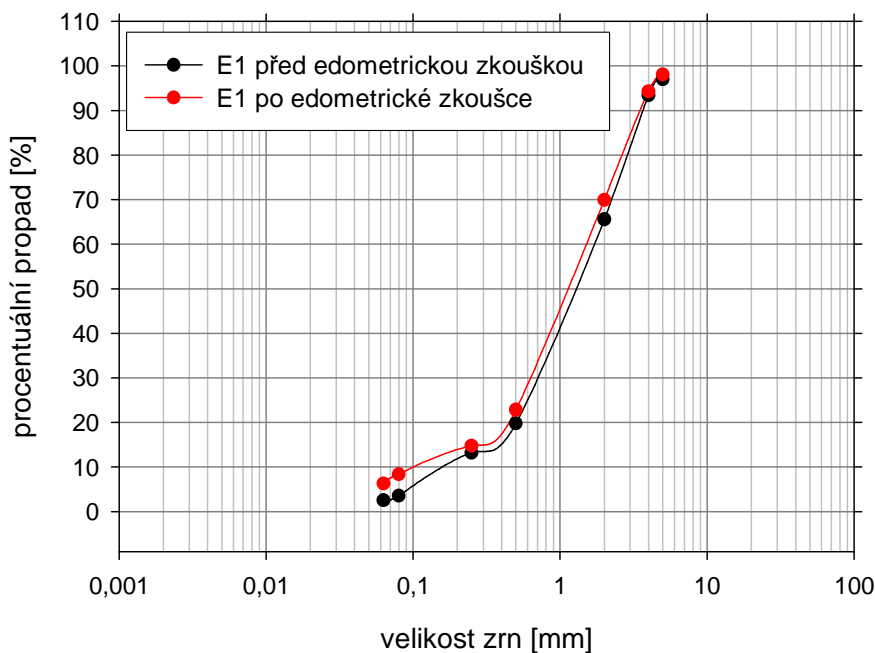
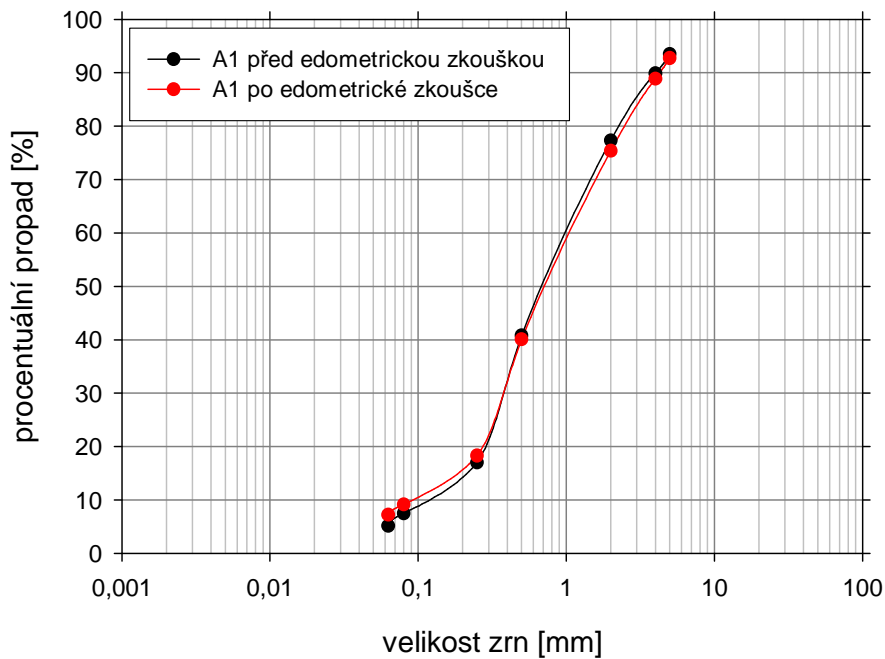
Z naměřených veličin jsem stanovila číslo pórovitosti nasypaného vzorku do edometrického prstence  $e_0$  a dále jsem spočítala čísla pórovitosti během celého stlačování vzorku a ze směrnice čáry stlačitelnosti jsem stanovila index stlačitelnosti  $C_C$ .

Největší počáteční číslo pórovitosti  $e_0$  mají vzorky D4 1,26 a E4. 1,31. Zemina těchto vzorků obsahovala u D4 30% a u E4 45% částic menších než 0,063 mm. Nejnižší číslo pórovitosti  $e_0$  má vzorek zeminy H3 a to 0,67. Vzorek H3 má obsah zrn menších než 0,063 mm do 10%, podle křivky zrnitosti se jedná o zeminu středně stejnozrnnou, dobře zrněnou.

Hodnoty čísla pórovitosti  $e_{fin}$  na konci zkoušky jsou v rozmezí 0,27 – 0,73. Největší hodnotu má vzorek H1 0,73, zemina tohoto vzorku obsahuje cca 12 % zrn menších než 0,063 mm a jedná se o středně stejnozrnnou zeminu. Nejmenší hodnotu  $e_{fin}$  má H3 0,27. Vzorky E4 a D4, které měly největší hodnotu  $e_0$ , měly hodnotu  $e_{fin}$  D4 0,45 a E4 0,38.

Z čáry stlačitelnosti jsem stanovila index stlačitelnosti  $C_C$ . Hodnotu  $C_C$  jsem stanovila na intervalu napětí 100 – 1600 kPa. Hodnoty napětí 3200 až 6400 kPa jsem pro stanovení  $C_C$  vyloučila, protože při těchto hodnotách napětí zřejmě docházelo k drcení zrn. Zjištění, že při vyšších hodnotách napětí dochází k drcení zrn, jsem provedla pomocí zrnitosti. Na vzorku jsem zrnitost provedla před a po edometrické zkoušce (obrázek 21). Zrnitost jsem stanovila tak, že jsem vysušenou zeminu vysypala do soustavy sít a prosévala. Všechnu zachycenou zeminu na sítích jsem zvažila. Takto jsem postupovala i při stanovování zrnitosti po edometrické zkoušce.

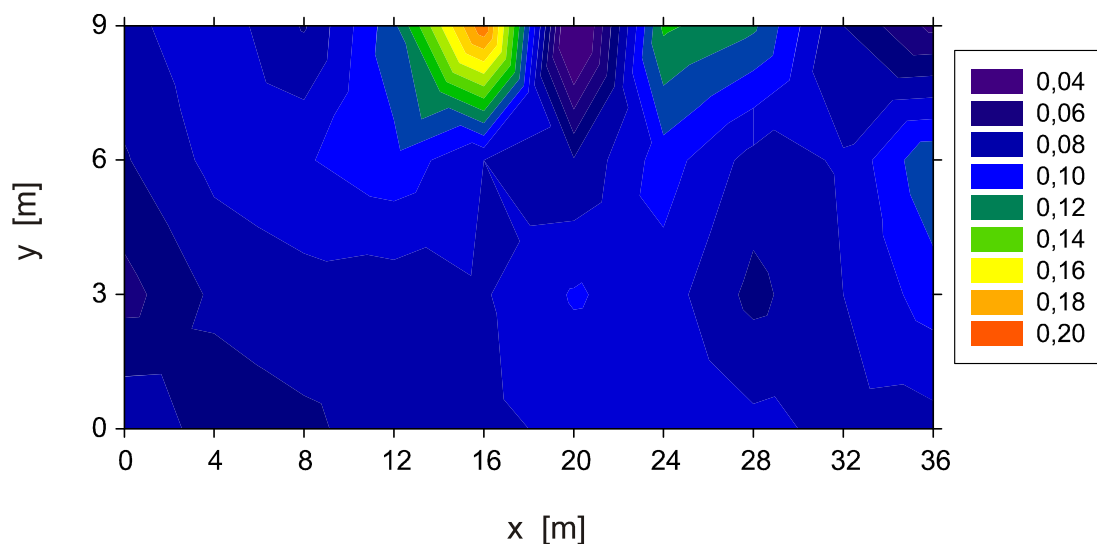




Obrázek 21: Stanovení zrnitosti před a po edometrické zkoušce na vzorku A1 a E1

Hodnoty  $C_C$  se pohybovaly v rozmezí 0,047 – 0,189 Nejvyšší hodnotu  $C_C$  0,189 měl vzorek E4 a nejnižší hodnotu  $C_C$  měl vzorek J4 0,046. Hodnota  $C_C$  u vzorku E4 odpovídá hodnotě  $C_C$  pro prach a jí. Vzorek E4 obsahoval 45% částic menších než 0,063 mm. Na obrázku 22 je vidět, že nejvyšší hodnoty  $C_C$  jsou v nadloží. Hodnota  $C_C$  směrem do nadloží roste.

Všechny hodnoty čísel pórovitostí  $e_0$ ,  $e_{fin}$  a indexu stlačitelnosti  $C_C$  jsou uvedeny v tabulce 5.

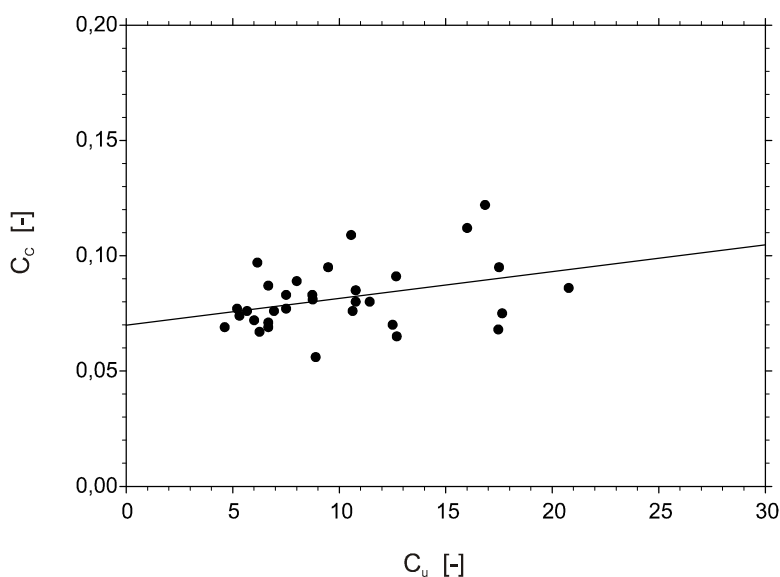


Obrázek 22: index stlačitelnosti  $C_c$  v profilu odběru vzorků

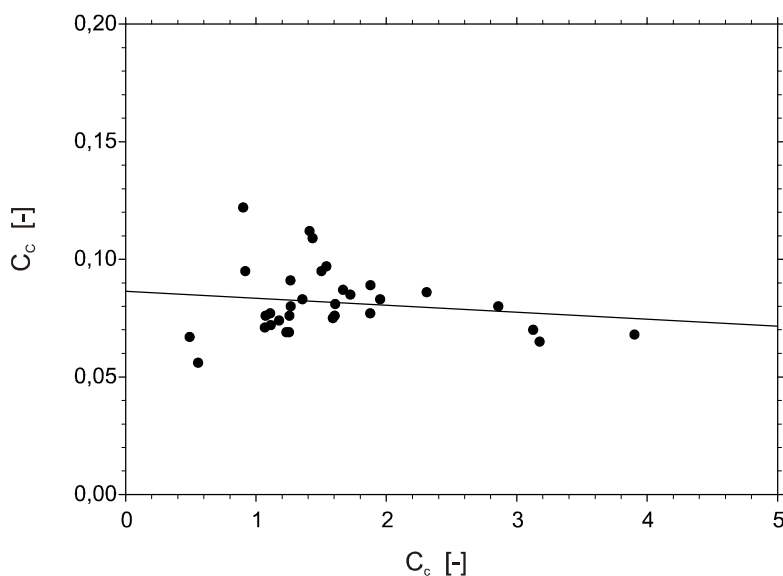
Tabulka 5: Výsledné hodnoty z edometrické zkoušky: číslo pórovitosti na počátku při napětí 0 kPa  $e_0$ , číslo pórovitosti po zalití při napětí 10 kPa  $e_{sat}$ , číslo pórovitosti na konci přitěžování při napětí 6400 kPa  $e_{fin}$ , index stlačitelnosti  $C_c$

Vzorek	A1	B1	C1	D1	E1	G1	H1	I1	J1	
$e_0$ [-]	0,86	0,81	0,77	0,85	0,85	0,90	1,19	1,13	1,00	
$e_{sat}$ [-]	0,84	0,80	0,71	0,80	0,78	0,84	1,11	1,02	0,89	
$e_{fin}$ [-]	0,46	0,49	0,43	0,50	0,50	0,53	0,73	0,70	0,56	
$C_c$ [-]	0,079	0,065	0,068	0,075	0,078	0,086	0,083	0,077	0,076	
Vzorek	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2
$e_0$ [-]	0,94	0,97	1,00	0,98	1,01	1,00	1,08	0,90	0,89	1,02
$e_{sat}$ [-]	0,85	0,92	0,92	0,96	0,91	0,87	0,96	0,78	0,80	0,87
$e_{fin}$ [-]	0,60	0,62	0,59	0,61	0,62	0,49	0,62	0,52	0,47	0,47
$C_c$ [-]	0,056	0,072	0,076	0,074	0,079	0,091	0,085	0,067	0,080	0,095
Vzorek	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3
$e_0$ [-]	0,96	0,86	1,21	1,06	1,05	0,87	0,88	0,67	0,90	0,91
$e_{sat}$ [-]	0,89	0,78	1,08	0,94	0,94	0,83	0,82	0,63	0,86	0,85
$e_{fin}$ [-]	0,60	0,45	0,56	0,50	0,59	0,47	0,45	0,27	0,40	0,37
$C_c$ [-]	0,069	0,083	0,089	0,097	0,080	0,071	0,095	0,076	0,081	0,109
Vzorek	A4	B4	C4	D4	E4	G4	H4	I4	J4	
$e_0$ [-]	1,08	1,12	0,98	1,26	1,31	0,93	0,89	0,86	1,09	
$e_{sat}$ [-]	1,00	0,98	0,93	1,19	1,22	0,86	0,86	0,80	1,03	
$e_{fin}$ [-]	0,68	0,64	0,60	0,45	0,38	0,37	0,39	0,45	0,67	
$C_c$ [-]	0,077	0,087	0,069	0,107	0,189	0,122	0,112	0,070	0,047	

Dále jsem se snažila nalézt vztah mezi  $C_C$  a zrnitostí zeminy charakterizovanou číslem křivosti  $C_u$  a číslem nestejnozrnnosti  $C_u$ . Jak ukazuje graf na obrázku 23, existuje závislost  $C_C$  na čísle nestejnozrnnosti  $C_u$ . Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $C_u$  je  $C_C = 0,0699 + 0,00116 C_u$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,355$ ,  $p = 0,0459$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Obrázek 24 zobrazuje vztah mezi  $C_C$  a  $C_c$ . Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $C_c$  je  $C_C = 0,0825 - 0,00135 C_c$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = -0,0821$ ,  $p = 0,661$ , hodnota  $p > 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami není statisticky významný vztah. Na intervalu čísla křivosti  $C_c$  od 1 do 3 existuje vztah mezi  $C_C$  a indexem stlačitelnosti  $C_c$ . Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $C_c$  na intervalu od 1 do 3 je  $C_C = 0,0686 + 0,00652 C_c$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,469$ ,  $p = 0,0371$ ,  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah.



Obrázek 23: Závislost indexu stlačitelnosti  $C_C$  na čísle nestejnozrnnosti  $C_u$

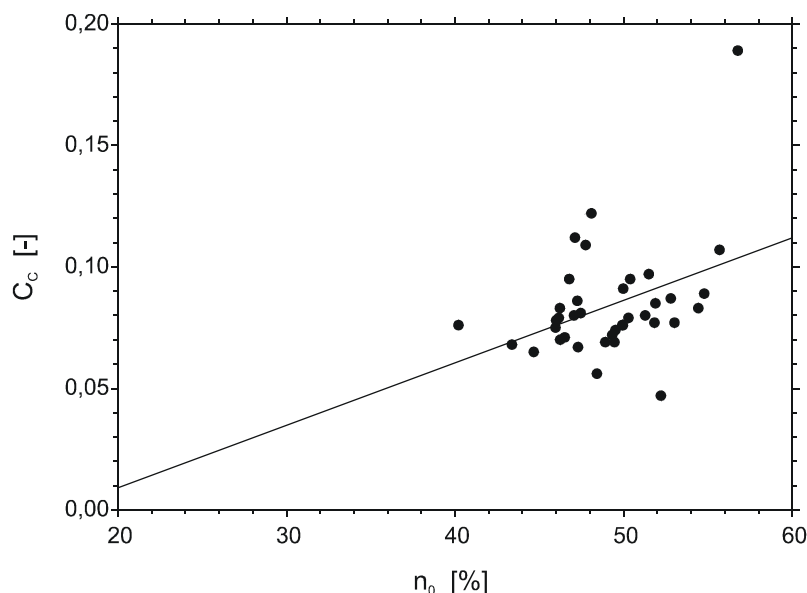


Obrázek 24: Závislost indexu stlačitelnosti  $C_C$  na čísle křivosti  $C_c$

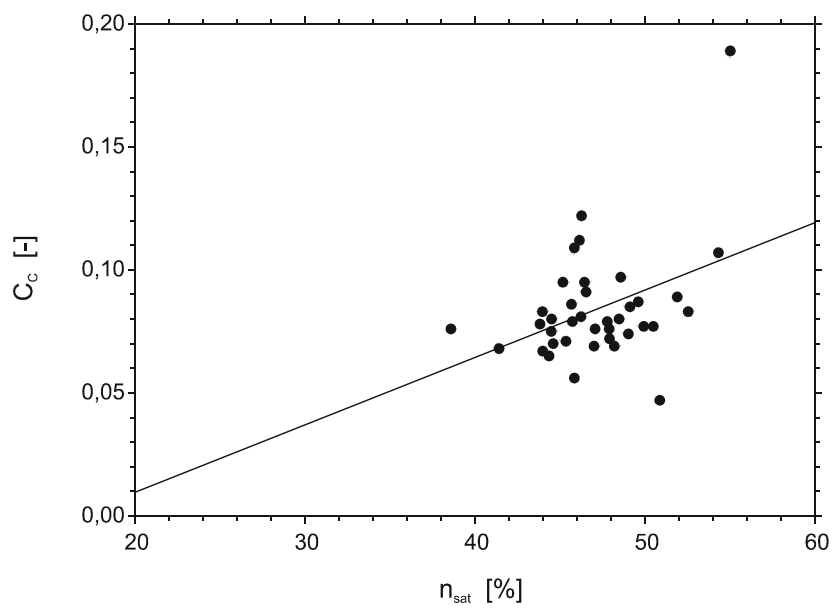
Vztah mezi indexem stlačitelnosti  $C_C$  a pórovitostí vzorku zobrazují grafy na obrázku 25, obrázku 26 a obrázku 27. Jak je vidět z grafů hodnota  $C_C$  je závislá na počáteční pórovitosti  $n_0$ . Vzorky D4 a E4 mají hodnoty  $C_C$  vyšší než by odpovídalo jejich hodnotě pórovitosti. Tento jev může být způsoben vysokým obsahem částic menších 0,063 mm. Pórovitost  $n_0$  je pórovitost vzorku zeminy nasypané do edometrického prstence před zkouškou při napětí 0 kPa,  $n_{sat}$  je pórovitost zeminy po zalití vodou při napětí 10 kPa a  $n_{fin}$  je pórovitost zeminy po skončení přitěžování při napětí 6400 kPa. Hodnoty pórovitosti jsem stanovila z hodnot čísla pórovitosti pomocí vzorce (22), kde  $e$  je číslo pórovitosti.

$$n = \frac{e}{e+1} \times 100 (\%) \quad (22)$$

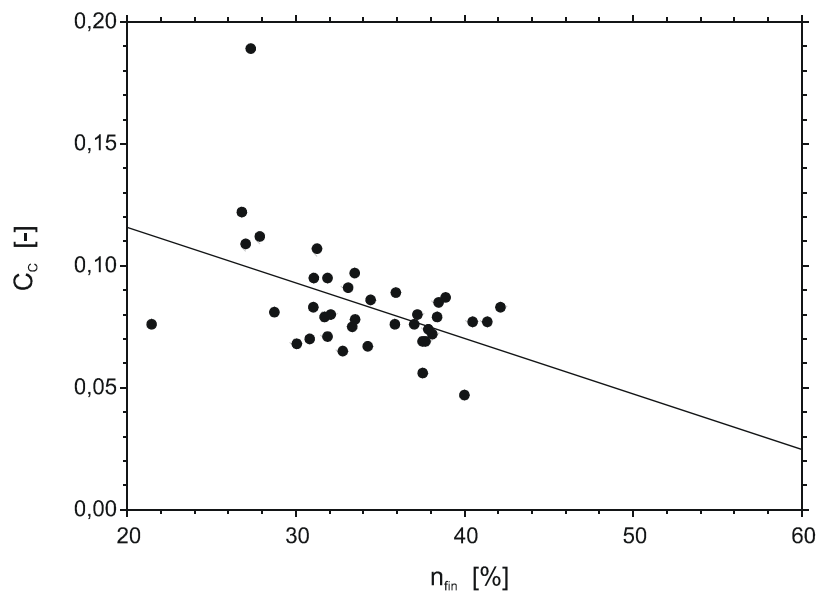
Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $n_0$  je  $C_C = - 0,042 + 0,00257 n_0$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,387$ ,  $p = 0,0164$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $n_{sat}$  je  $C_C = - 0,045 + 0,00274 n_{sat}$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,393$ ,  $p = 0,0146$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Rovnice regresní přímky pro  $C_C$  vs.  $n_{fin}$  je  $C_C = 0,161 - 0,00228 n_{fin}$ , hodnota korelačního koeficientu je  $r = - 0,46$ ,  $p = 0,0036$ , hodnota  $p < 0,05$  z toho plyne, že mezi hodnotami je statisticky významný vztah. Závislost  $C_C$  na pórovitosti ukazuje, že se patrně jedná o různé zeminy. Ze zrnitostních křivek, čísla nestejnorodnosti a čísla křivosti je patrné, že se jedná o různé zeminy. Kdyby se jednalo o stejné zeminy, neexistovala by závislost mezi  $C_C$  a pórovitostí, protože  $C_C$  je směrnice čáry stlačitelnosti (závislost  $e$  na  $\log \sigma_v$ ).



