

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů  
Katedra pedologie a ochrany půd

**Vliv kompostu na hydraulické vlastnosti půdy**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Doc. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Autor práce: Gabriela Šedivcová

2010

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv kompostu na hydraulické vlastnosti půd** vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii.

V Praze dne: 12. 4. 2010

Podpis autora práce:

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucí práce Doc. Ing. Radce Kodešové, CSc. za odborné vedení, pomoc a trpělivost při vypracování této práce. Dále Ing. Petru Plívovi, CSc. za cenné rady z oblasti kompostování a vedoucímu Odboru ekologie zemědělských technologických systémů z VÚZT, v. v. i. Doc. Ing. Antonínu Jelínkovi, CSc. za celkovou podporu. V neposlední řadě děkuji všem mým blízkým za poskytnuté zázemí při studiu.

## Souhrn

Předložená práce se zabývá vlivem kompostu na hydraulické vlastnosti půdy. Sledování vlivu kompostu na hydraulické vlastnosti půdy bylo provedeno ve formě nádobového a maloparcelového polního pokusu. V případě nádobového pokusu bylo uměle namícháno 8 variant se zastoupením kompostu 1 až 8 % hm. (A až H). V případě maloparcelového polního pokusu byly do jednotlivých parcel zapraveny dávky kompostu do hloubky cca 15 cm ve 4 variantách: 0 t ha<sup>-1</sup> (K), 124 t ha<sup>-1</sup> (D1), 239 t ha<sup>-1</sup> (D2), 478 t ha<sup>-1</sup> (D3). Hydraulická vodivost v nádobovém pokusu byla měřena pomocí Mini Disk Infiltrometrů ( $K(h=-2)$ ), v maloparcelovém polním pokusu pomocí Mini Disk Infiltrometrů ( $K(h=-2)$ ) a Guelph permeamtru ( $K_s$ ). V obou pokusech bylo ještě na odebraných vzorcích provedeno laboratorní stanovení retenčních čar půdní vlhkosti pomocí Tempských cel. Zdánlivě se retenční schopnost půdy přidavkem kompostu zvýšila, avšak patrný vliv jednotlivých podílů (A až H) nebyl vypořádan. Z výsledků vyplynulo, že aplikovaný kompost neměl na půdní hydraulické vlastnosti statisticky významný vliv. Jen u maloparcelového polního pokusu se při měření Mini Disk Infiltrometrem projevil určitý trend vlivu kompostu na  $K(h=-2)$ . Se zvyšujícím se podílem kompostu se  $K(h=-2)$  snižovala. Pro vytvoření přesvědčivých závěrů by bylo nutné provést další studie. Poznatky a data získané v této práci byly a budou dále využity v projektu NAZV č. QH 81200 „Optimalizace vodního režimu v krajině a zvýšení retenční schopnosti krajiny uplatněním kompostů z biologicky rozložitelných odpadů na orné půdě i trvalých travních porostech“ řešeného ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky, v. i. v Praze.

**Klíčová slova:** kompost, hydraulické vlastnosti půdy, nádobový pokus, maloparcelový polní pokus, hydraulická vodivost, infiltrometr, retenční čára půdní vlhkosti.

## Summary

Aim of this study was evaluation of compost impact on soil hydraulic properties. Compost impact was tested using cylinder and small - pot field experiments. In the cylinder experiment was prepared 8 treatments, each treatment includes compost from 1 to 8 % by weight (A – H). In the small - pot field experiment compost was defrayed into the depth 15 cm approximately in 4 treatments: 0 t ha<sup>-1</sup> (K), 124 t ha<sup>-1</sup> (D1), 239 t ha<sup>-1</sup> (D2), 478 t ha<sup>-1</sup> (D3). The hydraulic conductivity in cylinder experiment was measured using Mini Disc Infiltrometer ( $K(h=-2)$ ), in small – pot field experiment using Mini Disc Infiltrometer ( $K(h=-2)$ ) and Guelph Permeameter ( $K_s$ ). In both experiments soil water retention curves was observed. Results revealed that added compost had no statistically significant impact on soil hydraulic properties. Only in case of small – pot field experiments partial compost impact on  $K(h=-2)$  was observed. Value of  $K(h=-2)$  was decreasing when compost ratio was increasing. To get complete results implementation of additional experiments is recommended. Data obtained from this work will be used in project NAZV No. QH 81200 “Optimalizace vodního režimu v krajině a zvýšení retenční schopnosti krajiny uplatněním kompostů z biologicky rozložitelných odpadů na orné půdě i trvalých travních porostech“ (Research Institute of Agricultural Engineering, Prague).