Obrázek 25: Graf závislosti indexu stlačitelnosti  $C_C$  na pórovitosti  $n_0$



Obrázek 26: Graf závislosti indexu stlačitelnosti  $C_c$  na pórovitosti  $n_{sat}$



Obrázek 27: Závislost indexu stlačitelnosti  $C_c$  na pórovitosti  $n_{fin}$

## 5 ZÁVĚR

Zrnitostní rozbor prokázal, že vzorky obsahují průměrně 13% jemných částic (tj. částic menších než 0,063 mm). Vzorky A1, E1, D4, E4, J4 mají obsah jemných částic větší než 13% a vzorek E4 obsahuje jemných částí kolem 45%. Vzorky s vyšším obsahem částic větších než 2 mm jsou ve spodní části zkoumaného profilu pískovny a směrem vzhůru se obsah štěrkových částic snižuje.

Stanovení úhlu přirozené sklonitosti ukázalo, že hodnota úhlu vnitřního tření v kritickém stavu  $\varphi_c'$  se zvyšuje směrem dolů. Ukázalo se, že hodnota  $\varphi_c'$  je závislá na obsahu částic větších než 2 mm (štěrk) a na obsahu částic 0,2 – 0,63 mm (střední písek). Jak ukazuje obrázek 9, čím více obsahuje zemina částic větších než 2 mm tím se hodnota  $\varphi_c'$  zvyšuje a z obrázku 10 je patrné, že se vzrůstajícím obsahem částí 0,2 – 0,63 mm se hodnota  $\varphi_c'$  snižuje. Na zjištěnou hodnotu  $\varphi_c'$  má při zvolené technice vliv i obsah jemných částic, čím více obsahuje zemina jemných částic tím se stanovené  $\varphi_c'$  zvyšuje, kvůli vzdušné vlhkosti, která zvyšuje kapilární soudržnost zrn. Závislost mezi  $\varphi_c'$  a číslem křivosti a nestejnozrnnosti se nepodařilo prokázat.

Z triaxiální zkoušky se stanovil vrcholový úhel vnitřního tření  $\varphi_p'$  který, jak ukazuje obrázek 17, je závislý na pórovitosti. Se snižující se pórovitostí se hodnota  $\varphi_p'$  zvyšuje. Hodnota  $\varphi_p'$  by proto měla být závislá i na zrnitosti, neboť vzorky, které byly nestejnozrnné by měly mít nižší pórovitost a vyšší hodnotu  $\varphi_p'$ . Hodnoty  $\varphi_p'$  vynesené v profilu stěny, ale neukazují žádné uspořádání.

Z edometrické zkoušky se stanovila hodnota indexu stlačitelnosti  $C_C$ . Jak ukazují obrázky 23 a 24,  $C_C$  je závislý na čísle křivosti a nestejnozrnnosti.  $C_C$  je závislý na čísle křivosti pouze v intervalu od 1 do 3, pro hodnoty menší než 1 a větší než 3 závislost neplatí. Se zvyšující se hodnotou čísla křivosti na intervalu od 1 do 3, se hodnota  $C_C$  snižuje a se zvyšující se hodnotou čísla nestejnozrnnosti, se  $C_C$  zvyšuje. Dále bylo zjištěno, že  $C_C$  je závislé na pórovitosti vzorku. To potvrzuje, že byly zkoušeny různé zeminy, stejný závěr potvrzuje i zjištění, že existuje různé  $\varphi_c'$  v závislosti na křivce zrnitosti.

Při přípravě vzorků v laboratoři se podařilo, dosáhnou podobných hodnot pórovitosti, jaké byly stanoveny in situ pomocí membránového objemoměru.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Čech, V., Ciniburk, M. Dohnal, Z., Gabrielová-Boříková, N., Holub, V., Kodym, O., Kolářová, M., Malecha, A., Matějovská, O., Mrázek, A., Odehnal, L., Polák, A., Řeháková, Z., Slánská, J., Suk, M., Špinar, Z. (1962): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1:200 000, M-33-XXVII České Budějovice, M-33-XXXIII Vyšší Brod. Vydal Geofond v nakladatelství Československé akademie věd, 191 str.

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

ČSN CEN ISO/TS 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin. Praha: Český normalizační institut, duben 2005

ČSN CEN ISO/TS 17892-9 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin. Praha: Český normalizační institut, duben 2005

ČSN 72 1010 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ZEMIN: Laboratorní a polní metody. Praha: Vydavatelství norem, 6. 4. 1989

Herle, I., Gudehus, G. (1999): Determination of parameters of hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of cohesive-frictional materials* 4, str. 461-486

Chlupáč, I., Brzobohatý, R., Kovanda, J., Stráník, Z., (2002): Geologická minulost České republiky. Academia, Praha, 437 str., ISBN 80-200-0914-0

Suk, M., Dornič, J., Hokr, Z., Holásek, O., Holub, V., Líbalová, J., Odehnal, L., Sattran, V., Šalanský, K., Zima, K., Žebera, K. (1978): Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSSR 1:25 000, 22-444 ŠEVĚTÍN. Ústřední ústav geologický, Praha, 46 str.

Suchomel, R. a Mašín, D.(2010a): Spatial variability of soil parameters in an analysis of a strip footing using hypoplastic model. 7<sup>th</sup> European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2010), Trondheim, Norway. Benz, T. and Nordal, S. (Eds.); 383-388. ISBN 978-0-415-59239-0.

Suchomel, R. a Mašín, D.(2010b): Calibration of an advanced soil constitutive model for use in probabilistic numerical analysis. Int. Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo I), Pietruszczak et al. (Eds.) Juan-les-Pins, France; 265-274.

von Wolffersdorff, P. A. (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 1, 251 – 271.

geologická mapa: [http://mapy.geology.cz/website/new\\_tisk/](http://mapy.geology.cz/website/new_tisk/), (24.08.2010)



## **7 PŘÍLOHY**

Příloha č. 1: Geologická mapa zájmového území

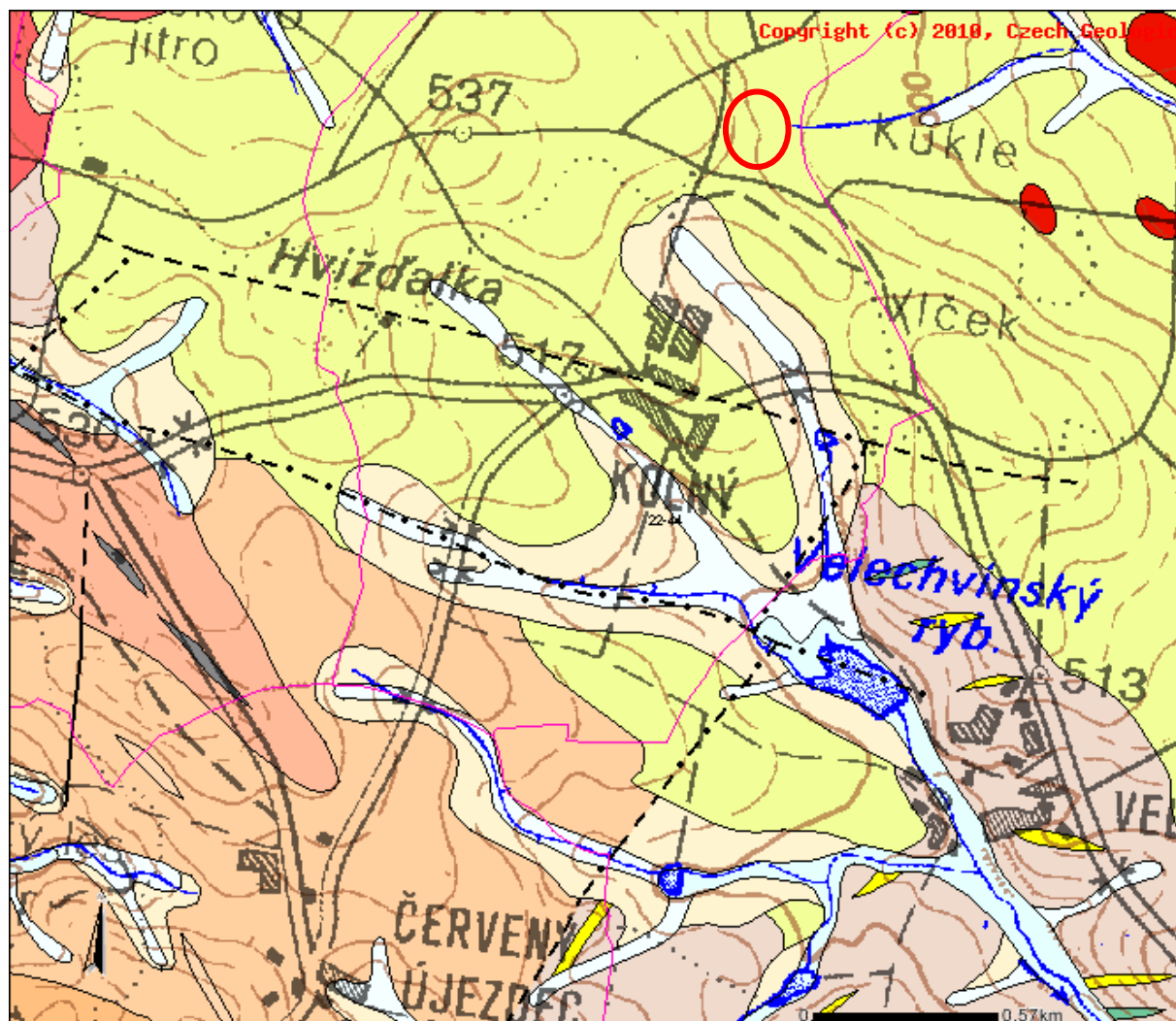
Příloha č. 2: Křivky zrnitosti neupravené zeminy s frakcí 0,063 mm

Příloha č. 3: Křivky zrnitosti upravené zeminy bez frakce 0,063 mm

Příloha č. 4: Grafy závislosti deviátorového napětí na osovém přetvoření a grafy závislosti objemového přetvoření na osovém přetvoření (triaxiální zkouška)

Příloha č. 5: Grafy závislosti čísla pórovitosti na logaritmu napětí (edometrická zkouška)

**Příloha č. 1: Geologická mapa zájmového území**



Geologická mapa zájmového území

Převzatá z: [http://mapy.geology.cz/website/new\\_tisk/](http://mapy.geology.cz/website/new_tisk/)

## LEGENDA:

### Kenozoikum

#### Kvartér

##### *Holocén*

- 6** nivní sediment (fluviální nečleněné + sedimenty vodních nádrží)
- 7** smíšený sediment (deluviofluviální)
- 12** písčito-hlinitý až hlinito-písčítý sediment (deluviální) (složení pestré)

## ČESKÝ MASIV - POKRYVNÉ ÚTVARY A POSTVARISKÉ MAGMATITY

### Mezozoikum

#### Křída

##### *křída svrchní*

- 273** pískovce, slepence, jílovce a prachovce (sladkovodní až brakické) (složení kaolinit)

### Paleozoikum

#### Perm

##### *perm spodní*

- 444** prachovce, jílovce
- 445** jílovce, jemnozrné pískovce
- 446** Karbonáty
- 447** antracitové sloje

#### karbon, perm

##### *karbon svrchní, perm spodní*


- 448** arkózovité pískovce

## ČESKÝ MASIV - KRYSTALINIKUM A PREVARISKÉ PALEOZOIKUM

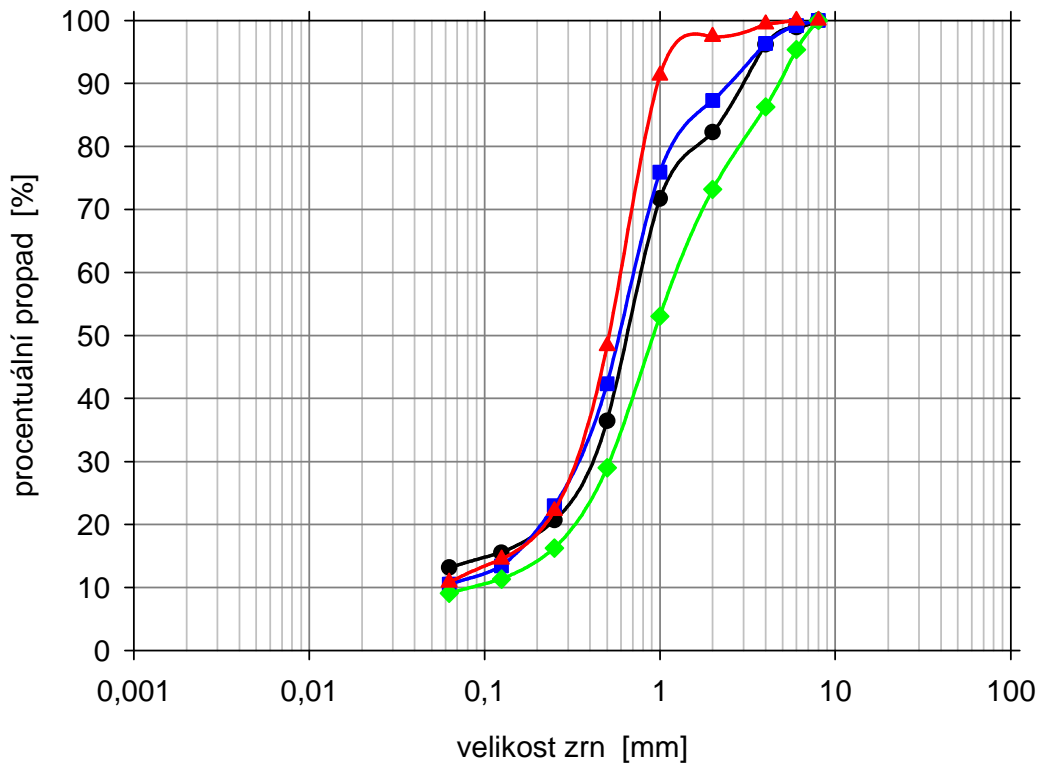
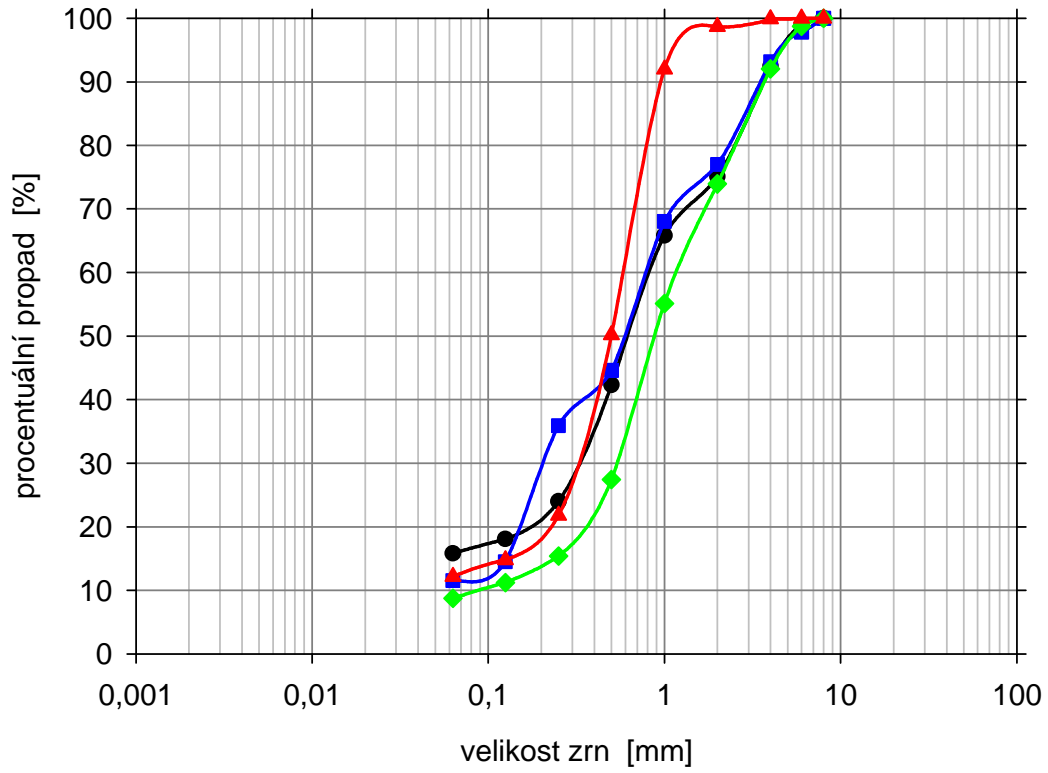
### Karbon

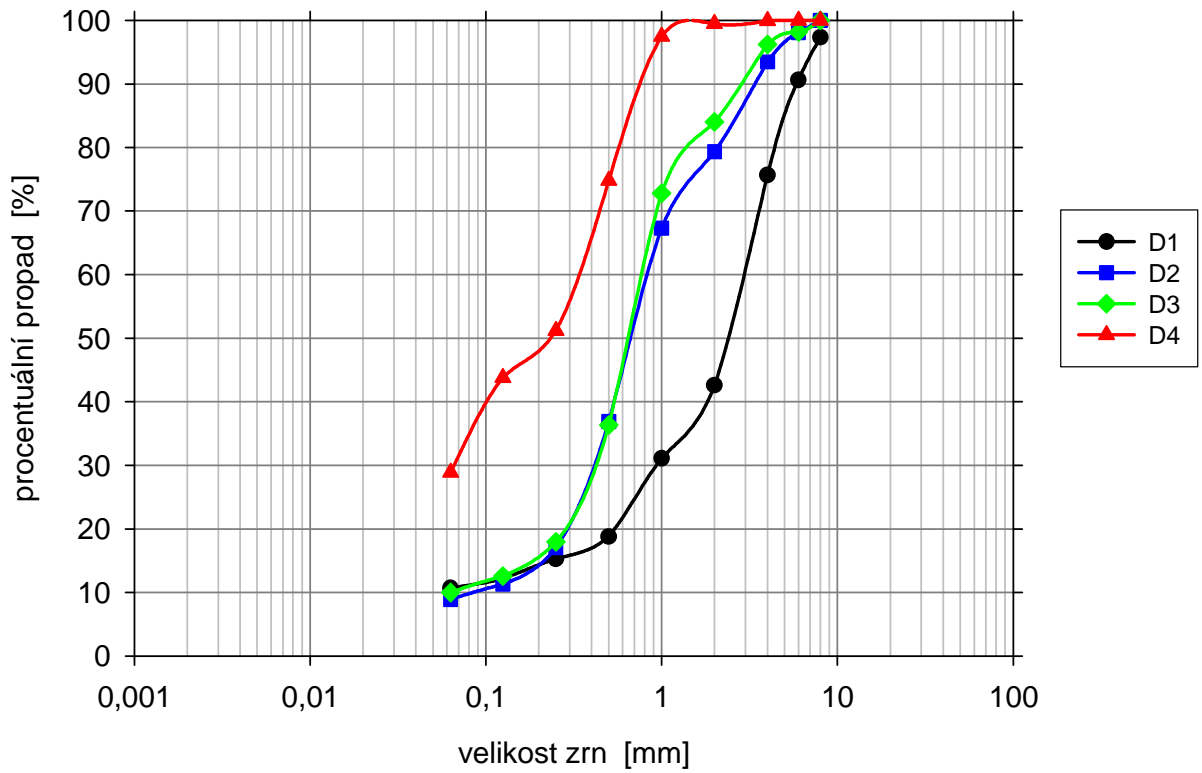
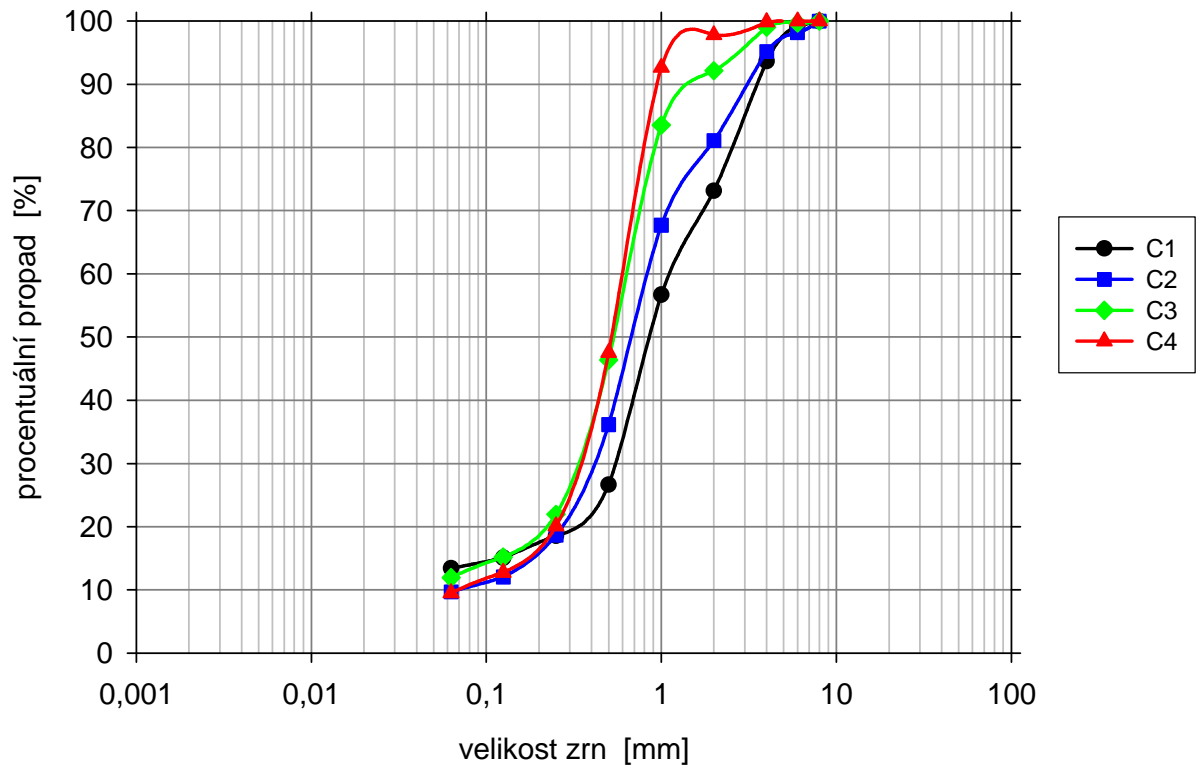
- 1529** Aplit
- 1538** aplopegmatit, pegmatit
- 1545** granit (složení biotit obvykle více než muskovit)
- 1553** granit (složení biotit (+muskovit))

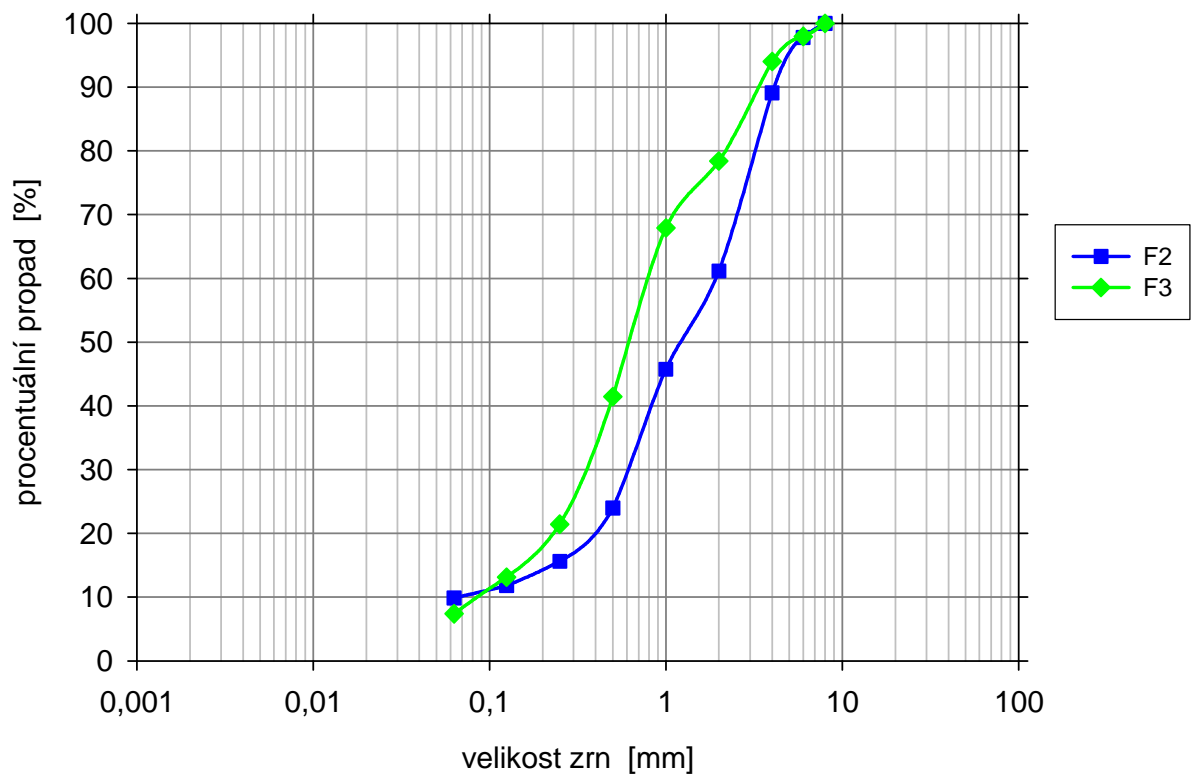
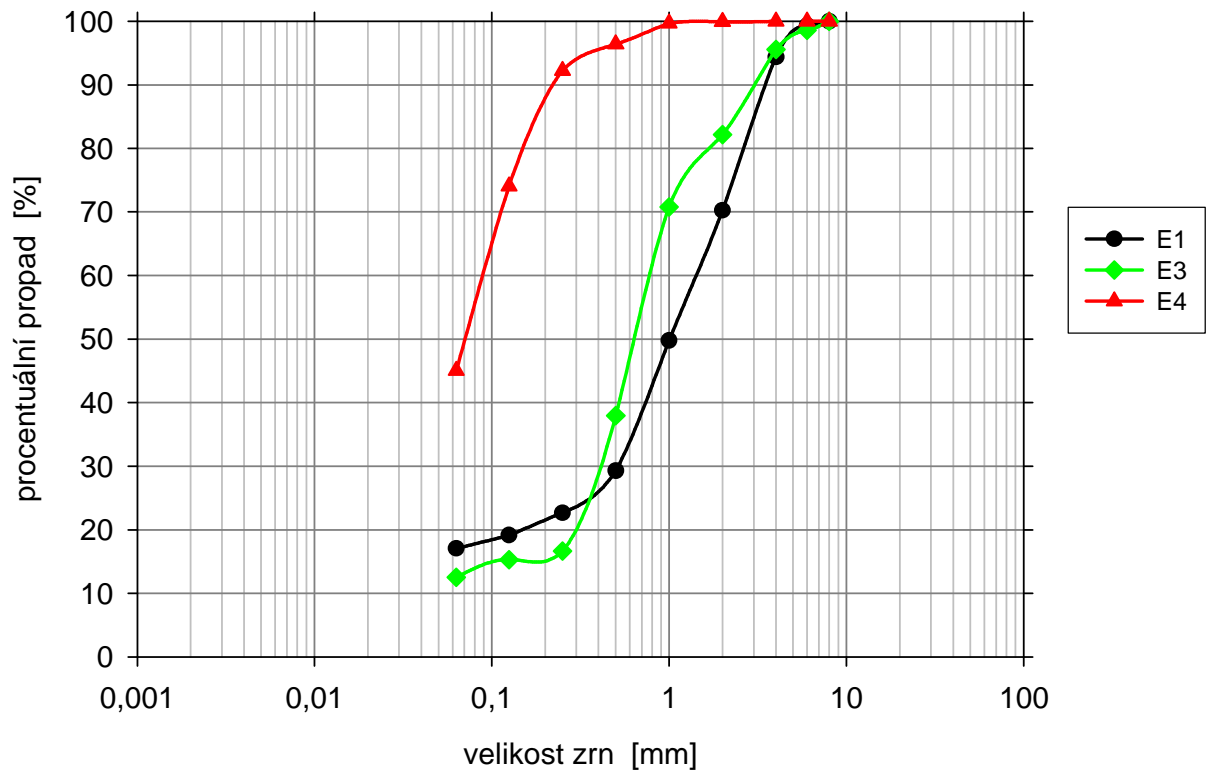
### paleozoikum až proterozoikum

- 1248** Amfibolit
- 2177** pararula až migmatit (složení biotit)
-  místo odběru vzorků (pískovna Kolný)

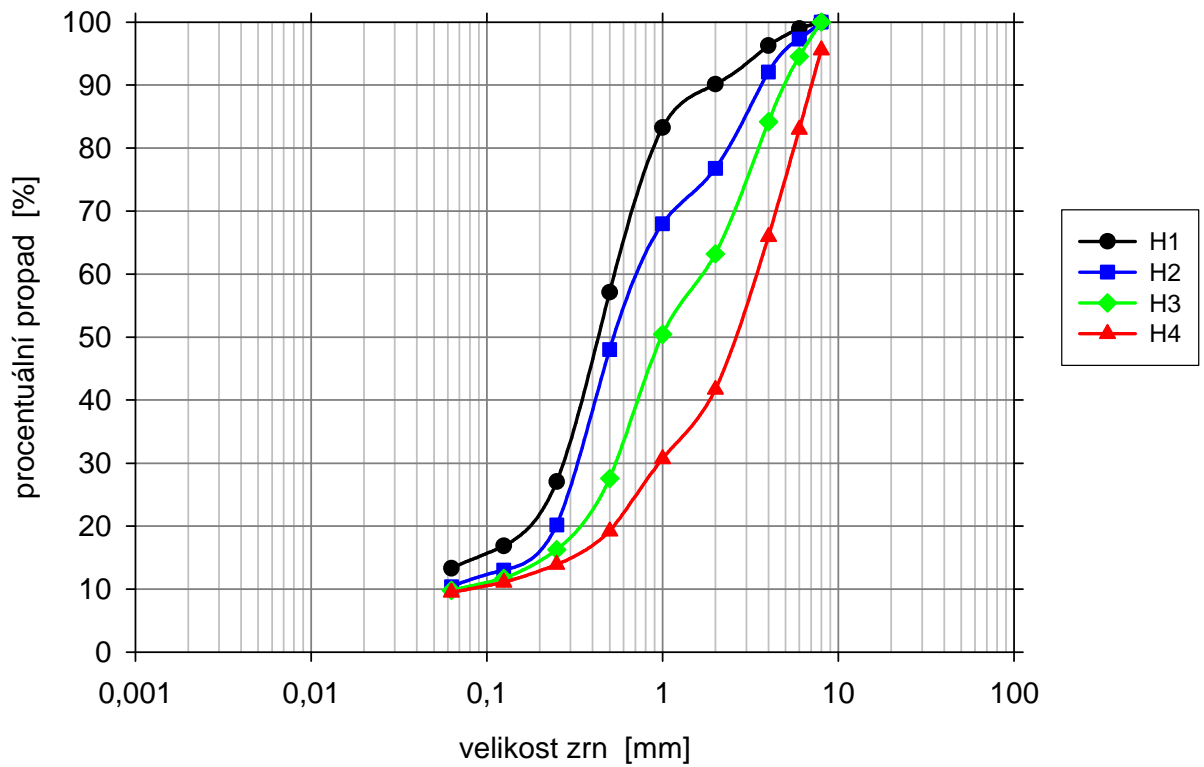
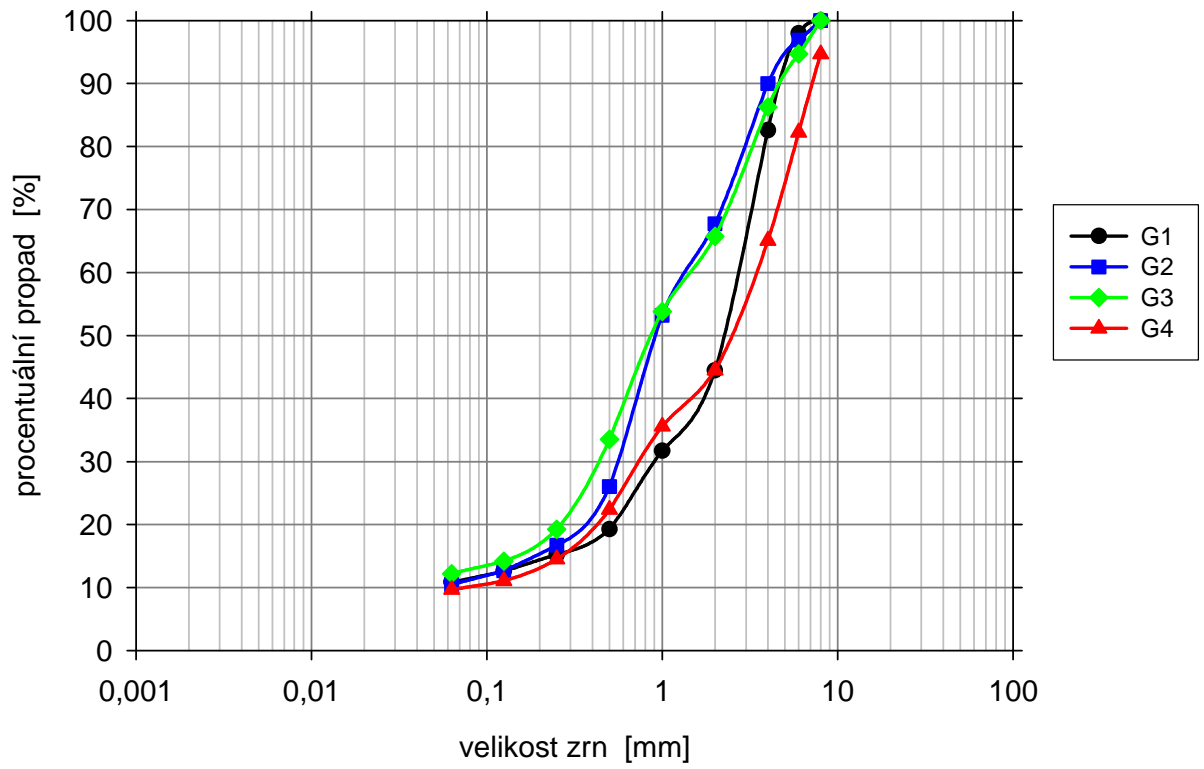
**Příloha č. 2: Křivky zrnitosti neupravené zeminy s frakcí 0,063 mm**