**Key words:** compost, soil hydraulic properties, cylinder experiment, small – pot field experiment, hydraulic conductivity, infiltrometer, soil water retention curve.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Cíl práce.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Literární rešerše.....</b>	<b>11</b>
3.1. Kompostování.....	11
3.1.1. Charakteristika kompostování .....	11
3.1.2. Optimalizace surovinové skladby kompostu a vliv podmínek na proces.....	12
3.1.3. Technologie pro kompostování .....	13
3.1.3.1. Kompostování v pásových hromadách .....	13
3.1.4. Vliv kompostu na vlastnosti půdy .....	16
3.2. Pohyb vody v půdě .....	17
3.2.1. Rovnice popisující transport vody v půdě .....	17
3.2.2. Hydraulické vlastnosti půdy .....	18
3.2.2.1. Analytické funkce pro vyjádření průběhu hydraulických vlastností .....	19
3.2.2.2. Stanovení hydraulických vlastností .....	21
3.2.2.2.1. Metody pro stanovení retenční čáry půdní vlhkosti .....	21
3.2.2.3. Hydraulická vodivost půdy.....	26
3.2.2.3.1. Metody pro stanovení nasycených hydraulických vodivostí.....	26
3.2.2.3.2. Metody pro stanovení nenasyčených hydraulických vodivostí.....	27
3.3. Terénní měření hydraulické vodivosti pomocí infiltračních pokusů .....	28
3.3.1. Mini Disk Infiltrometer (MDI).....	28
3.3.2. Guelphský Permeometr (GP).....	33
<b>4. Materiál a metoda .....</b>	<b>38</b>
4.1. Stanovení hydraulických vlastností nádobovým pokusem .....	38
4.2. Stanovení hydraulických vlastností maloparcelovým polním pokusem.....	41
4.2.1. Měření hydraulických vodivostí v terénu .....	43
<b>5. Výsledky a diskuze.....</b>	<b>45</b>
5.1. Stanovení hydraulických vlastností nádobovým pokusem .....	45
5.1.1. Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K(h=-2)$ pomocí MDI po nahutnění válců .....	45
5.1.2. Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K(h=-2)$ pomocí MDI po vyschnutí válců .....	50
5.1.3. Porovnání měření nenasyčených hydraulických vodivostí pomocí MDI po nahutnění a po vysušení vzorků.....	54
5.1.4. Laboratorní stanovení průběhu retenčních čar pomocí Tempských cel .....	56
5.2. Stanovení hydraulických vlastností maloparcelovým polním pokusem.....	58
5.2.1. Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K(h=-2)$ pomocí MDI.....	58
5.2.2. Měření nasycených hydraulických vodivostí $K_s$ pomocí GP.....	69

5.2.3. Laboratorní stanovení průběhů retenčních čar .....	76
<b>6. Závěr .....</b>	<b>77</b>
<b>7. Seznam literatury .....</b>	<b>78</b>

## 1. Úvod

Hospodaření na půdě ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti půdy. V důsledku pravidelného obhospodařování velmi často dochází k destrukci půdní struktury a tím k významné změně fyzikálních a především hydrofyzikálních vlastností půd. Změna těchto vlastností pak zpravidla nepříznivě ovlivňuje vodní režim půd a transport látek v půdě.

Pro zachování základních fyzikálních parametrů či zlepšení půdních fyzikálních vlastností je důležitý přísun dostatku organické hmoty do půdy. Dodáváním kompostu do půdy se zlepšují její hydraulické vlastnosti (Ouattaraa et al., 2007). Kompost působí také jako pojivo půdních částic, a tak činí půdu odolnější vůči erozi a zlepšuje schopnost půdy zadržovat vodu (Plíva a Jelínek, 1996). Na toto téma bylo provedeno mnoho studií vycházejících z nádobových i polních pokusů s různými výsledky.

Například Zeytin and Baran (2003) prováděli nádobové pokusy v suché oblasti Turecka na jílovitohlinité a písčitohlinité půdě. Přidávali do půd slupky lískových ořechů v množství 0 až 8 % hm. Během dvou period (odběry po 45 a 90 dnech) sledovali vliv této organické hmoty na hydraulické vlastnosti půd. Byl prokázán pozitivní vliv na stabilitu půdních agregátů, zvýšila se rovněž nasycená hydraulická vodivost a pórovitost. Další podobné laboratorní pokusy proběhly v Jordánsku. Al-Widyan et al. (2005) zkoumali vliv organického odpadu z lisování oliv v jílovité a hlinité půdě (odpad tvořil 2 %, 4 %, 8 % hmotnosti směsi). Zjistilo se, že po aplikaci se výrazně zlepšily hydraulické vlastnosti vybraných půd. Na druhou stranu například Evanylo and Sharony (2002) nezjistili ani po dvou letech aplikování kompostu žádné zvýšení retenční vodní kapacity půdy; rovněž v dalších krátkodobých pokusech nebylo zvýšení retenční vodní kapacity půdy příliš zřetelné (Kahle and Belau, 1998).

Bresson et al. (2001) studovali vliv kompostu na povrchovou degradaci půdy, povrchový odtok a další související erozní procesy. Do prachovité půdy byl zapraven kompost z biologicky rozložitelného komunálního odpadu. Plochy byly vystaveny srážkám  $19 \text{ mm h}^{-1}$  po dobu 60 min. Morfologické změny půdního povrchu byly monitorovány fotografováním. Každých 5 min byl měřen povrchový odtok. Na kontrolní ploše bez aplikace kompostu došlo k rychlému vytvoření erozních rýh. Na plochách, kde byl aplikován kompost (v poměru  $15 \text{ g kg}^{-1}$  sušiny), došlo ke zpomalení tohoto procesu. Aplikace kompostu byla účinná v boji s půdní povrchovou degradací ve vysoce nestabilní půdě. Výsledkem aplikace kompostu byl zpožděný povrchový odtok a snížená ztráta půdy.

Dvouletý polní pokus se uskutečnil v Thajsku na písčitém typu půdy „Satuk series“ (Suzuki and Noble, 2007). Pro aplikaci do této půdy byl zvolen organický odpad -



kompostované listí. Dávky byly stanoveny podle druhu přídatku na 10 až 120 t ha<sup>-1</sup>. Z výsledků vyplynulo, že došlo ke zlepšení hydraulických vlastností půdy - došlo ke zvýšení nasycené hydraulické vodivosti a tím ke zvýšení infiltrační schopnosti půdy. Curtis and Claassen (2007) zkoušeli na zvětralých půdách žulového podkladu podél silnic v Kalifornii aplikaci kompostů ze zahradního odpadu (z místní kompostárny) v dávkách 6 %, 12 % a 24 % obj. (na objem zeminy). Pokus trval dva roky a prokázal vhodnost používání kompostů za účelem zlepšení půdních hydraulických vlastností – zvýšila se nasycená hydraulická vodivost, tím i infiltrační schopnost, a proto došlo ke snížení povrchového odtoku; rovněž byly zaznamenány pozitivní korelace s dávkami kompostu. Podobně koncipovaný dvouletý pokus byl proveden v Dallasu na sedmi různých půdních typech (Weindorf et. al., 2006). Pokus byl proveden v polních podmínkách a jako kompost byly zvoleny zkompostované zbytky zeleně z údržby krajiny. Aplikace kompostu proběhla zapravením příslušné vrstvy kompostu (0; 2,5; 5 a 7,5 cm) na pokusný polní čtverec. Po aplikaci kompostu bylo zaznamenáno zlepšení hydraulických vlastností půdy. Zajímavý pokus prováděli také Rajeswari et. al. (2007) na jílovitohlinité půdě v Indii. Jednalo se o krátkodobý srážko - odtokový model. Do testované půdy byla přidána kokosová jádra, kozí hnůj a další biologicky rozložitelné odpady v množství 5 až 10 t ha<sup>-1</sup>. Vlivem přídatku těchto organických odpadů do půdy došlo ke zlepšení (byť k nepříliš výraznému) půdní struktury a tím ke zlepšení hydraulických vlastností půdy. Organický materiál zvolili ve svém pokusu také Özenç and Özenç (2008). Využili slupky z lískových ořechů, odpad z farem, rašelinu a slepičí trus. Jednalo se o polní pokus trvající 2,5 roku, který se uskutečnil v Turecku na jílovitohlinité (podzolovité) půdě. Dávky organických materiálů byly zvoleny následující: 0; 12,5; 25; 50; 75 a 100 t ha<sup>-1</sup> (v sušině). Byla zjištěna změna struktury půdy - zvýšení pórovitosti, tím došlo ke snížení objemové hmotnosti a zlepšení retenční schopnosti půdy. Epstein (1997) ve své publikaci uvádí, že penetrační odpor po aplikaci kompostu klesl, snížila se objemová hmotnost a zvýšila se pórovitost půdy.

## **2. Cíl práce**

Diplomová práce měla následující cíle:

- a) Teoretické seznámení se s problematikou měření hydraulických vlastností půd.
- b) Vyhodnocení vlivu kompostu na hydraulickou vodivost měřenou pomocí tenzního diskového infiltrometru na vzorcích připravených v laboratorních podmínkách.
- c) Vyhodnocení vlivu kompostu na hydraulickou vodivost měřenou pomocí tenzního diskového infiltrometru a Guelphského permeometru v polních podmínkách.
- d) Vyhodnocení vlivu kompostu na retenční čáry půdní vlhkosti měřené pomocí Tempských cel na půdních vzorcích připravených v laboratoři a odebraných v terénu.
- e) Celkové vyhodnocení.

### **3. Literární rešerše**

#### **3.1. Kompostování**

##### **3.1.1. Charakteristika kompostování**

Kompostování je nejvyšší formou recyklace a umožňuje opětovné využití zdrojů (Epstein, 1997). Kompostování lze považovat za nejlepší způsob zpracování organických odpadů a vyrobený kompost za vhodný prostředek pro zachování vitality půdy. Kompost je nejstarším a nejpřirozenějším prostředkem ke zlepšování kvality půdy (Kalina, 2004). Gunnarsdotter (2001) definuje kompostování jako samozáhřevný, aerobní rozkladný proces. Organická hmota je částečně oxidovaná a biologickými a chemickými procesy přeměňována na zbytky se zvýšenou odolností vůči rozkladu. Výsledkem je uvolňování tepla a vody spolu s rozmanitými plynnými produkty jako je oxid uhličitý a amoniak. Základem procesu je postupné zapojování mikrobiálních společenstev v mezofilní fázi (25 – 45 °C), termofilní fázi (45 – 80 °C) a fázi ochlazování.

Kollárová (2007) uvádí, že jednotlivé fáze lze od sebe rozeznat na základě změn teploty, vzhledu, pachu a objemu substrátu. Jako první nastává fáze rozkladná – mineralizace. Fáze se vyznačuje rychlým nárůstem teploty s následným relativně rychlým poklesem. V jádru kompostované hmoty může teplota přesáhnout i 60 °C. V této fázi se rozvíjejí termofilní mikroorganismy a nastává rozklad složitějších organických sloučenin (cukry, škroby, bílkoviny) na jednodušší sloučeniny anorganického charakteru. Objem kompostované směsi se zmenšuje. Nejde přitom pouze o zhutňování materiálu a odpařování vody, ale přímo o bilanční pokles celkové hmotnosti, vyplývající z produkce oxidu uhličitého a dalších plynných zplodin metabolismu při činnosti mikroorganismů. Nastává pokles hmotnosti až o 30 % celkového množství. Vzhled kompostované směsi se výrazně nemění. Druhá nastává fáze přeměnná. Fáze se vyznačuje pozvolným poklesem teploty ze 40 °C na 25 °C. Termofilní mikroorganismy jsou nahrazeny mezofilními. Původní struktura, vzhled a pach hmoty se ztrácí. Kompost dostává hnědou barvu, v pozdější době je ze směsi cítit příjemnou zemitou houbovou vůni. V této fázi se hmotnost snižuje o dalších 10 %. Poslední fází je fáze dozrávání kompostu. Množství dostupných živin je již omezené. To způsobuje pokles mikrobiální aktivity a snížení uvolňování tepla. Teplota klesá na teplotu okolí. V kompostu se vyskytují i vyšší druhy organismů (stonožky, roztoči, žížaly). Pokles hmotnosti je již nepozorovatelný. Celkový pokles hmotnosti od začátku kompostování je průměrně 50 % (vztaženo na původní hmotnost zakládané hmoty). Pokles objemu je ve skutečnosti ještě větší, protože dojde ke zhutnění surovin.