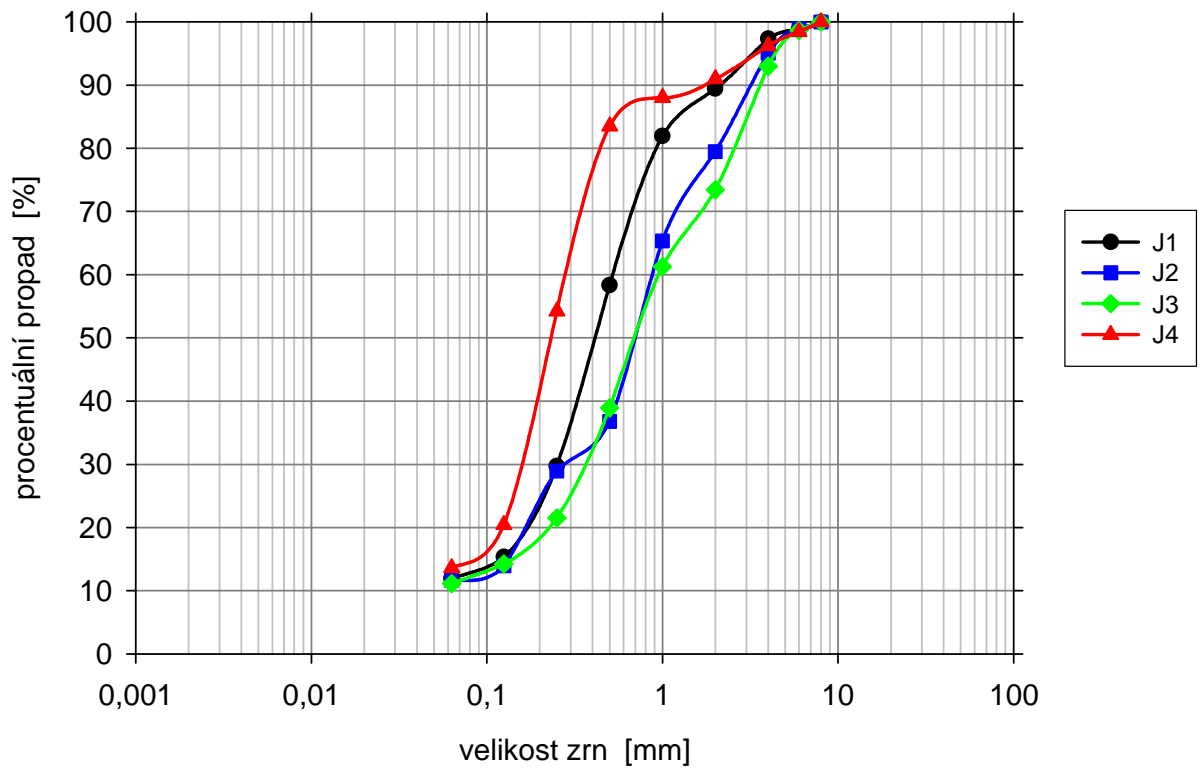
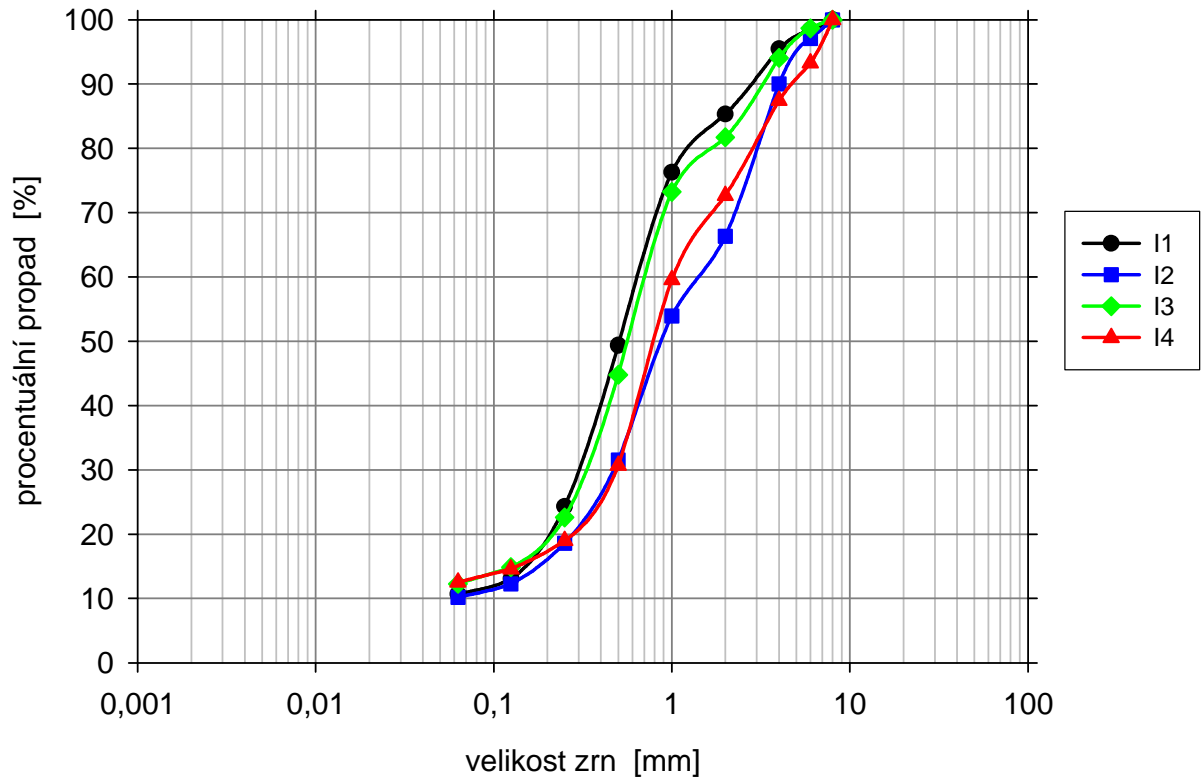




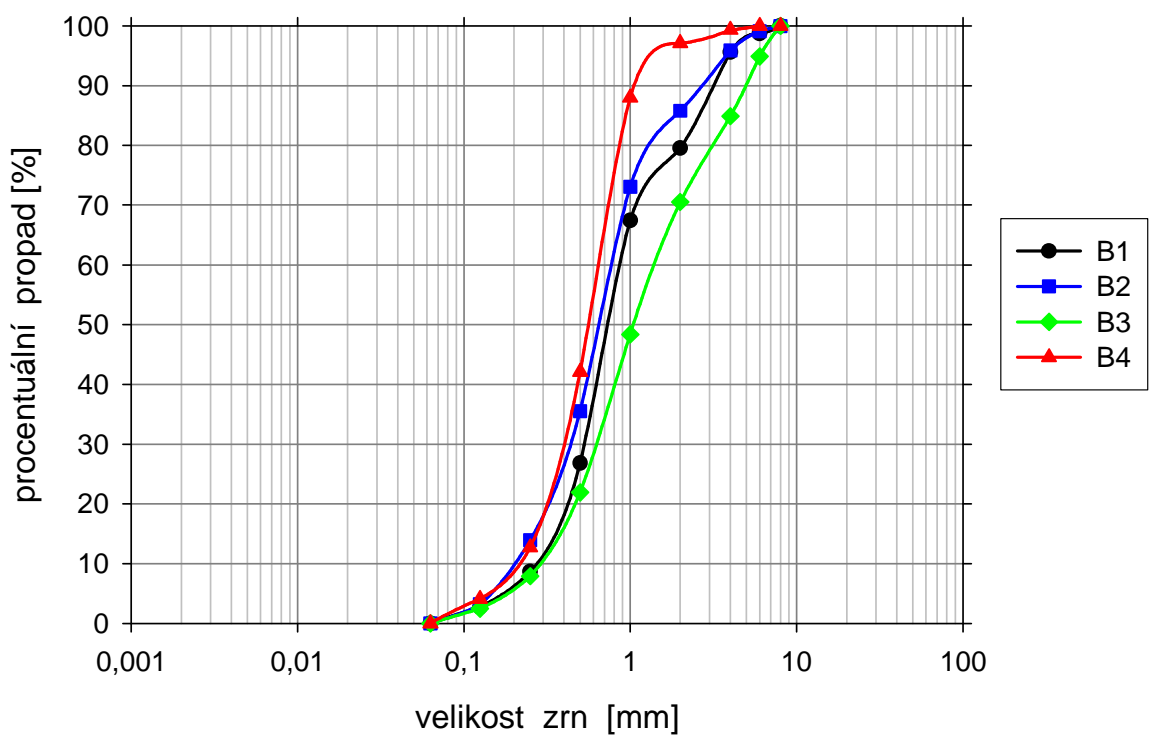
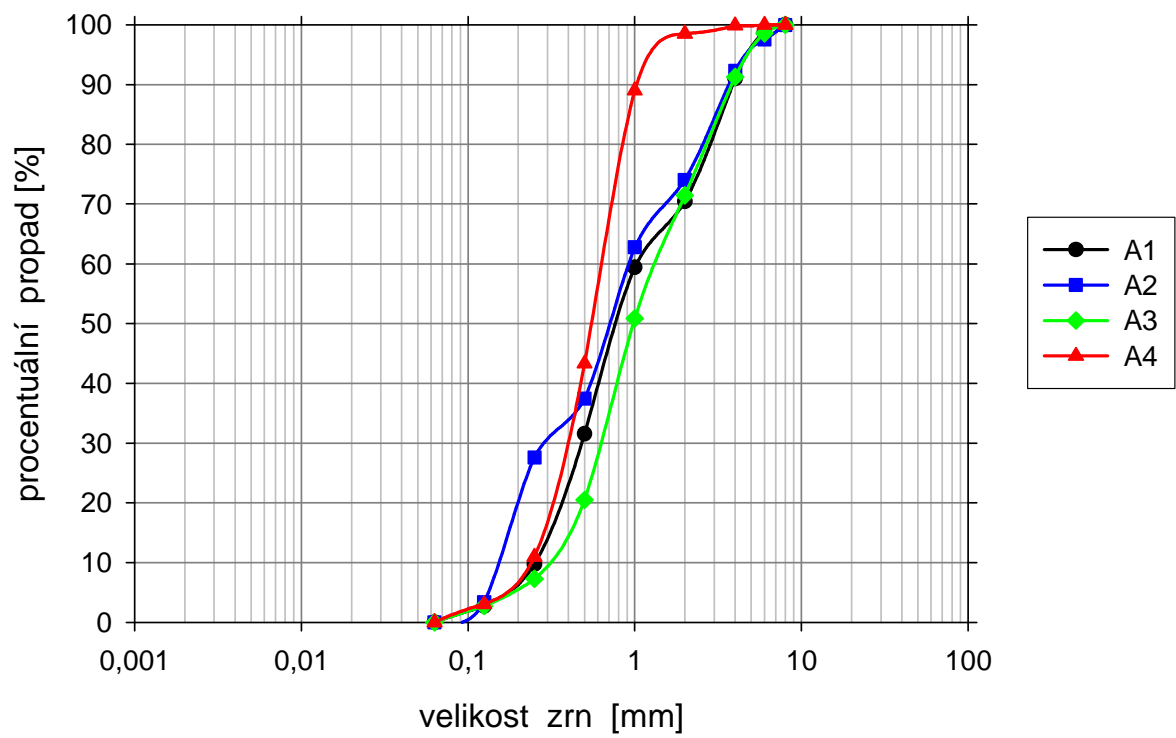


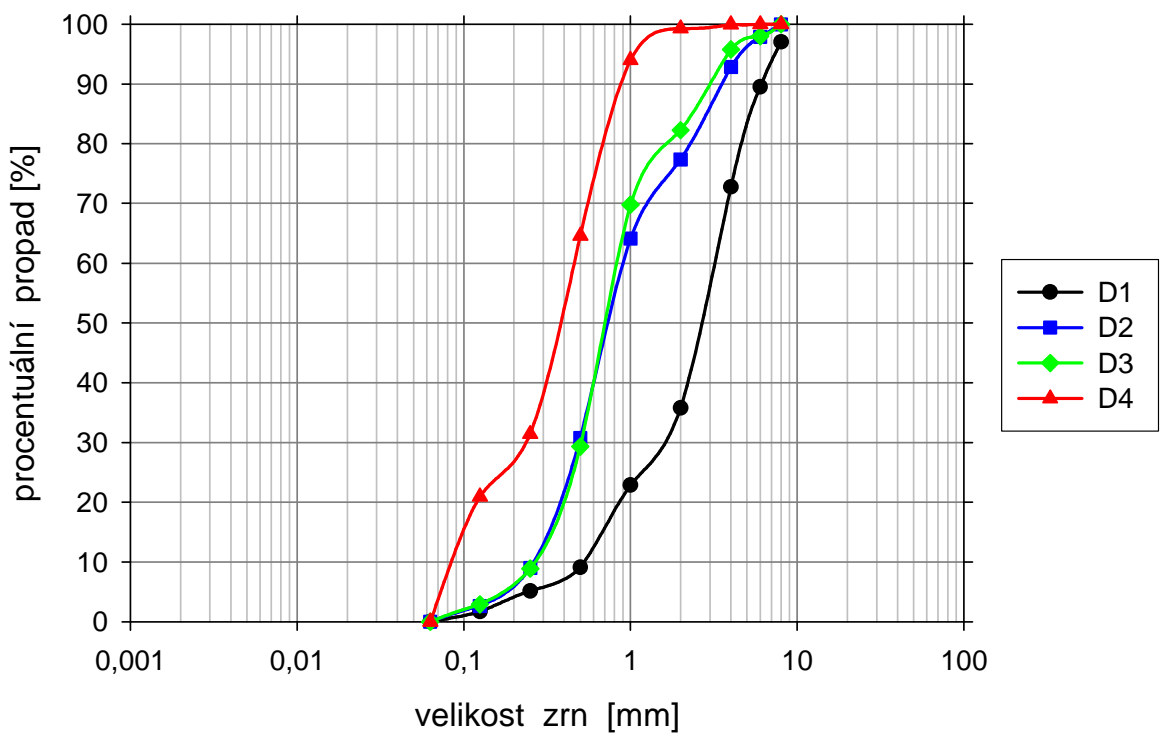
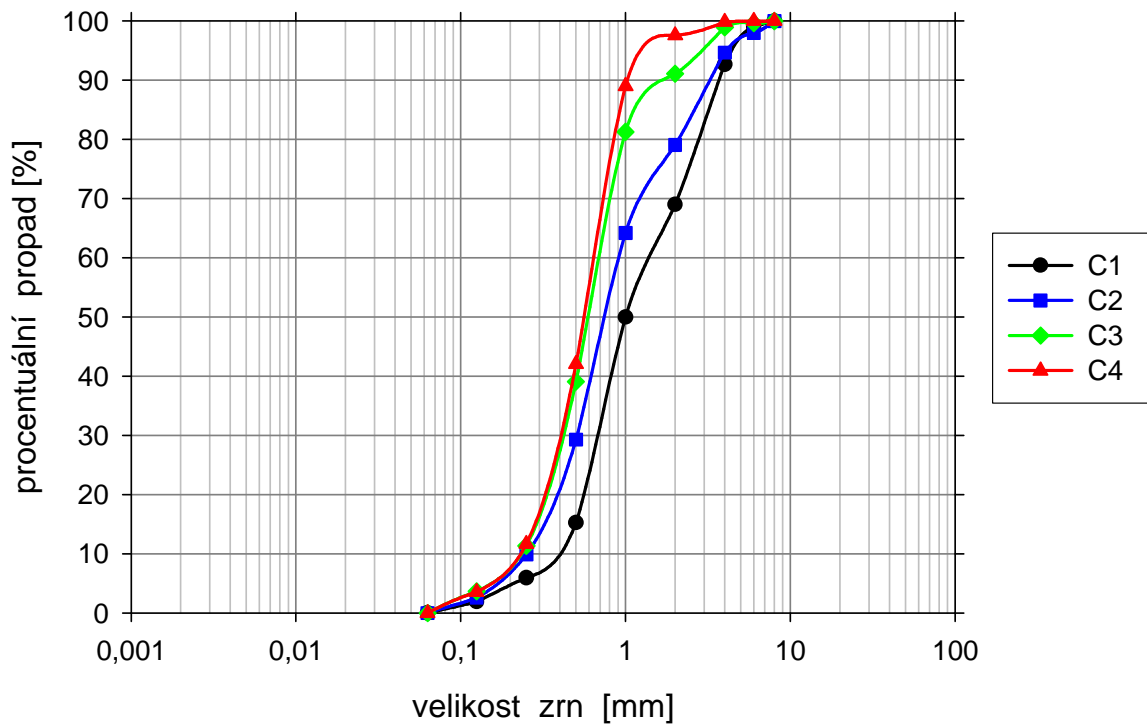


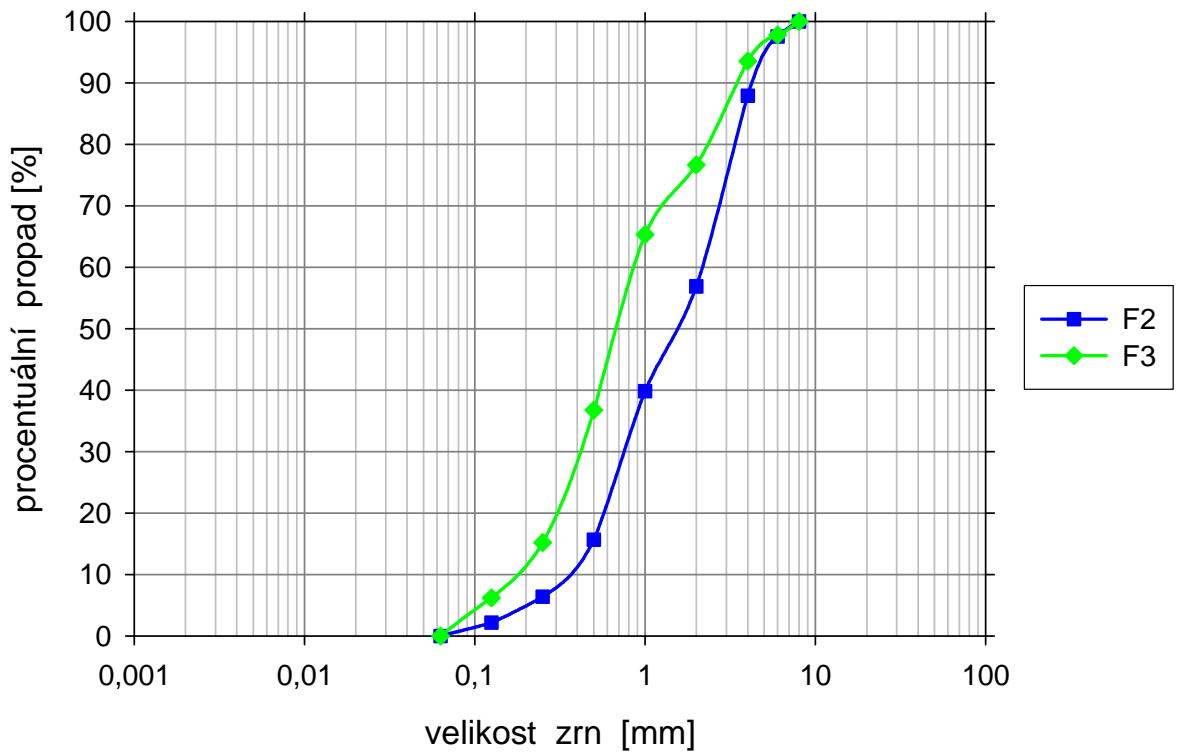
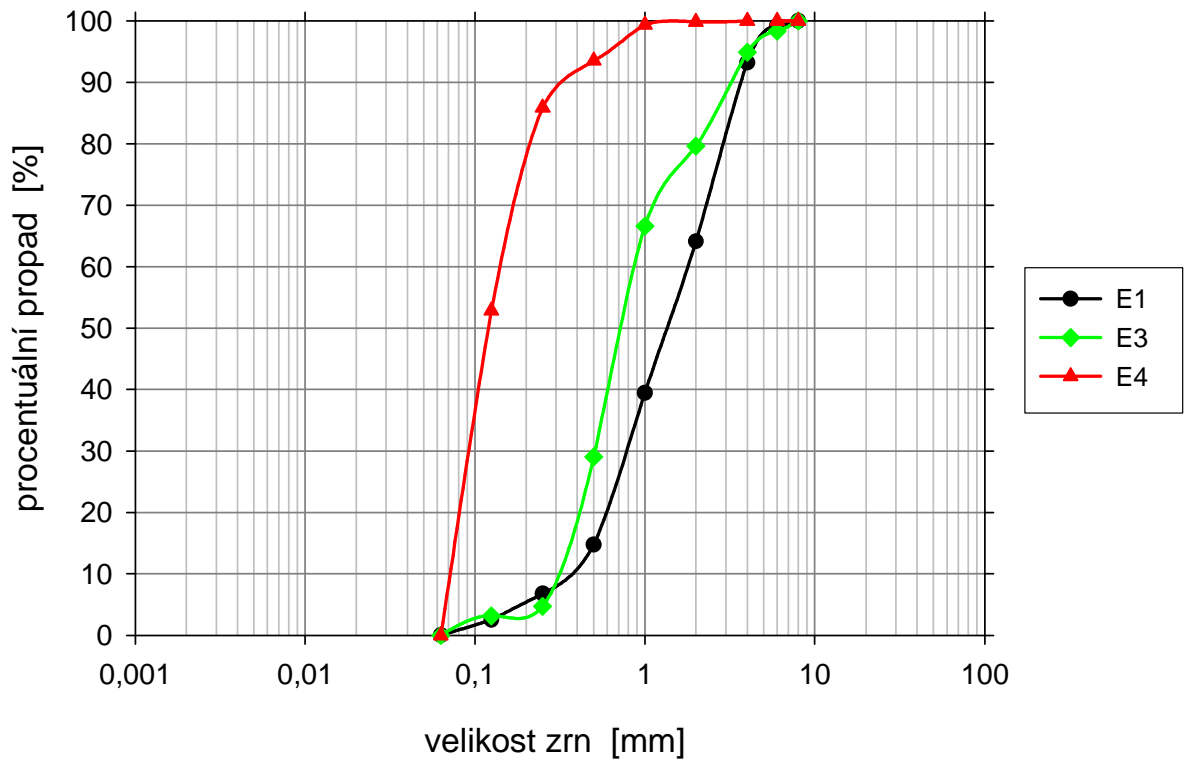