### 3.1.2. Optimalizace surovinové skladby kompostu a vliv podmínek na proces

Surovinová skladba čerstvého kompostu je hmotnostní poměr jednotlivých zbytků/hmot, které navážíme do kompostové zakládky (Váňa, 1997). Rychlost rozkladu různých organických zbytků je možno vysvětlit různým poměrem uhlíku a dusíku (C:N). Kompostované hmoty s poměrem C:N nižším než 10:1 se rozkládají velmi rychle a jsou mikrobiologicky dobře využitelné. Naopak hmoty s vysokým poměrem C:N nad 50:1 se rozkládají velmi pomalu. Abychom dosáhli u zralého kompostu C:N v rozmezí 25 – 30:1 (vysoká stabilita, agronomická účinnost), je třeba optimalizovat C:N v čerstvém kompostu v rozmezí 30 - 35:1. V průběhu zrání kompostu ubývá část uhlíku jako oxid uhličitý a poměr C:N se snižuje. Nadměrně vysoký poměr C:N prodlužuje zrání kompostu. V případě, že do půdy aplikujeme kompost nebo kteroukoliv jinou hmotu s vysokým poměrem C:N, pokračuje její rozklad v půdě, k čemuž se spotřebovává půdní dusík, kterého se pak nedostává rostlinám. Při příliš nízkém poměru C:N v čerstvém kompostu (pod 20:1) převyšuje obsah dusíku metabolickou potřebu mikroorganismů přeměňujících organické látky na látky humusové. Doba zrání se tím rovněž prodlužuje a produktivita tvorby humusových látek klesá. Poměr C:N optimalizujeme při sestavování surovinové skladby na 30 až 35:1 tak, že k hmotám s vysokým poměrem přidáváme odpady s úzkým poměrem. Pro optimalizaci surovinové skladby kompostu lze využít databázové programy pro stanovení surovinové skladby, například program KOMPOST 2.00 či program COMPOSTER (Kollárová, 2007). Závazné je při optimalizaci surovinové skladby stanovení vlhkosti čerstvého kompostu. Nedostatečná vlhkost způsobuje vývoj nevhodné mikroflóry s převahou plísní a aktinomycet. Při nadbytečné vlhkosti dochází rychle k nedostatku kyslíku v kompostu, k vývoji anaerobní mikroflóry a ke zksnutí kompostu. Optimální vlhkost je taková, při níž je 70 % pórů čerstvého kompostu zaplněno vodou. Dalším důležitým faktorem je teplota. Většinou je uváděno optimální rozmezí teplot od 50 do 60 °C. Výše teplot potřebných k likvidaci nežádoucích patogenních mikroorganismů se liší podle jejich druhu a jsou většinou předeepsány příslušnou státní normou. Obecně lze konstatovat, že k likvidaci většiny lidských, živočišných i rostlinných patogenů, je třeba dosáhnout teploty 55 °C. Kromě uvedené teploty je nutné zohlednit i dobu, po kterou se udrží v průběhu kompostování. Dle Plívy a kol. (2006) je nutné udržovat optimální pH, za optimální pH lze považovat pH v rozmezí 6,5 až 8. Při poklesu pH pod hodnotou 6 dochází k inhibici některých mikroorganismů, hlavně bakterií, čímž se zpomaluje rozklad organických látek. Stoupne – li naopak hodnota pH nad 8,5 dochází k přeměně dusíkatých sloučenin na amoniak, který uniká z kompostu ve formě plynu, a tím se zvyšují ztráty dusíku. Během kompostovacího procesu je v počáteční fázi pH nízké, kolem hodnoty 5, což je způsobeno

tvorbou organických kyselin. V této fázi jsou dominantními organismy houby a plísně tolerantní vůči kyselému prostředí. Krátce na to jsou kyseliny rozkládány bakteriemi a pH se zvyšuje. Dodávka vzduchu (kyslíku) do kompostovacích surovin je důležitá ze třech základních hledisek. První je dodávka kyslíku za účelem vytvoření aerobního prostředí kompostu, které umožňuje požadovanou mikrobiální aktivitu. Druhým hlediskem je provzdušňování kompostu za účelem snižování vlhkosti. Třetím hlediskem je regulace teplot. Vznikají-li se příliš vysoké teploty po delší dobu, může mít tento fakt neblahý vliv na činnost a život mikroorganismů a následně na rozklad kompostované biomasy. Mezi nejčastěji používané metody zajištění dostatečného přístupu vzduchu do kompostu patří pravidelné překopávání překopávačem. Obsah O<sub>2</sub> ve vzdušných pórech zrajícího kompostu by neměl klesnout pod 6 % obj. Epstein (1997) ještě klade důraz na zrnitost a homogenitu substrátu. Pro správný začátek procesu na sebe složky určené ke kompostování musí působit co nejučinněji. Minerální rozklad probíhá na povrchu částic surovin. Čím větší je styčný povrch, tím rychleji probíhá dekompozice. Pro správnou výměnu plynů musí být substrát kyprý, porézní a optimálně zvlhčený. Kompostování je biologickým procesem, kterého se účastní milióny mikroorganismů. Většina autorů považuje za hlavní mikroorganismy podílející se na kompostovacím procesu termofilní a mezofilní bakterie, aktinomycety a houby. Bakteriím se v kompostovacím procesu připisuje 80 – 90 % mikrobiální aktivity (Stratton et. al., 1995)

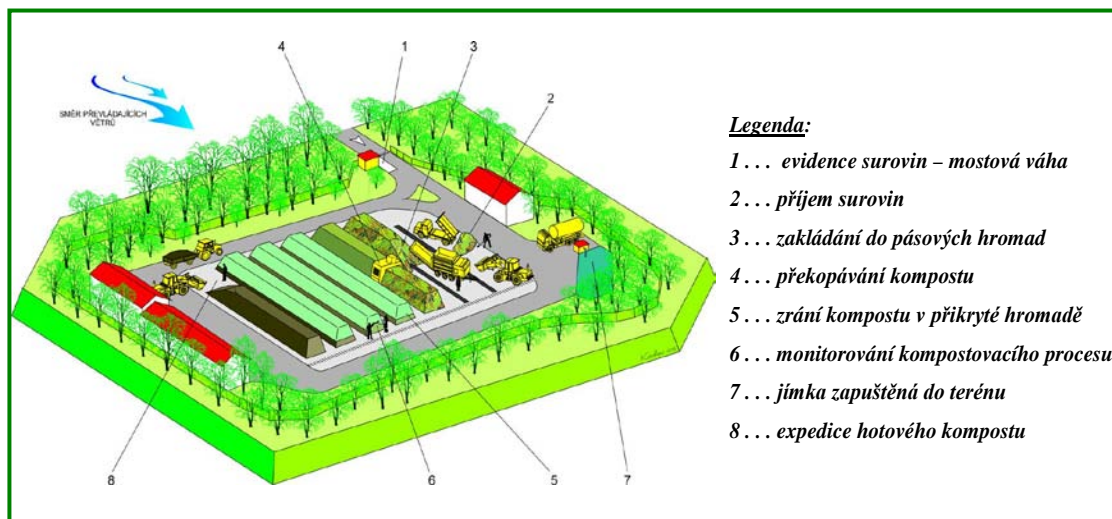
### **3.1.3. Technologie pro kompostování**

Technologií pro kompostování je mnoho. Lze je například rozdělit na kompostování v plošných hromadách, kompostování v pásových hromadách, intenzivní kompostovací technologie, kompostování ve vacích a vermikompostování (Zemánek, 2000) a (Plíva a kol, 2006). V předložené práci je podrobně popsána technologie kompostování v pásových hromadách na volné ploše, protože kompost využitý při experimentech byl vyroben touto metodou.

#### **3.1.3.1. Kompostování v pásových hromadách**

Jde o technologii, při které jsou kompostované suroviny zakládány do pásových hromad trojúhelníkového nebo lichoběžníkového průřezu (obr. 1) na volných plochách zabezpečených či nezabezpečených. Délka hromad je omezena velikostí těchto disponibilních ploch. Celková velikost a profil pásové hromady spolu úzce souvisí a do značné míry na nich závisí i velikost použité mechanizace - zejména šířka záběru překopávače kompostu. Tato technologie je

ideální výchozí technologií pro provozování řízeného kompostování (nazývaného též kontrolované mikrobiální kompostování či rychlokompostování), umožňuje vysoký stupeň mechanizace a využití vysoce výkonné techniky. Při tradičním (neřízeném) kompostování v pásových hromadách je běžná doba zrání 3 až 6, někdy i 12 měsíců. O délce trvání jednotlivých fází kompostovacího procesu rozhoduje zejména surovinová skladba, homogenita surovin v hromadě, kvalita a počet překopávek a klimatické podmínky. Živelný průběh procesu podmiňuje výrazně delší dobu trvání celého kompostování od založení až po dozrání. Omezené prostorové možnosti a zvyšující se množství organických odpadů vhodných ke kompostování vedou ke snaze maximálního zefektivnění výroby kompostu (tj. zejména zkrácením doby výroby kompostu).

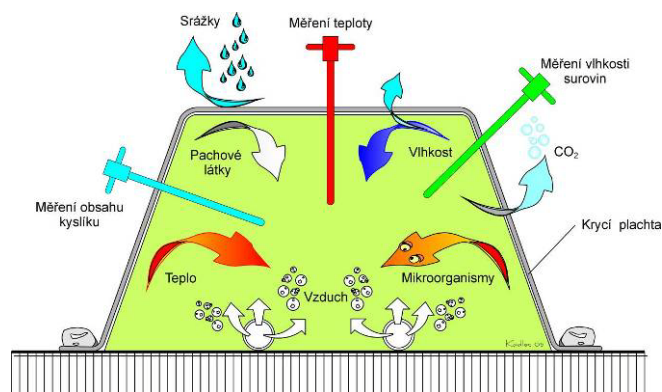


Obr. 1: Kompostování v pásových hromadách na volné ploše.

Urychlení celého procesu lze docílit především optimalizací surovinové skladby, sledováním procesních podmínek (teplota, vlhkost, stupeň provzdušnění), mechanizací rozhodujících operací v technologickém procesu, případně zakrýváním kompostovaných hromad textilií. Při splnění těchto předpokladů lze hovořit o řízeném kompostování, kdy každý zásah do kompostovacího procesu je přesně načasován, má své opodstatnění a uskutečňuje se na základě podrobného monitorování jeho průběhu. Kompletní rozklad proběhne za 8 až 12 týdnů. Základní předpoklad správného průběhu kompostování je optimální surovinová skladba zakládky, kterou ovlivňuje řada faktorů, přičemž největší význam má správný poměr C:N a počáteční vlhkost.