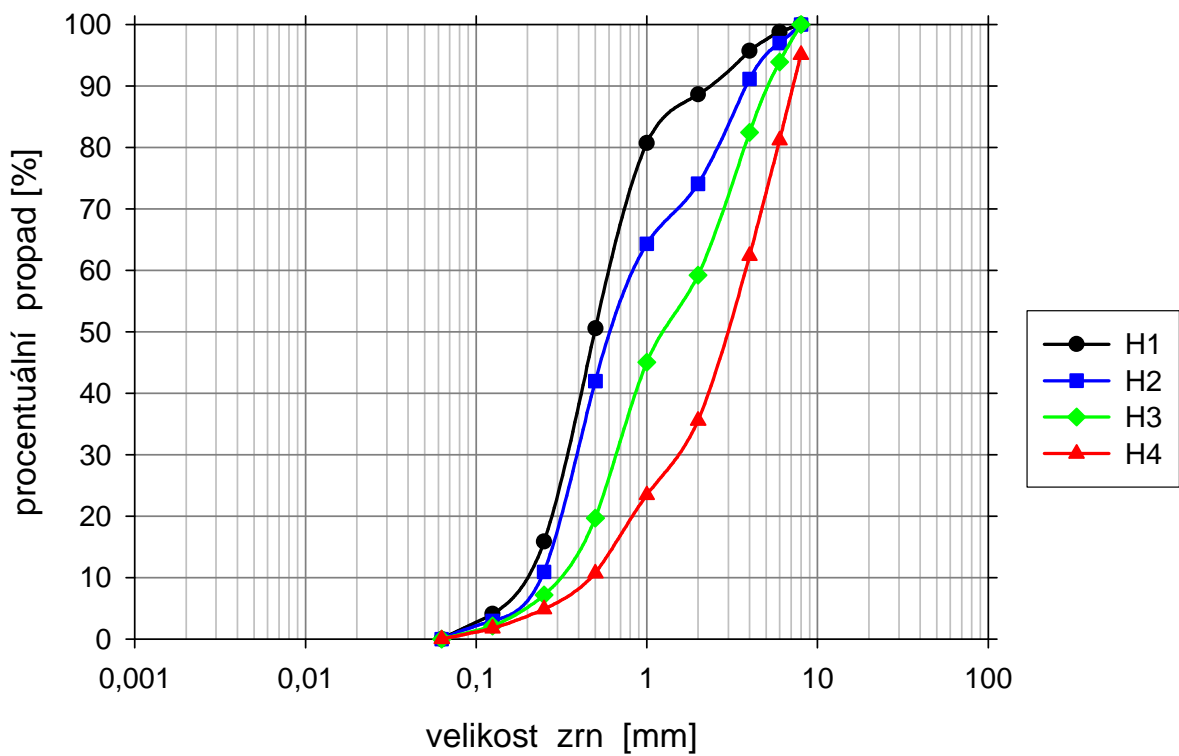
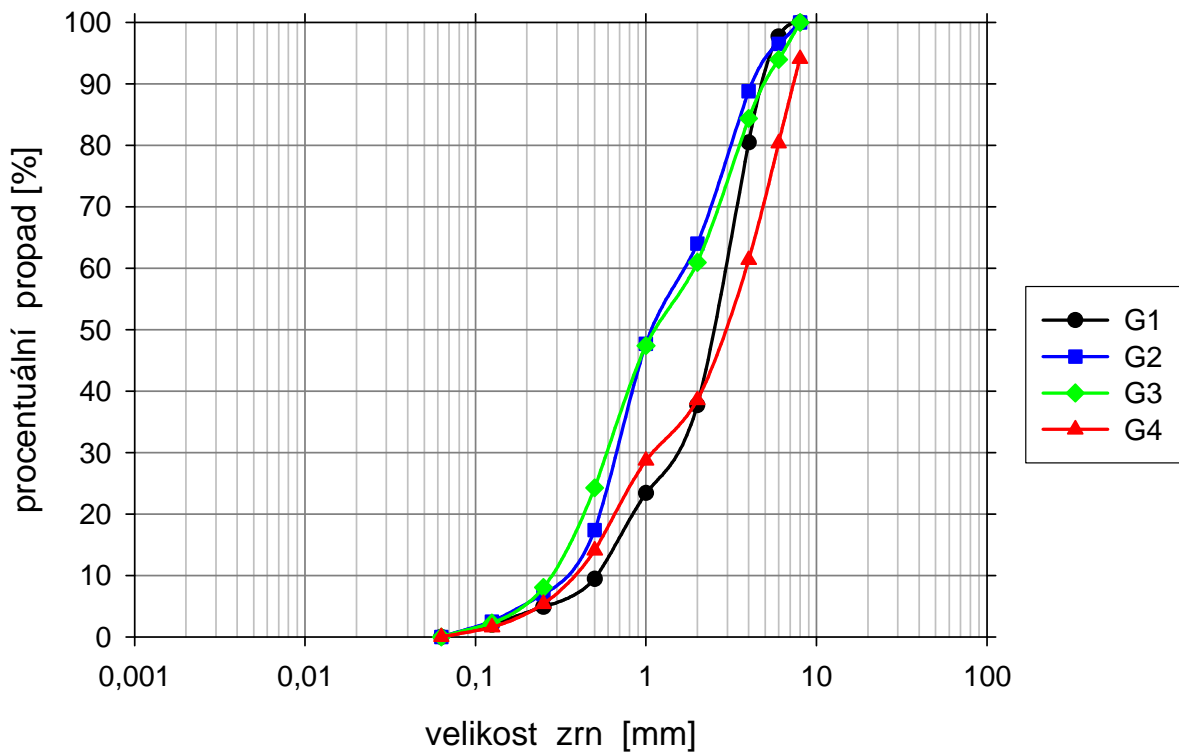


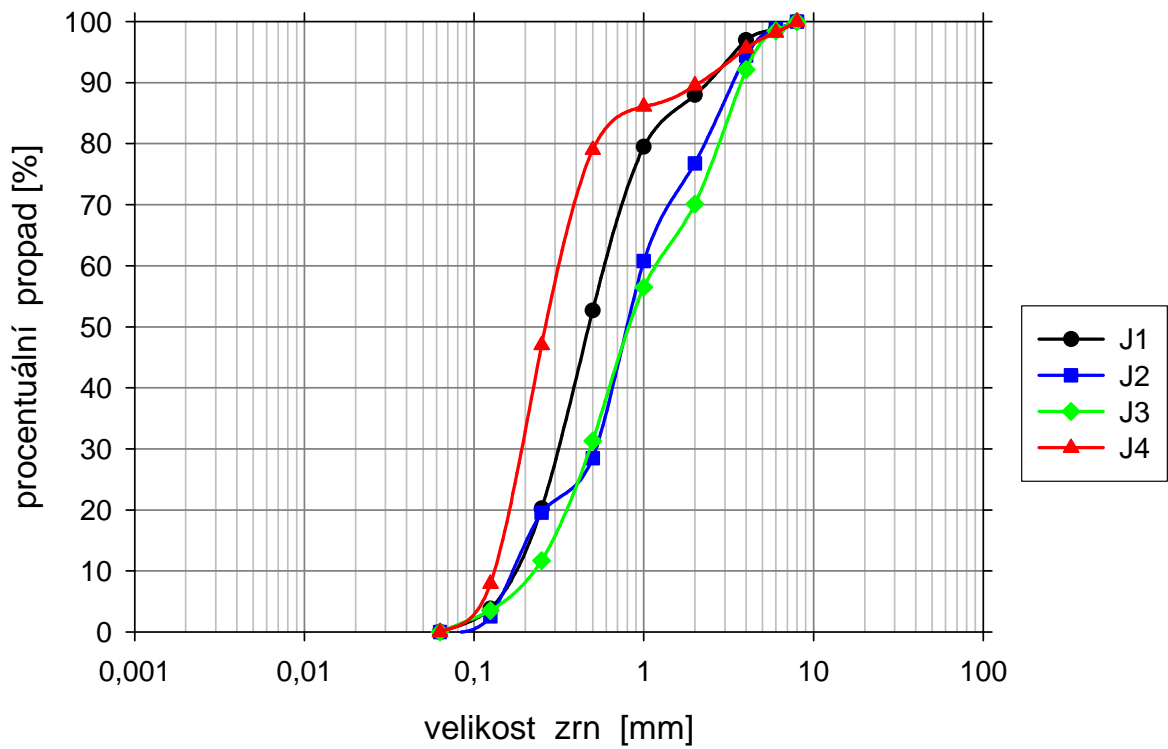
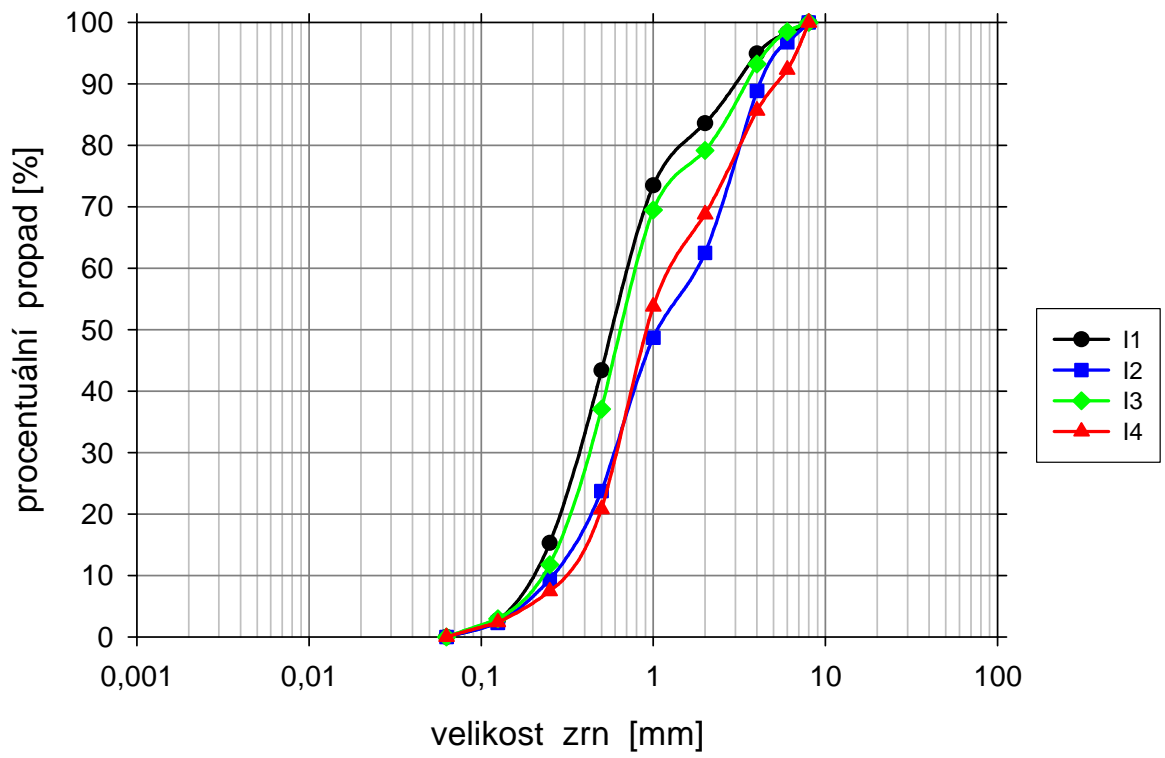
**Příloha č. 3 Křivky zrnitosti upravené zeminy bez frakce 0,063 mm**





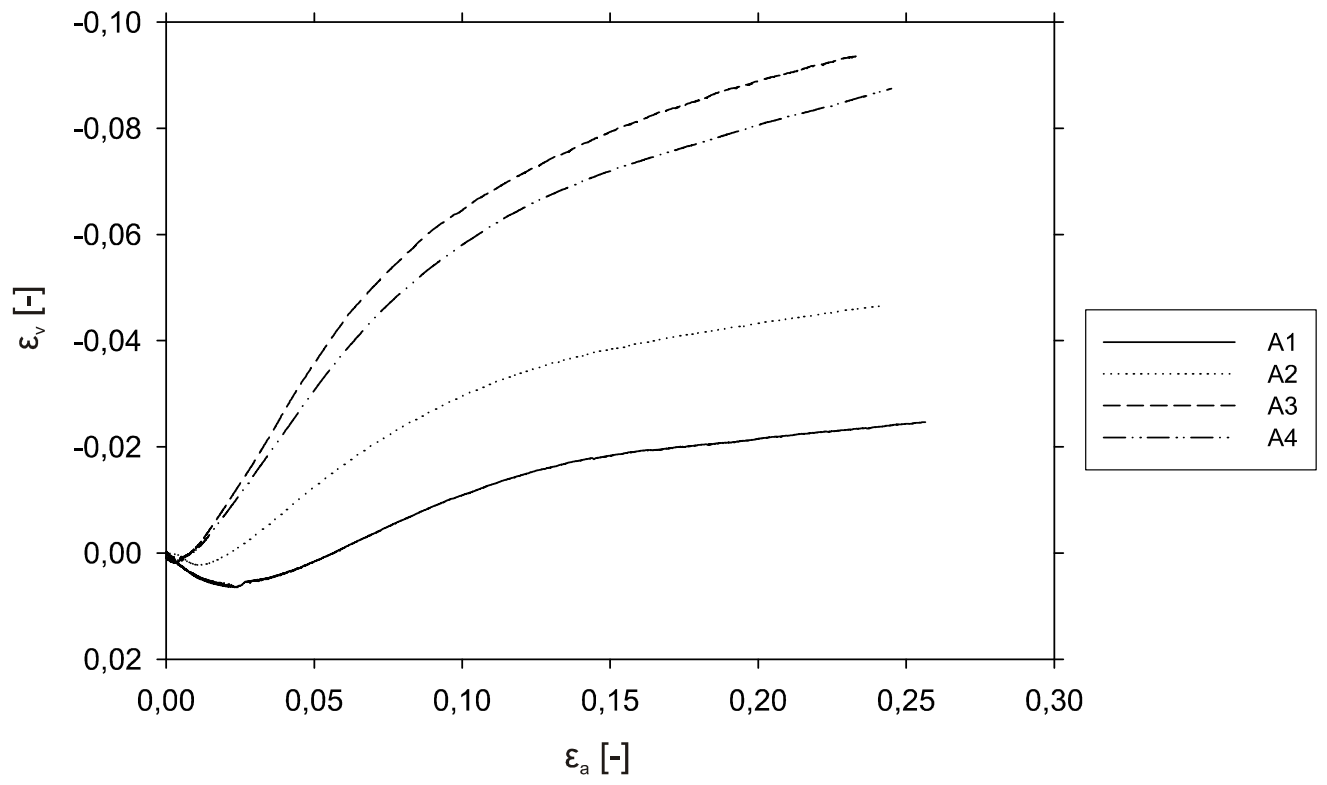
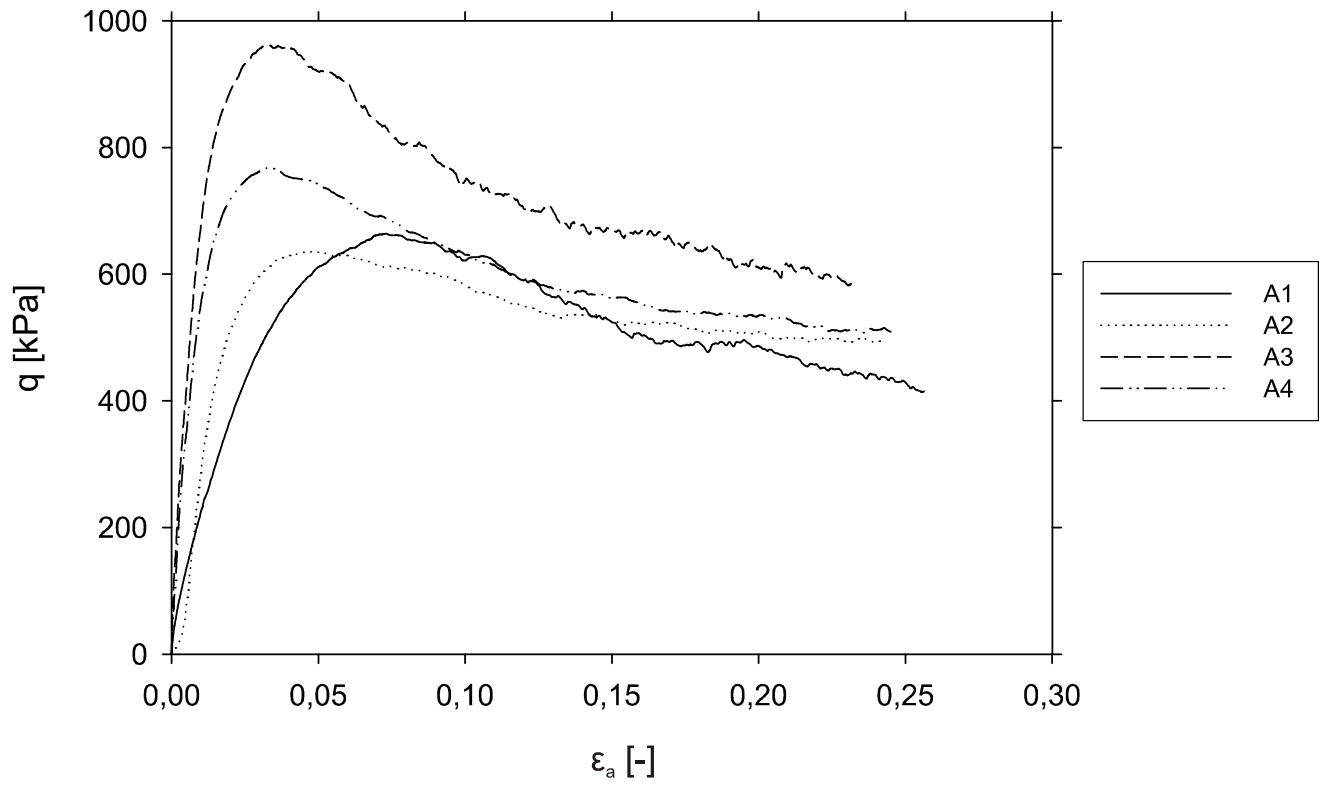