Čas potřebný pro přeměnu surovin na stabilizovaný kompost je také závislý na mnoha faktorech. Dobu rozkladu organických surovin ovlivňuje především poměr C:N, vlhkost,

teplota, obsah kyslíku v zakládce a charakter kompostované biomasy. Délka periody kompostování je závislá i na zamýšleném použití výsledného produktu. V některých případech není nutné, aby byl kompost úplně stabilizovaný. Příkladem může být aplikace kompostu v dostatečné době před setím, která zaručí dozrání na poli. Obvykle je možné dosáhnout dostatečného rozkladu organických látek a stability surovin při ideálních kompostovacích podmínkách během několika týdnů, ale doporučuje se tuto periodu prodloužit na více než dva měsíce. Potřebnou dobu kompostování ovlivňuje samozřejmě i zvolená technologie kompostování a kvalita vstupních surovin. Pro zajištění optimálního průběhu kompostovacího procesu – a tím optimální doby pro kompostování - je nutné monitorovat a řídit fyzikálně-chemické, chemické a mikrobiologické vlastnosti zpracovávané směsi surovin a procesní parametry kompostování, aby bylo možné (na základě znalosti jejich současných hodnot) provést vhodný technologický zásah, pokud dojde k jejich odchýlení od hodnot optimálních. Znalost procesních parametrů je důležitá i pro stanovení doby ukončení kompostovacího procesu. Mezi zjišťované a řízené procesní parametry patří teplota, vlhkost, koncentrace kyslíku a koncentrace organických látek (obr. 2). Po ukončení kompostování jsou prováděna stanovení stability a zralosti, mikrobiologické hodnocení a chemické hodnocení kompostu, která vypovídají o konečné kvalitě hotového kompostu (Plíva a kol., 2009)



Obr. 2: Monitorované hodnoty při kompostování

Při výběru strojů a zařízení potřebných pro technické zabezpečení kompostovacího procesu je vhodné provádět výběr podle potřebných technologických kroků, které zabezpečují kontrolované mikrobiální kompostování: příprava surovin do zakládek kompostu – drtiče, provzdušňování a promíchávání kompostu – překopávače kompostu, prosévání hotového kompostu – prosévací zařízení, roztřídění nadsítného odpadu z prosévání – separátory a další činnosti související s provozováním kompostování. Uvedené mechanizační prostředky je výhodné využívat sestavené do strojních (kompostovacích) linek. Energetické prostředky jsou

v kompostovacích linkách využívány v případě, že některé operace jsou zajišťovány připojitelnými stroji, které nemají svůj vlastní energetický zdroj a pro svoji činnosti musí být spojeny s energetickým prostředkem. Nejčastěji bývá jako energetický prostředek využíván kolový traktor, nosič náradí a čelní nakladač (Plíva a kol., 2005).

#### **3.1.4. Vliv kompostu na vlastnosti půdy**

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující kvalitu a úrodnost půdy je obsah půdní organické hmoty. Organická hmota je nezbytná k udržení půdní struktury, k zadržování vody, jako zdroj živin a k optimálnímu biologickému životu půdy. V případě nadměrného poklesu obsahu nebo snížení kvality půdní organické hmoty dojde ke snížení půdní úrodnosti, jedná se zejména o vliv na sorpční a iontovýměnné vlastnosti, na tvorbu strukturních agregátů, vzdušný, vodní a tepelní režim půd. K úbytkům půdní organické hmoty dochází, jestliže ztráty mineralizací převyšují vnosy. Ztráty jsou způsobeny především erozí, vyšší aerací a mineralizací po odvodnění, nevhodnou kultivací a používáním nevhodných průmyslových i statkových hnojiv (Hladík, 2009). Vyšší obsah humusových látek v půdě působí příznivě na její fyzikální vlastnosti zejména tím, že zlepšuje půdní strukturu a provzdušnění půdy a zvyšuje vodní kapacitu půdy. Kompost se aplikuje například na písčité půdy s nedostatkem humusu či s potřebou zlepšit vodní režim a sorpční vlastnosti. Patří též mezi hlavní opatření při rekultivacích půd. Nezanedbatelné je využití kompostu jako vylehčovací hmoty při zlepšování struktury těžkých půd (Lhotský a kol., 1994). Přidáním kompostu do půdy se zvyšuje četnost pórů střední a malé velikosti a současně se snižuje četnost velkých pórů, čímž se zlepšuje struktura půdy. Aplikace kompostu má příznivý vliv na vsakování vody do půdy a zlepšuje permeabilitu půdy. Zvýšená vlhkost půdy má následně vliv na snižování povrchového odtoku (Epstein, 1997). Zvýšení obsahu organické hmoty v půdě zvyšuje zádrž makrobiotických prvků v půdě (Pini et al., 2010). Kompost může výrazně zlepšit strukturu půdy – u jílovitého, jílovitohlinitého půdního druhu je možné aplikací kompostu snížit jejich objemovou hmotnost, zlepšit propustnost pro vodu a vzduch (Kollárová, 2007). Kompost je považován za stabilní zdroj organické hmoty (Stoffella and Kahn, 2001).

Bylo učiněno množství experimentů, které sledovaly a dokazovaly pozitivní vliv kompostů na fyzikální vlastnosti půd, ale je nutno si uvědomit, že zakládky kompostů tvořily mnohdy rozdílné suroviny či že při provedení pokusů byly použity různorodé metody. Některé studie, které se zabývaly vlivem kompostu na hydrofyzikální vlastnosti půdy, byly podrobně diskutovány již v úvodu.



### 3.2. Pohyb vody v půdě

#### 3.2.1. Rovnice popisující transport vody v půdě

Transport vody v půdě (nestacionární proudění) lze popsat pomocí Richardsovy rovnice (Richards, 1931), která vychází z rovnice kontinuity a Darcyho zákona (Darcy, 1856). Rovnici kontinuity v izotropním geometricky stálém porézním prostředí lze definovat takto (1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

kde  $x, y, z$  jsou souřadnicové osy [L],  $q_x, q_y, q_z$  jsou hustoty toku vody [ $L T^{-1}$ ],  $\theta$  je objemová vlhkost [ $L^3 L^{-3}$ ] a  $t$  je čas [T].

Pro jednotlivé směry proudění pak platí Darcyho zákon (2):

$$q_x = -K(h) \frac{\partial H}{\partial x} \quad q_y = -K(h) \frac{\partial H}{\partial y} \quad q_z = -K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2)$$

kde  $H$  je celkový potenciál [L],  $K(h)$  je nenasycená hydraulická vodivost [ $L T^{-1}$ ] a  $h$  je tlaková výška [L].

Dosažením rovnice (1) do rovnice (2) vznikne Richardsova rovnice (Richards, 1931) (3):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Pro jednorozměrné proudění ve svislém směru pak platí zjednodušené rovnice (4) a (5):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial g_z}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Celkový potenciál  $H$  je součtem potenciálu půdní vody  $h$  [L] a gravitačního potenciálu  $z$  [L] vyjádřeného ve výškách vodního sloupce. Dosazením za  $H$  a úpravou levé strany rovnice následujícím způsobem (6):

$$H = h + z \quad \text{a} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

Ize získat kapacitní tvar rovnice (7), kde  $d\theta/dh$  je vodní kapacita  $C(h)$  [ $L^{-1}$ ]:

$$\frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (7)$$

Rovnici (5) lze také upravit, protože platí (8)

$$H = h + z \quad \text{potom} \quad \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} + 1 \quad (8)$$

Dosazením výrazů (8) do (5) získáme difúzní tvar rovnice (9):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (9)$$

kde  $D$  [ $L^2 T^{-1}$ ] je difuzivita půdní vody (10):

$$D = K(h) \frac{dh}{d\theta} \quad (10)$$

### 3.2.2. Hydraulické vlastnosti půdy

Pro popis proudění vody v půdě je nutné definovat dvě základní hydraulické charakteristiky nenasycených půd a to retenční čáru půdní vlhkosti, která vyjadřuje vztah mezi objemovou vlhkostí  $\theta$  a tlakovou výškou  $h$  a křivku hydraulických vodivostí, která vyjadřuje vztah mezi hydraulickou vodivostí  $K$  a tlakovou výškou vody  $h$  nebo objemovou vlhkostí  $\theta$ . Objemovou vlhkost půdy definujeme jako poměr objemu vody k objemu půdního vzorku [ $L^3 L^{-3}$ ].

Vyjadřuje se rovnicí (Gardner, 1986) (11):

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (11)$$

kde  $V_w$  je objem vody v pórech [ $L^3$ ] a  $V_s$  je objem půdního vzorku [ $L^3$ ].  
Hydraulická vodivost  $K$  [ $L T^{-1}$ ] vyjadřuje schopnost půdy transportovat vodu. Její definice vyplývá z Darcyho zákona (2).

### 3.2.2.1. Analytické funkce pro vyjádření průběhu hydraulických vlastností

Retenční čára a křivka hydraulických vodivostí může být popsána analytickými funkcemi. Retenční čára rovnicí Brookse a Coreyho (1964) a rovnicí van Genuchtena (1976). Křivka hydraulických vodivostí kombinací rovnice van Genuchtena (1976) a Mualema (1976). Nejprve je však nutné definovat efektivní vlhkost  $\theta_e$  (12):

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (12)$$

kde  $\theta$  je objemová vlhkost [ $L^3 L^{-3}$ ],  $\theta_r$  je reziduální vlhkost [ $L^3 L^{-3}$ ],  $\theta_s$  je nasycená vlhkost [ $L^3 L^{-3}$ ].

Rovnice Brookse a Coreyho (1964) (13):

$$\theta_e = \left( \frac{H_b}{|h|} \right)^\lambda, \quad h < -H_b$$
$$\theta_e = 1, \quad h \geq -H_b$$

(13)

kde  $H_b$  a  $\lambda$  jsou parametry.  $H_b$  byl původně definován jako probublávací tlak [L], který je obvykle menší než vstupní hodnota vzduchu  $H_v$  [L].

Rovnice van Genuchtena (1976) (14):

$$\theta_e = \frac{1}{\left(1 + (\alpha|h|)^n\right)^m}, \quad h < 0$$
$$\theta_e = 1, \quad h \geq 0 \quad (14)$$

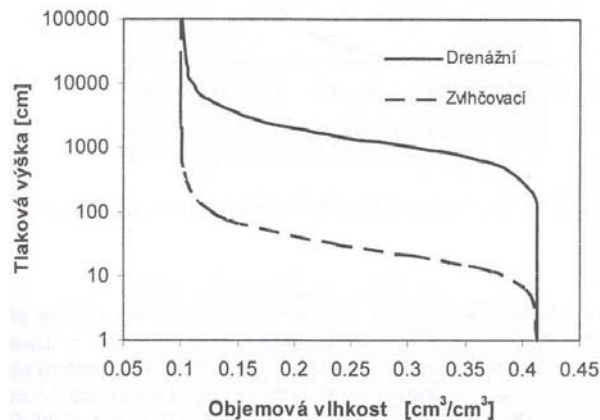
kde  $\alpha$ ,  $n$  a  $m$  jsou parametry.