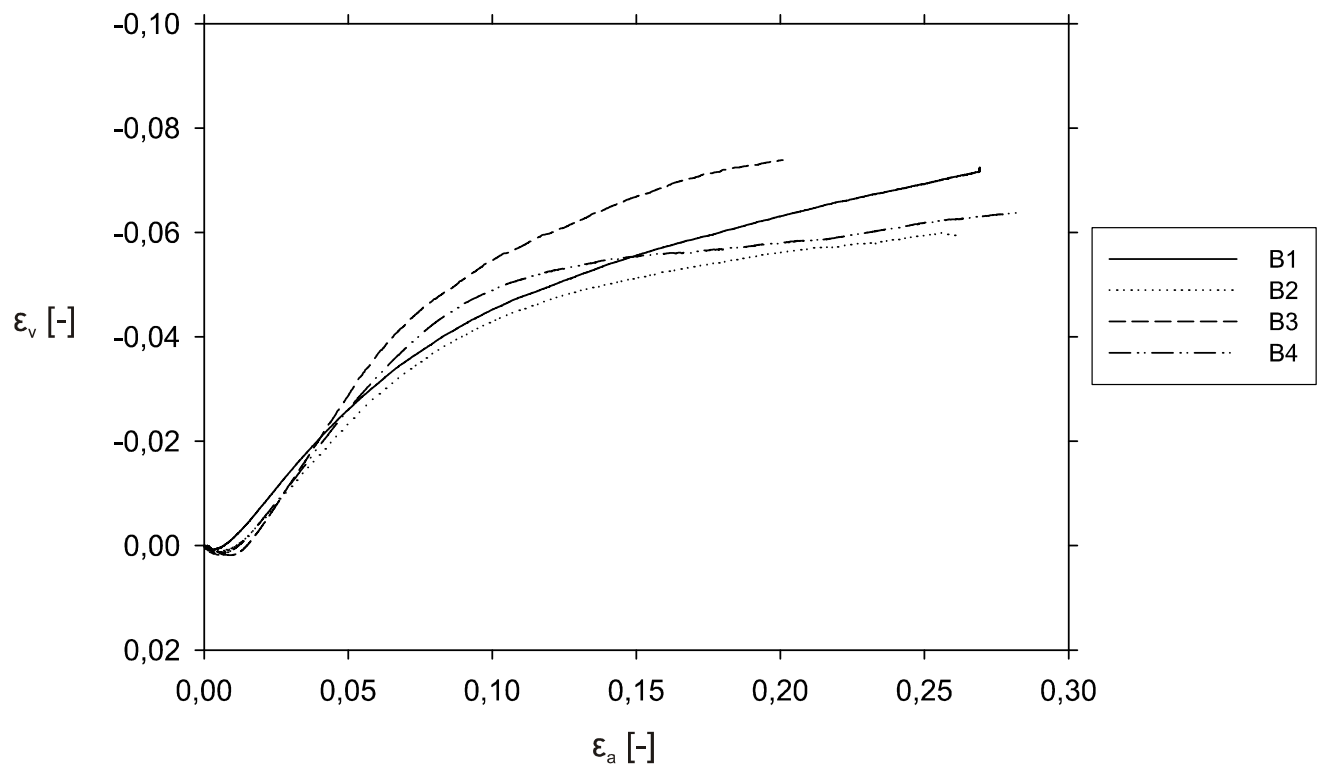
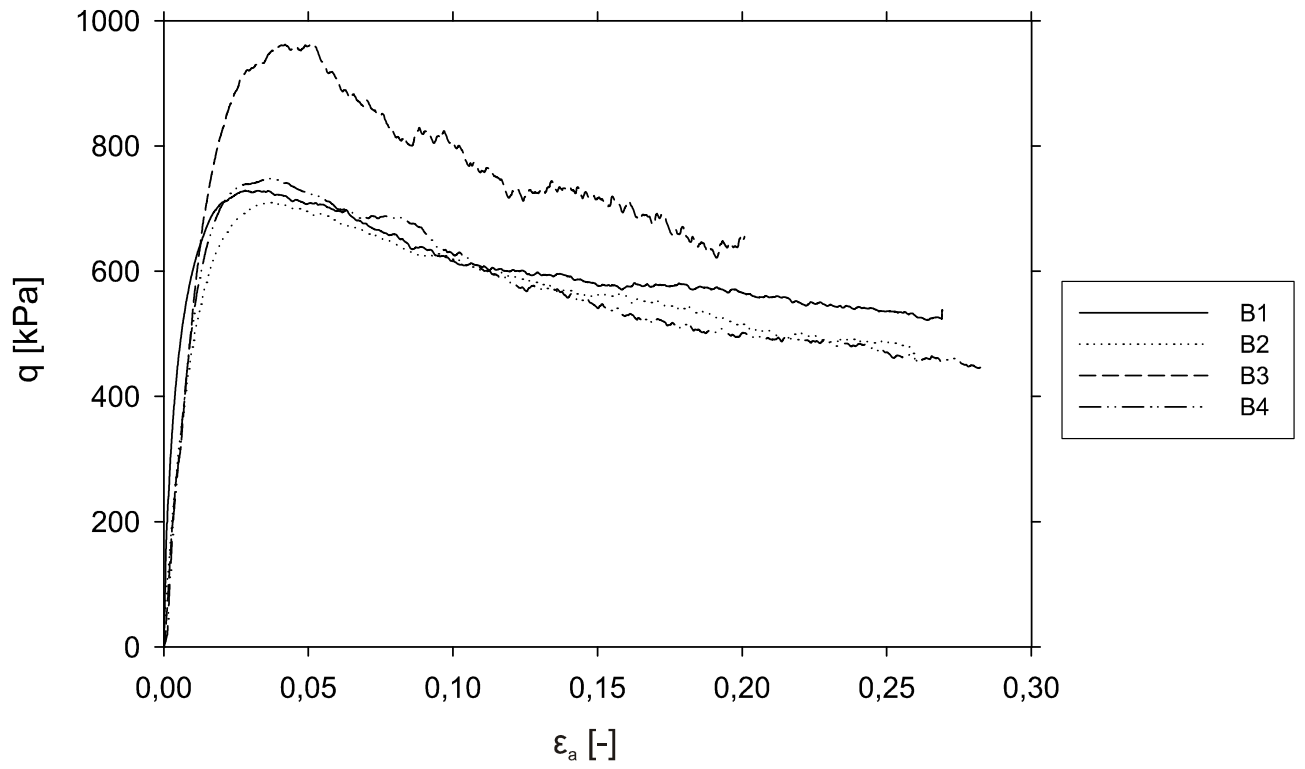


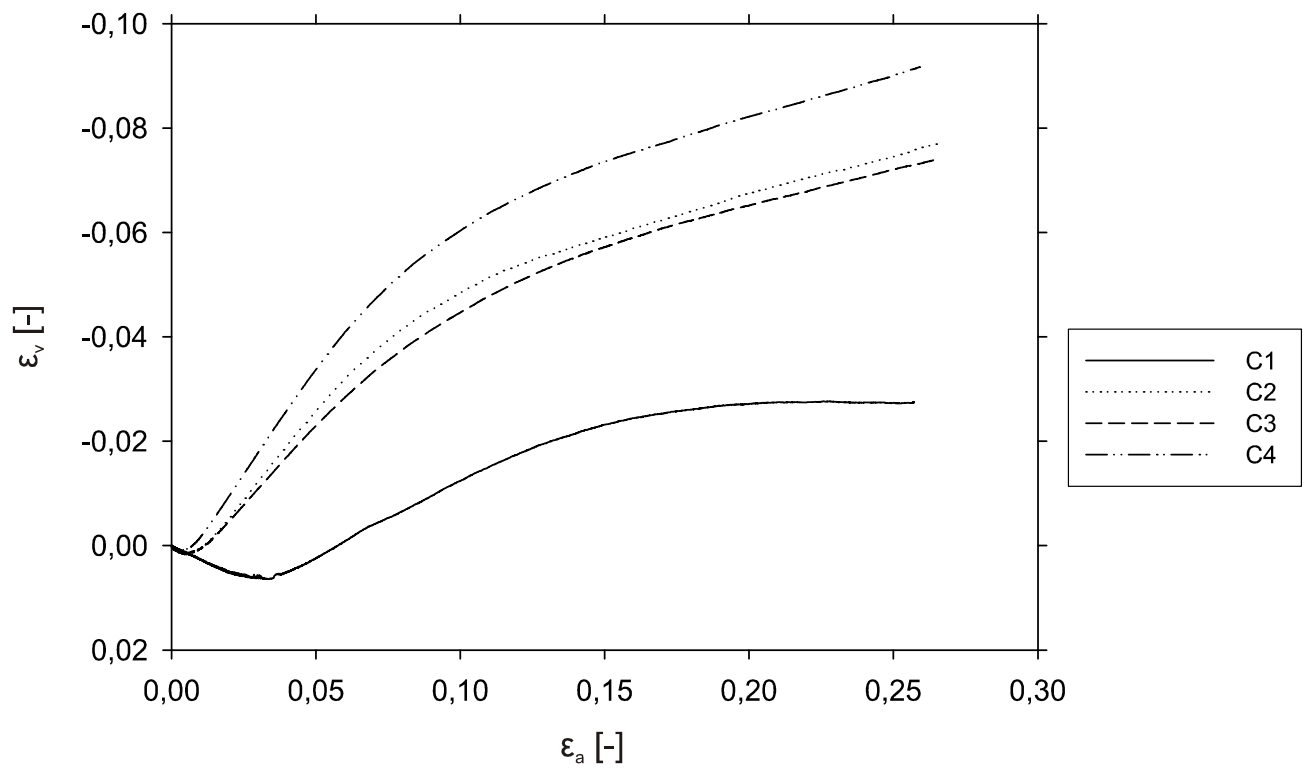
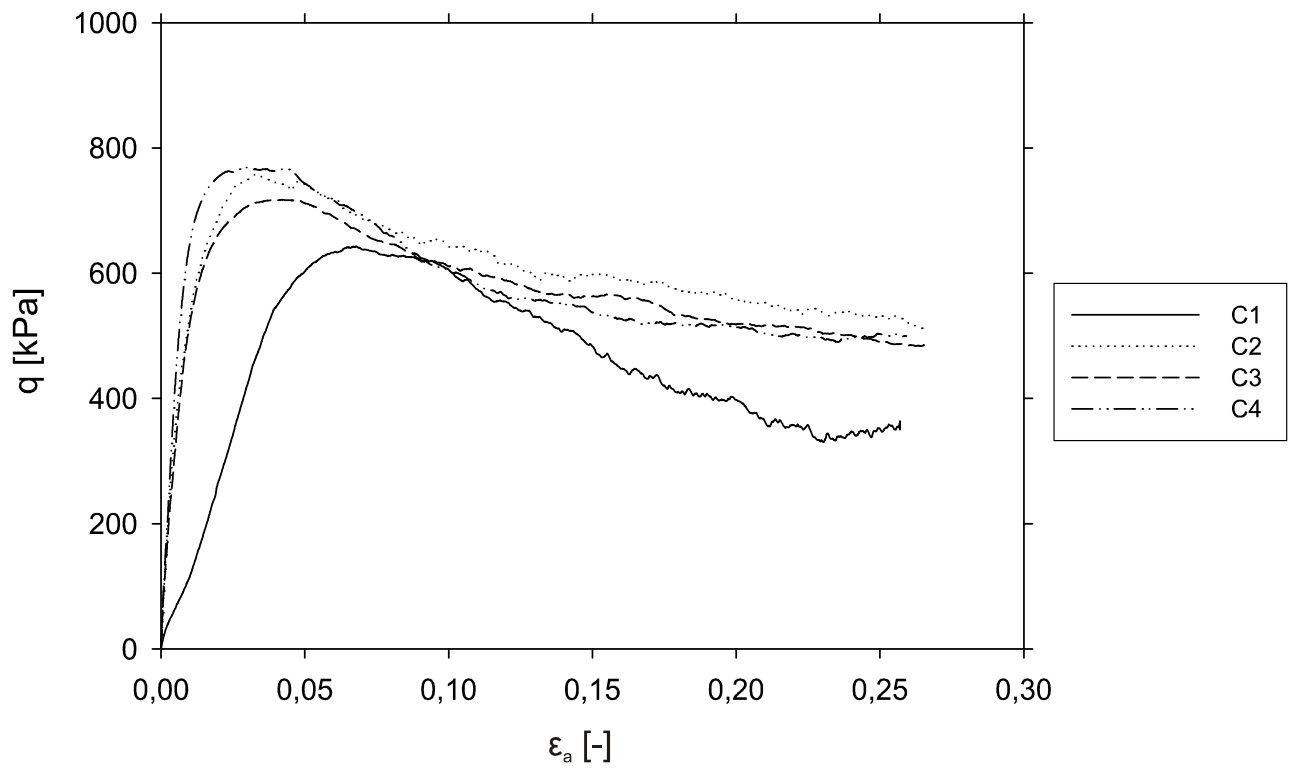


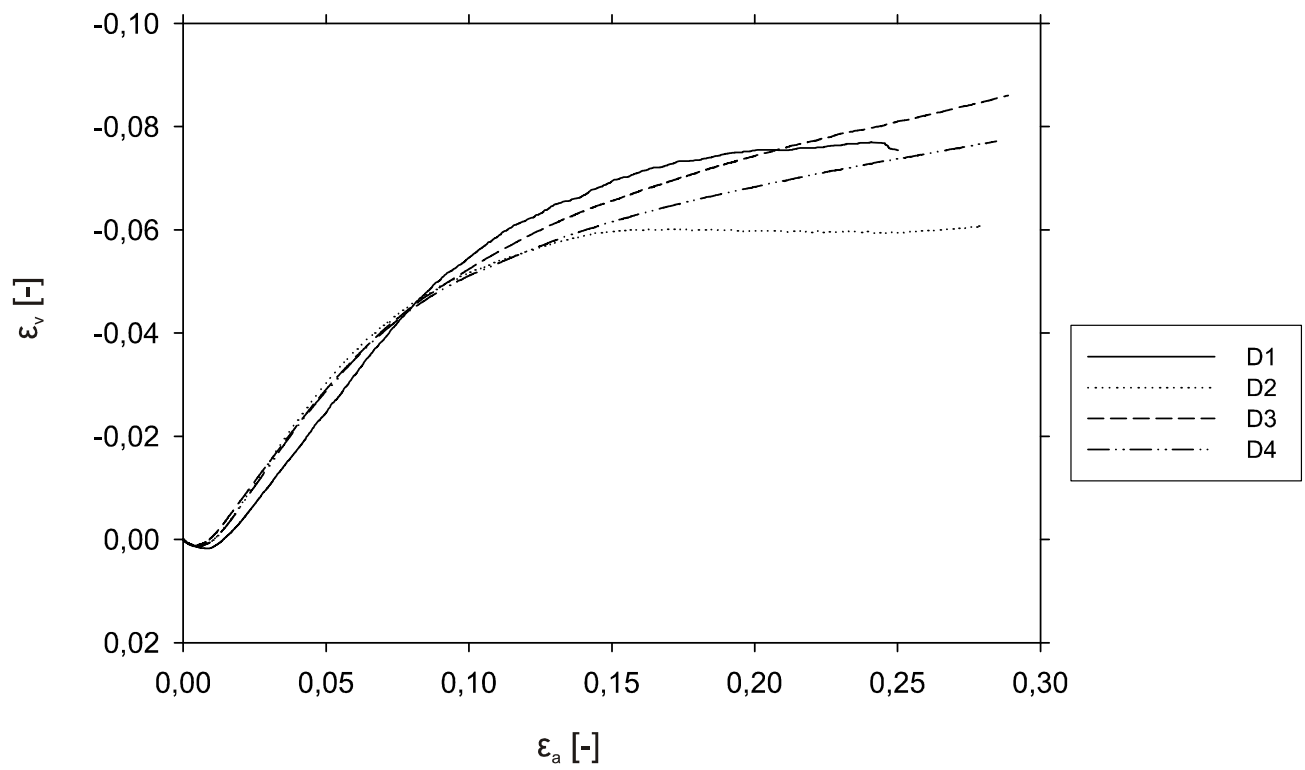
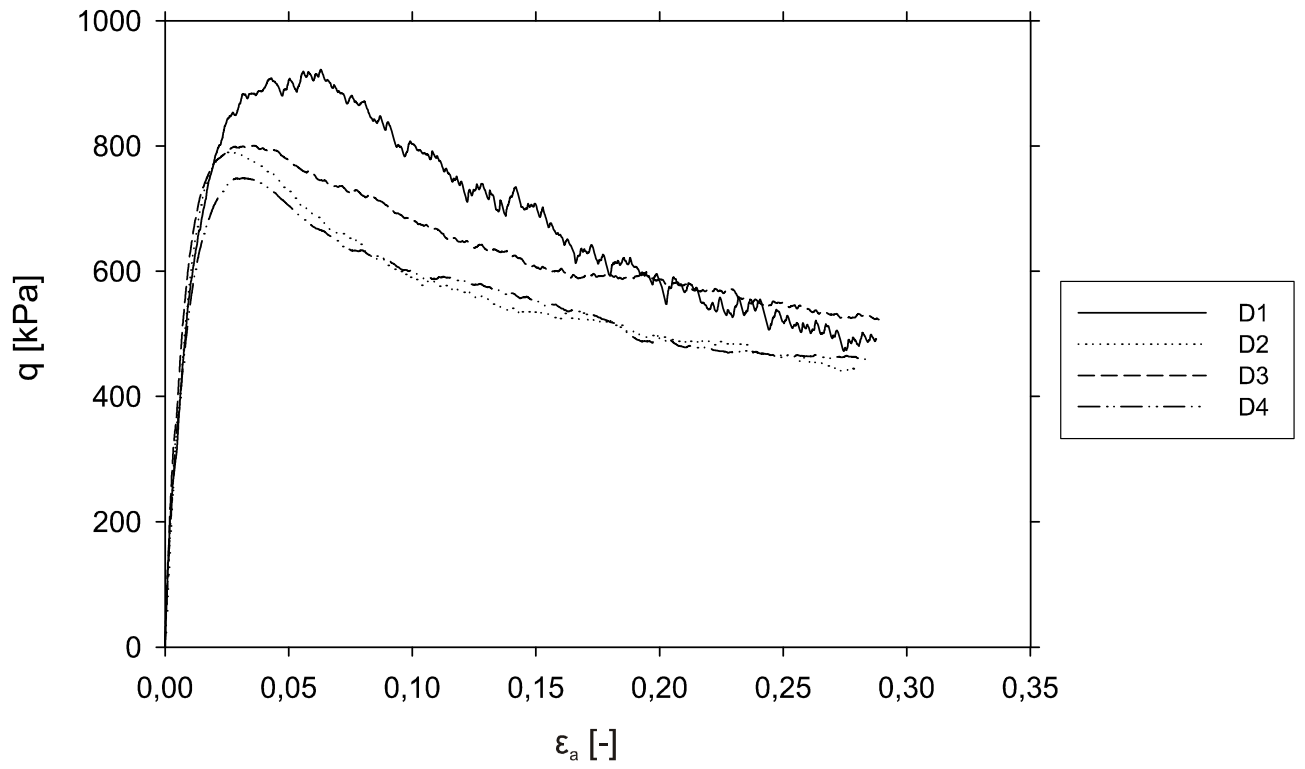


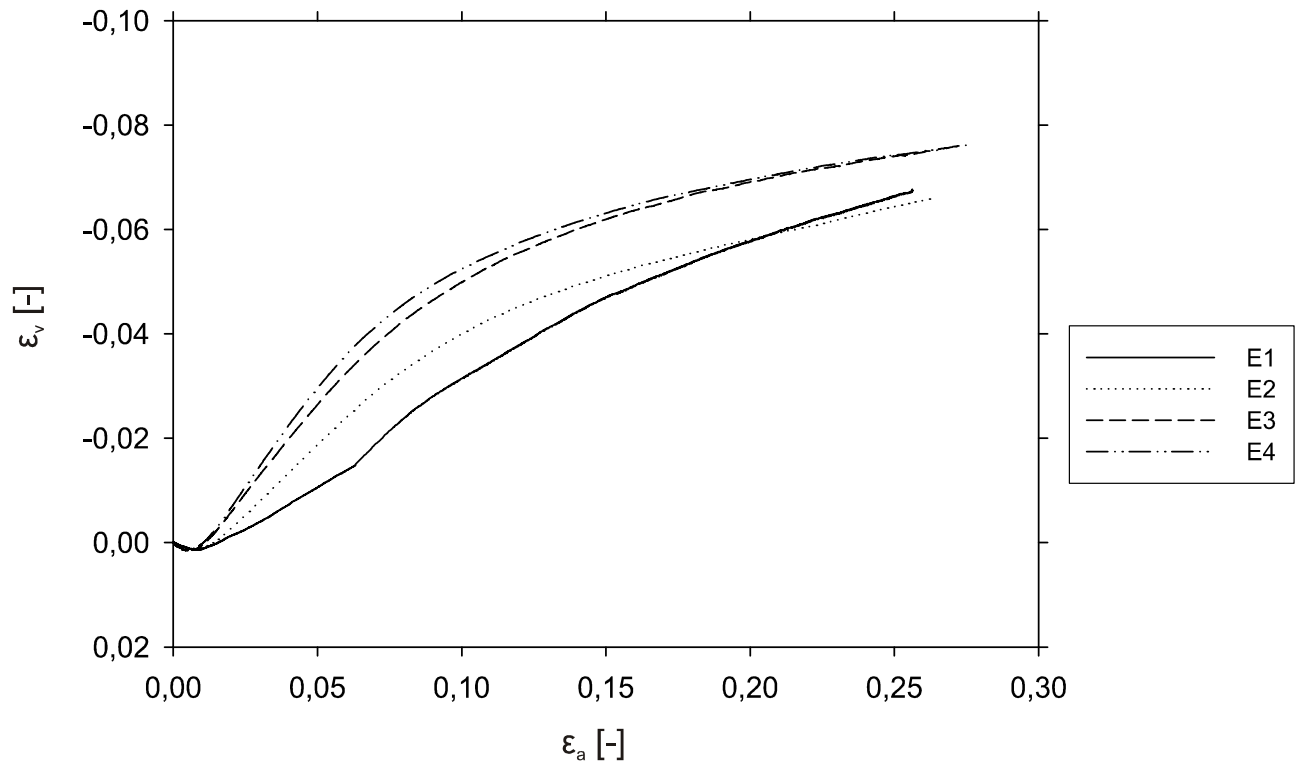
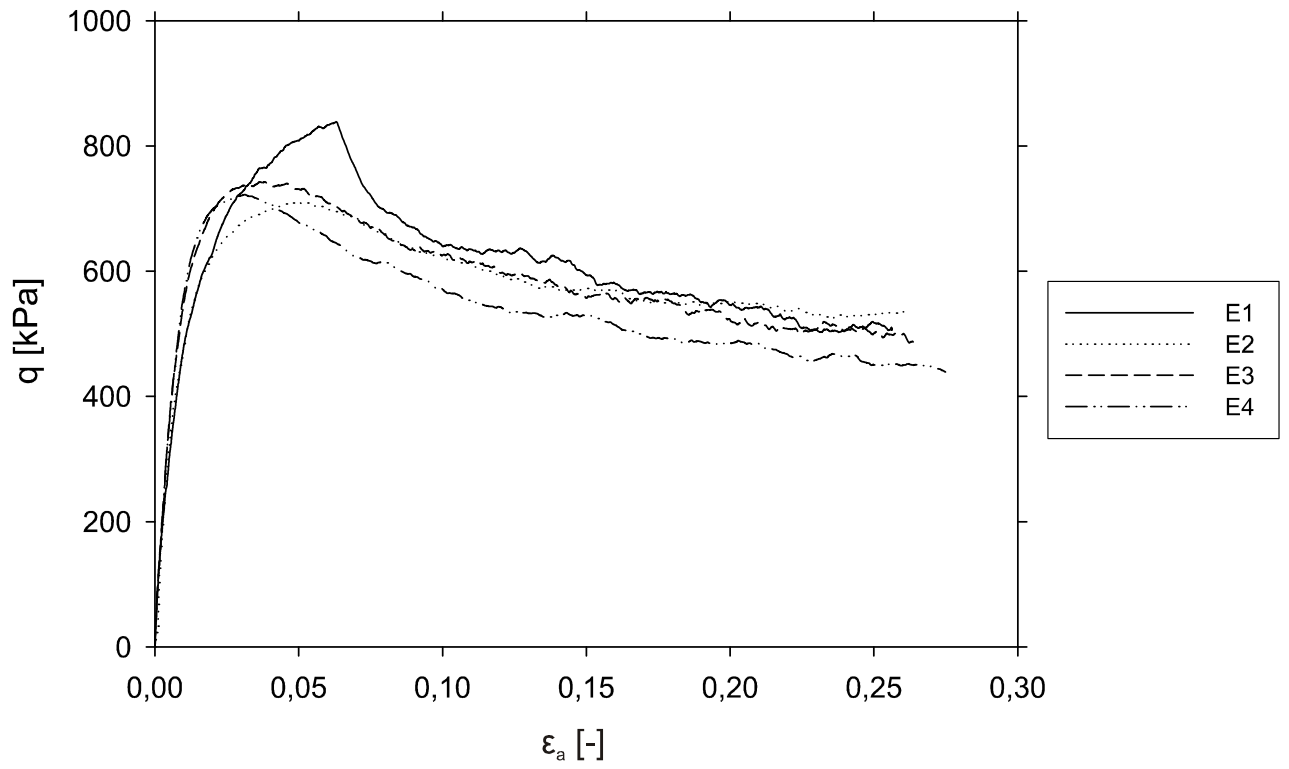
**Příloha č. 4: Grafy závislosti deviátorového napětí ( $q$ ) na osovém přetvoření ( $\varepsilon_a$ ) a grafy závislosti objemového přetvoření ( $\varepsilon_v$ ) na osovém ( $\varepsilon_a$ ) přetvoření, (triaxiální zkouška)**

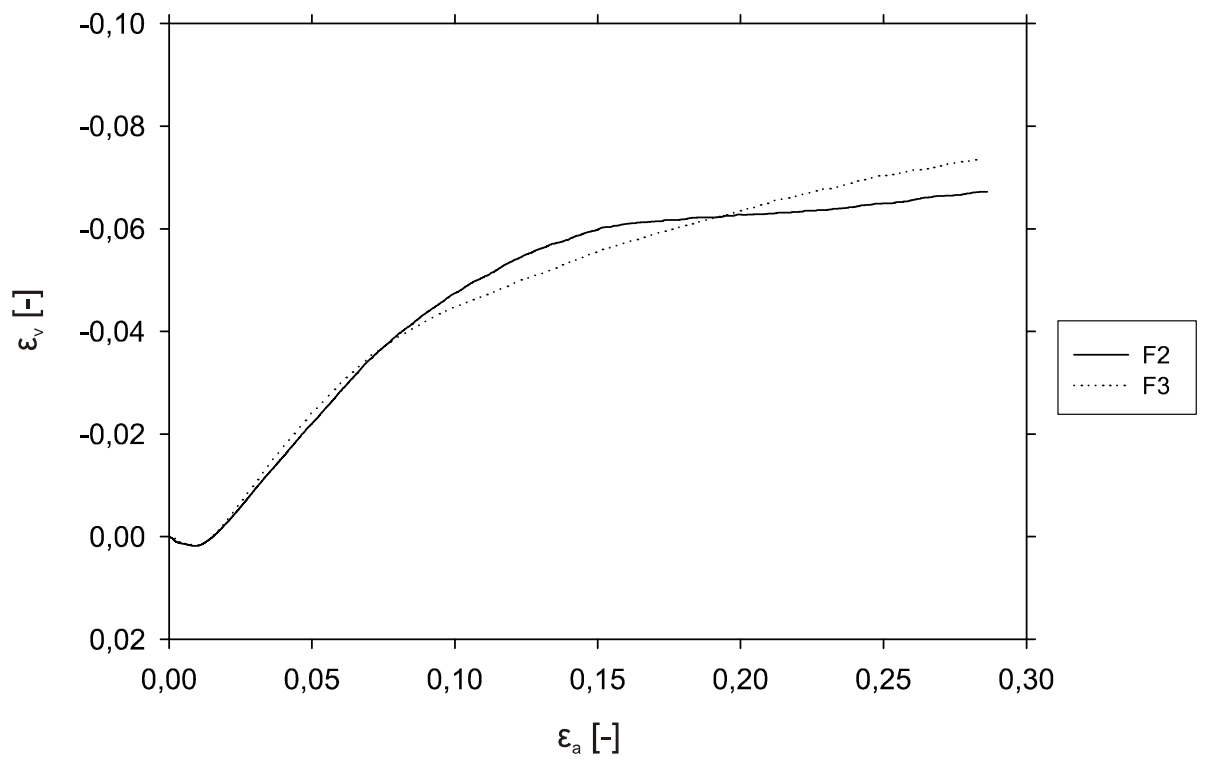
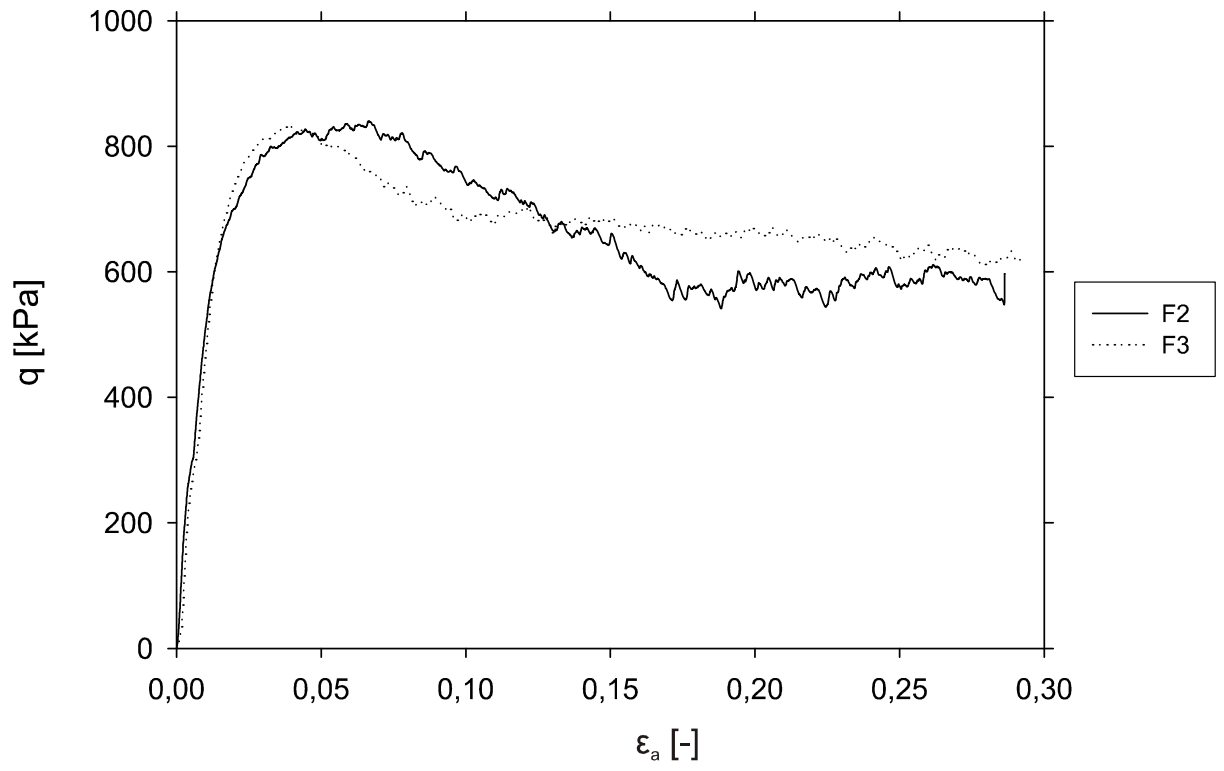


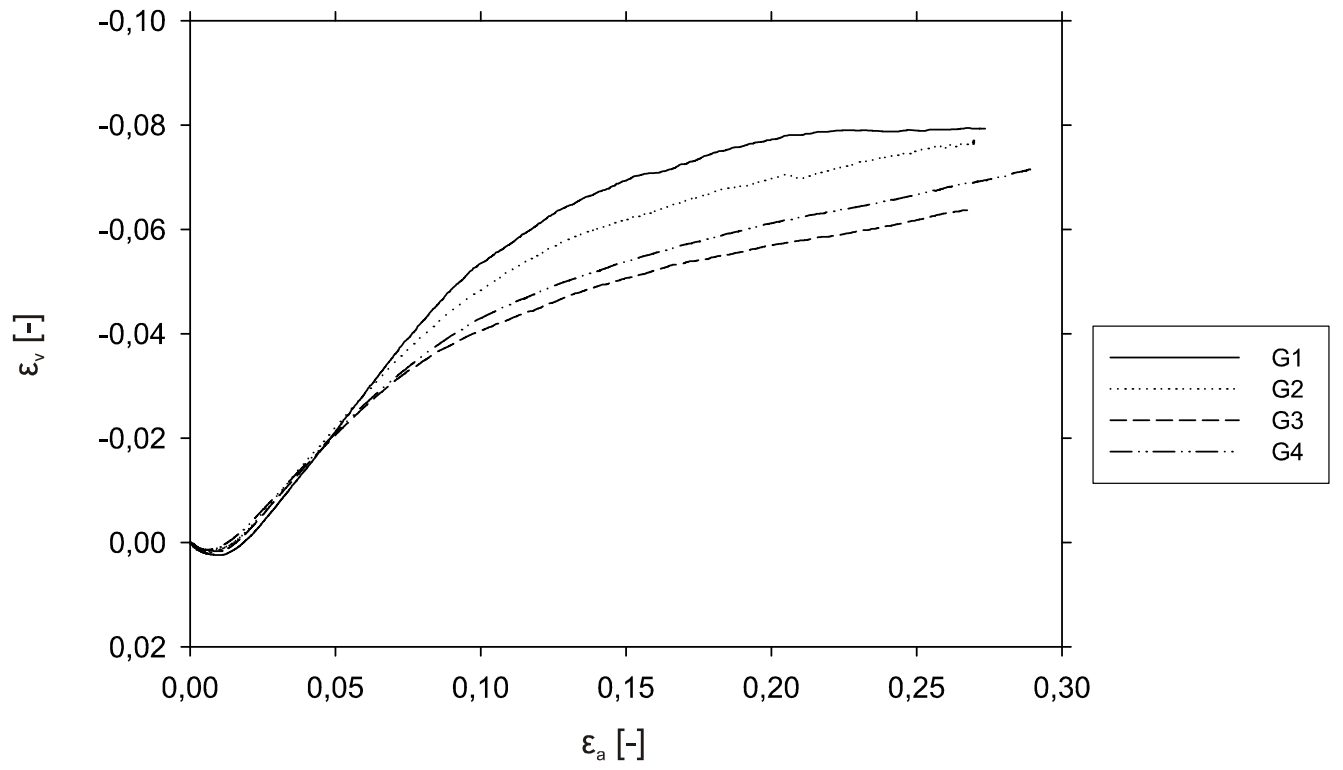
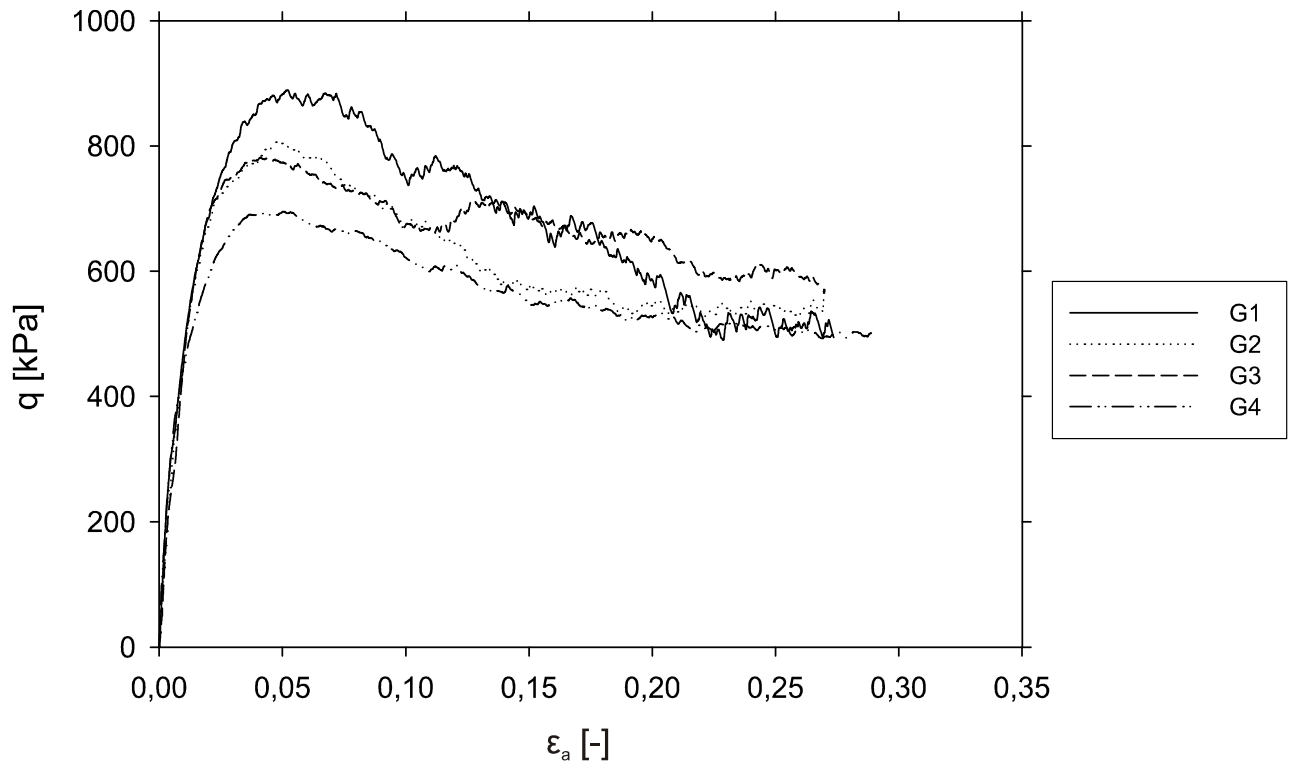




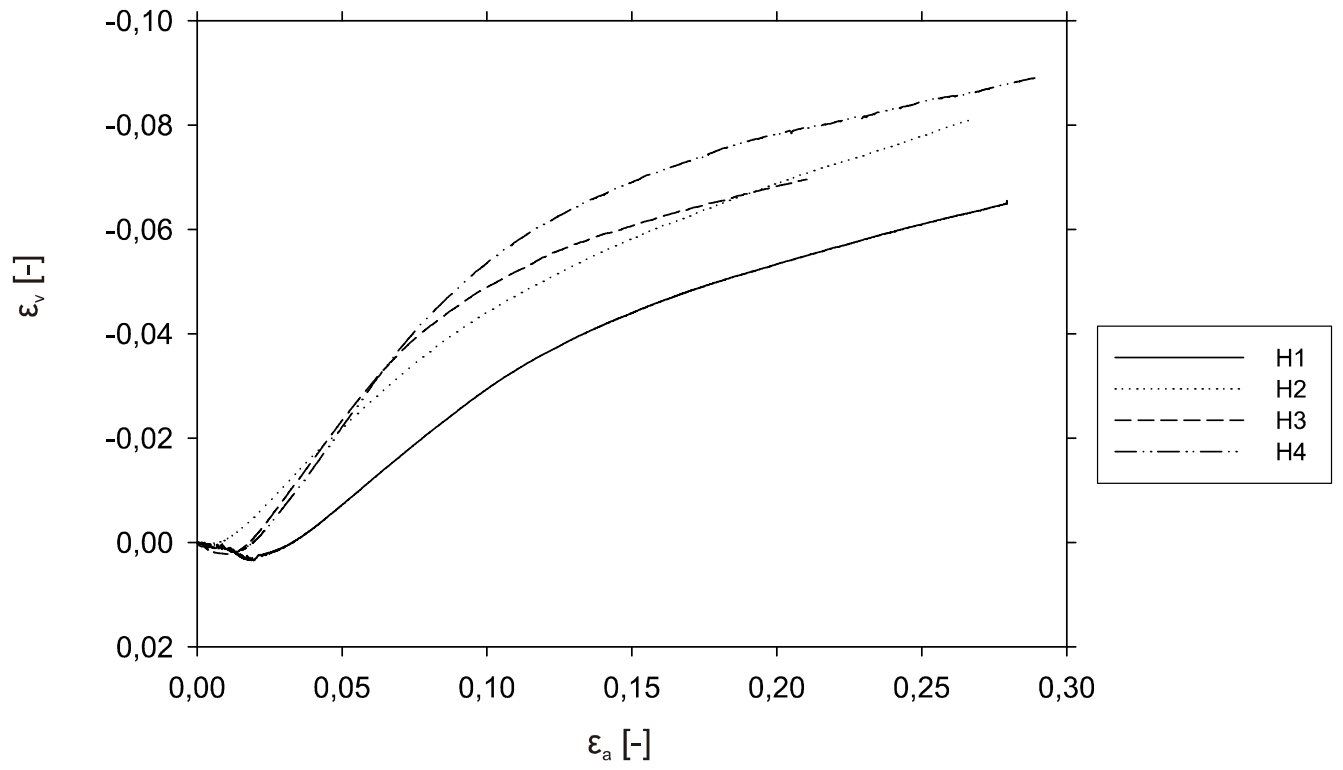
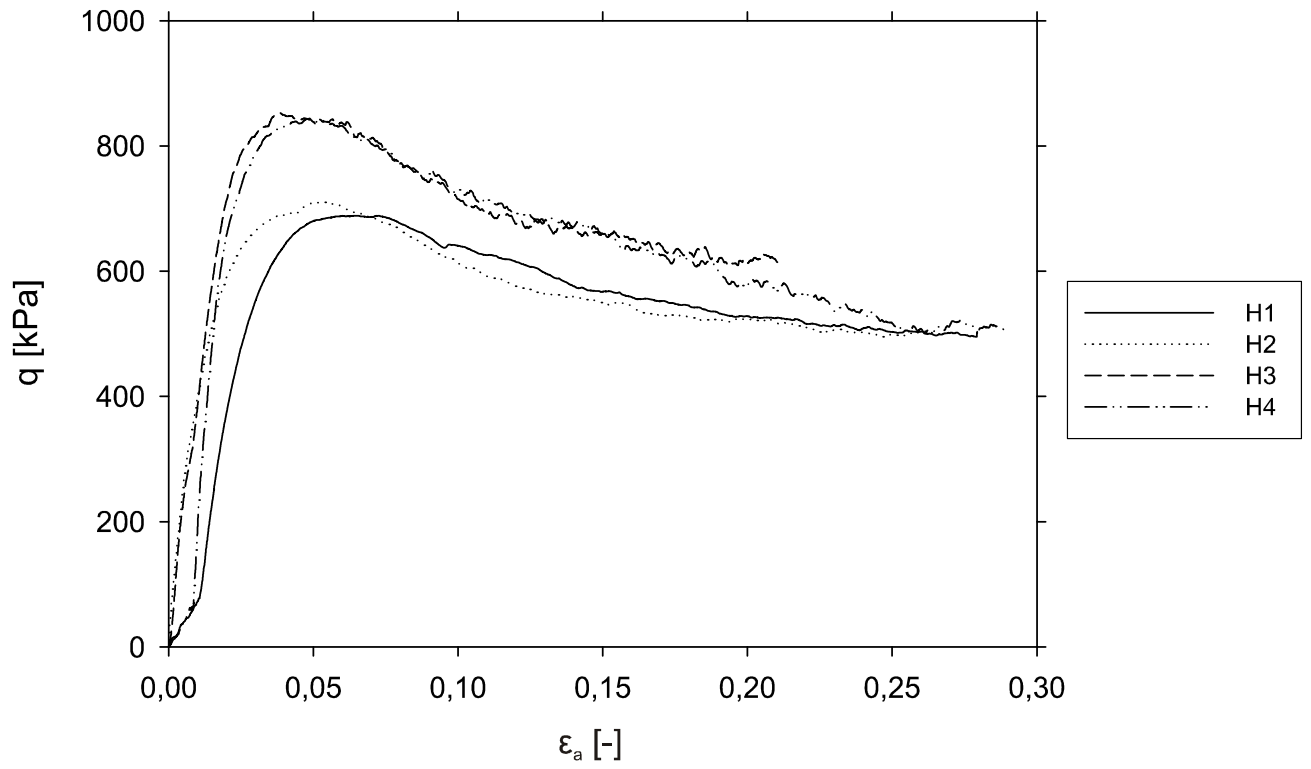


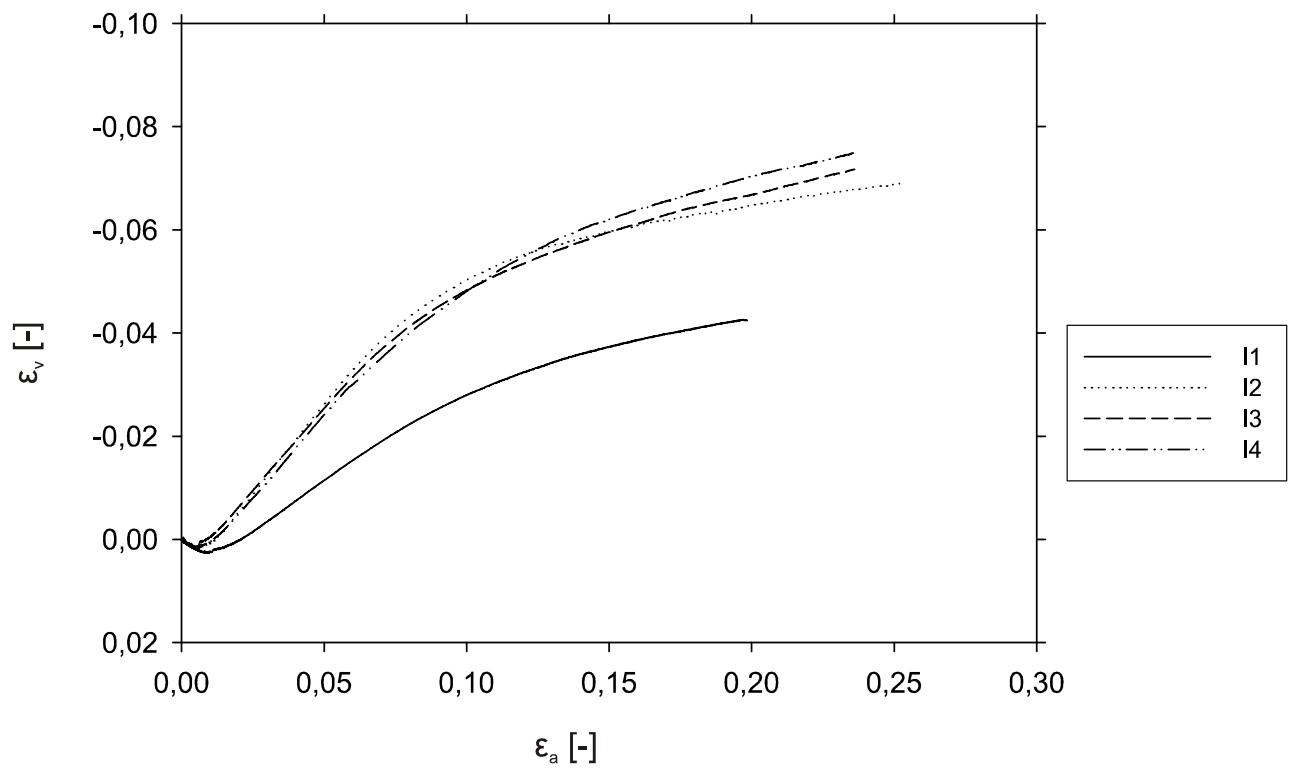
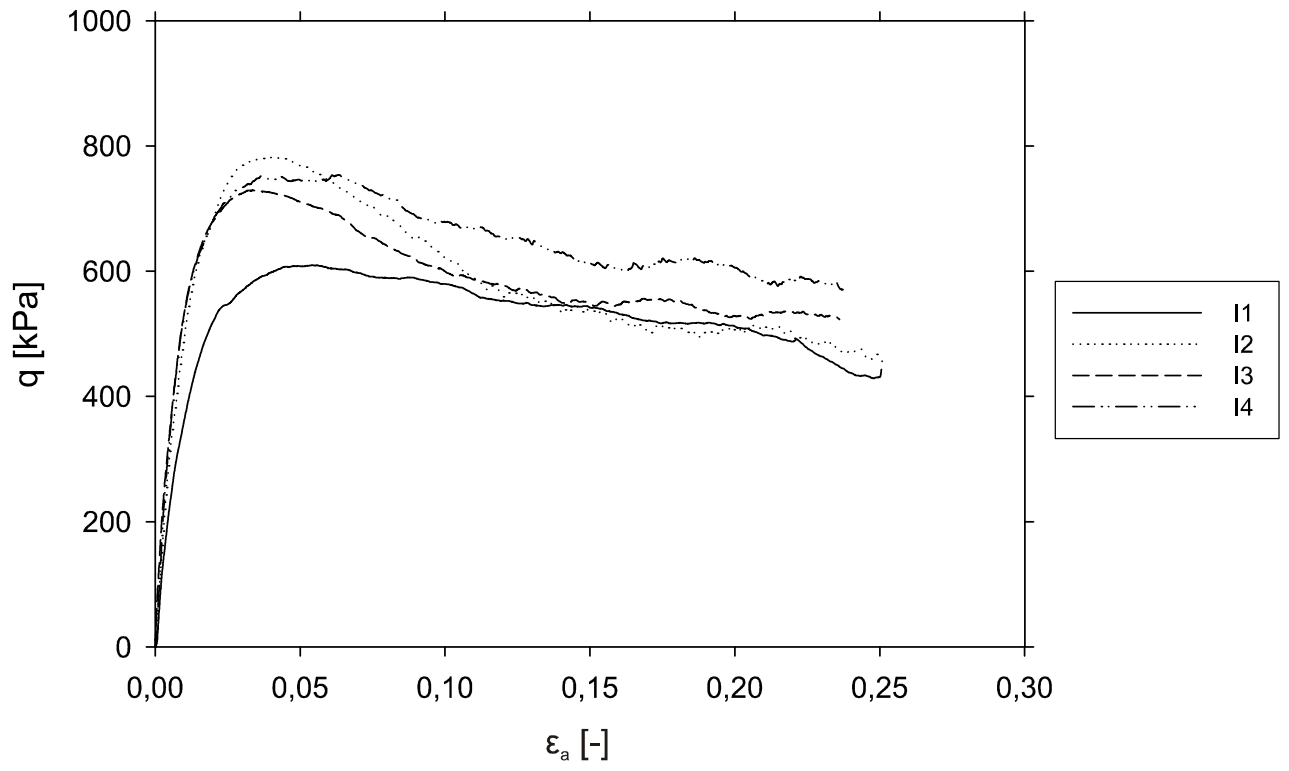


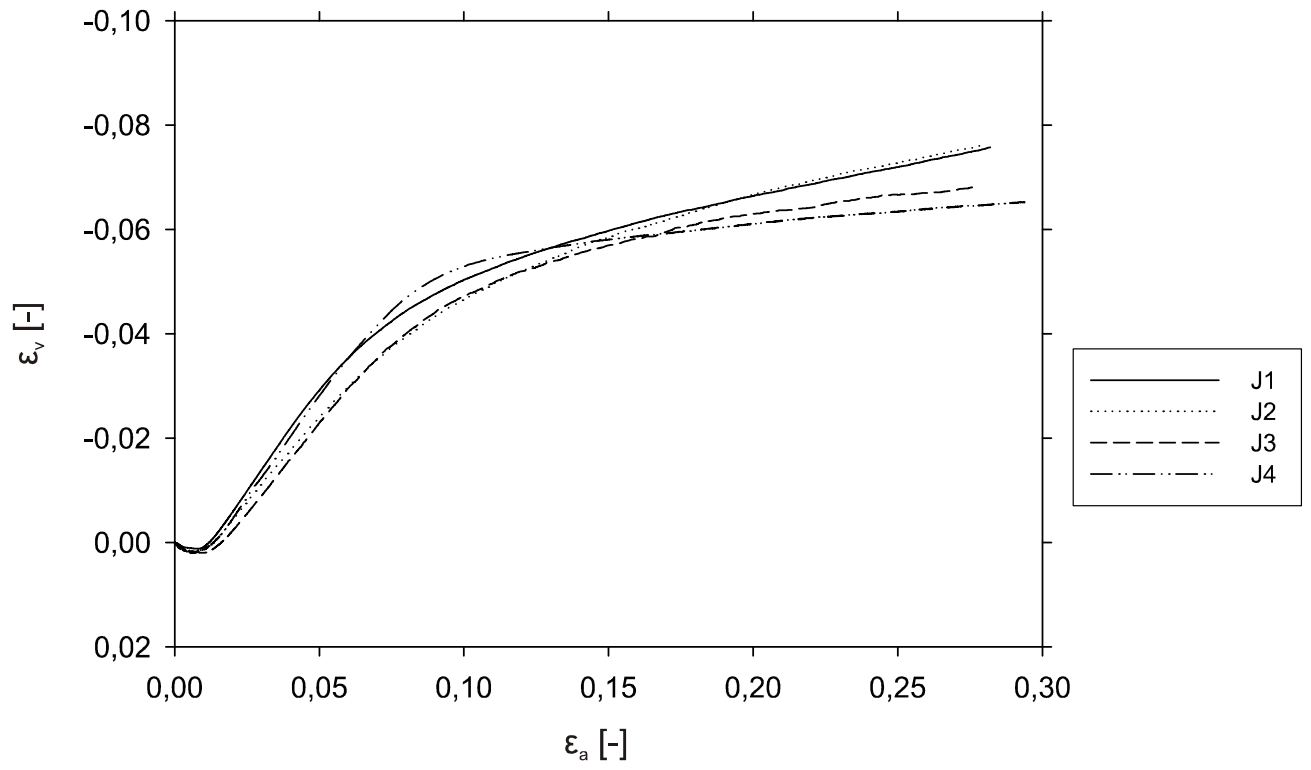
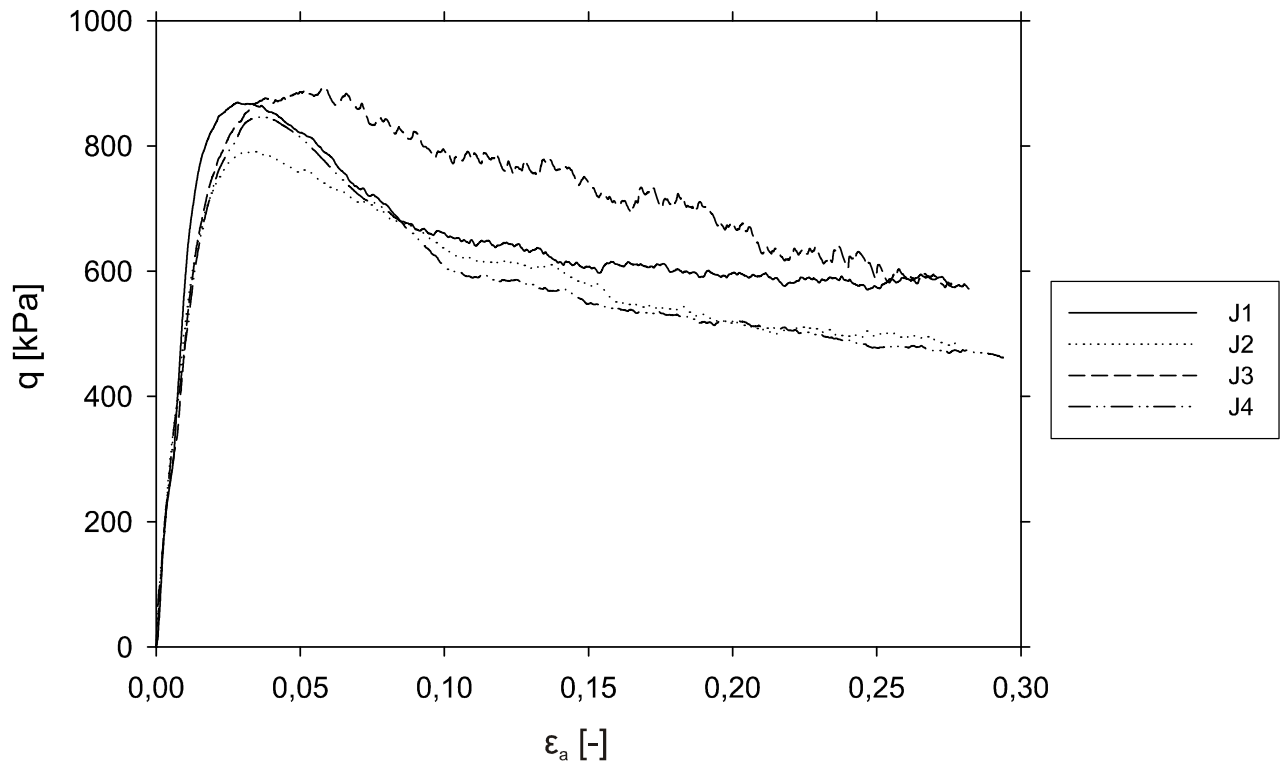












**Příloha č. 5: Grafy závislosti čísla pórovitosti ( $e$ ) na logaritmu napětí ( $\log\sigma_v$ ), (edometrická zkouška)**