Kombinace rovnic van Genuchtena (1976) a Mualema (1976) pro předpověď hydraulických vodivostí (15):

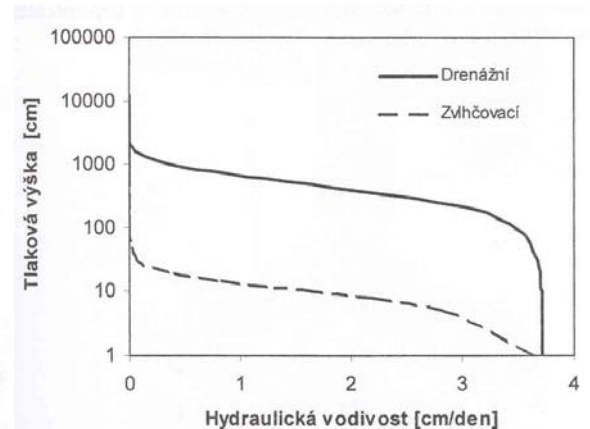
$$K(\theta) = K_s \theta_e^{0.5} \left[ 1 - \left( 1 - \theta_e^{1/n} \right)^m \right]^2 \quad (15)$$
$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1$$

kde  $n$  a  $m$  jsou parametry.

Tvar křivek hydraulických vlastností závisí na tom, zda data byla získána při odvodňování nebo zvlhčování půdního materiálu. Tento jev se nazývá hystereze hydraulických vlastností. V případě retenčních čar půdních vlhkostí  $\theta(h)$ , pak stejné tlakové výšce odpovídající různé hodnoty vlhkostí a platí, že vlhkost ležící na drenážní větvi je vyšší než vlhkost na zvlhčovací větvi (obr. 3). Podobný vztah platí pro nenasycené hydraulické vodivosti u průběhu drenážních a zvlhčovacích křivek  $K(h)$  (obr. 4). Průběh drenážních a zvlhčovacích křivek  $K(\theta)$  je často považován za stejný tudíž nezatížený hysterezí.



Obr. 3: Průběhy drenážní a zvlhčovací retenční čáry půdních vlhkostí  $\theta_h$  (Kodešová, 2005)



Obr. 4: Průběhy drenážní a zvlhčovací křivky hydraulických vodivostí  $K_h$  (Kodešová, 2005)

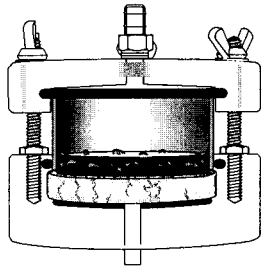
### 3.2.2.2. Stanovení hydraulických vlastností

Hydraulické vlastnosti půdy jsou ovlivňovány fyzikálními i chemickými faktory a lze je stanovovat mnoha metodami přímými i nepřímými. Jednou z metod stanovení hydraulických vlastností je aplikace empirických pedotransferových funkcí (Minasny, 2000). Minasny (2000) uvádí, že pedotransferové funkce mohou být využity k předpovědi hydraulické vodivosti a retenční schopnosti půdy. Uvádí, že využití těchto funkcí je vhodné, pokud stanovení probíhá ve standardních podmínkách. Pro specifické podmínky doporučuje provést místní kalibraci. Také Rajkai et al. (2004) využívají k předpovědi hydraulických vlastností půdy pedotransferové funkce. Jako spolehlivé parametry ke stanovení hydraulických vlastností uvádějí zjištění nenasycené hydraulické vodivosti a retenčních čar vlhkosti půdy.

#### 3.2.2.2.1. Metody pro stanovení retenční čáry půdní vlhkosti

Stanovení retenčních čar půdní vlhkosti lze provést laboratorními i terénními metodami. V laboratorních podmínkách jsou retenční čáry půdní vlhkosti  $\theta(h)$  nejčastěji měřeny na tlakových přístrojích. Jsou to přístroje podtlakové např. pískový tank a Tempská cela, obr. 5 a obr. 6 či přetlakové např. přetlakový aparát a Tempská cela. Další možnou metodou je test kapilárního vztlínání – využitelný pro nestrukturní materiály. Retenční čáry půdní vlhkosti lze stanovit i v terénu. V půdním profilu jsou v daných hloubkách umístěny čidla na měření vlhkosti (TDR senzory, neutronová sonda, kapacitní metoda apod.) a čidla na měření tlakové výšky (tenzometry). Body retenčních čar jsou dány měřeními objemovými vlhkostmi

a odpovídajícími měřenými výškami. Tato metoda je aplikovatelná i v laboratoři (Kodešová, 2005).



Obr. 5: Těpská cela  
(Soilmoisture, 2008).



Obr. 6: Zapojený (pod)takový přístroj.

Získané výsledky se vynášejí do jedné křivky. Na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty objemové vlhkosti  $\theta$  [ $L^3 L^{-3}$ ] v intervalu  $(0, \theta_s)$ , kde  $\theta_s$  je nasycená objemová vlhkost a na svislé ose jsou tlakové výšky  $h$  [L] nejčastěji vyjádřené v cm. Pro větší rozsah tlakových výšek se graf zobrazuje v semilogaritmickém měřítku (16).

$$pF = \log|h| \quad (16)$$

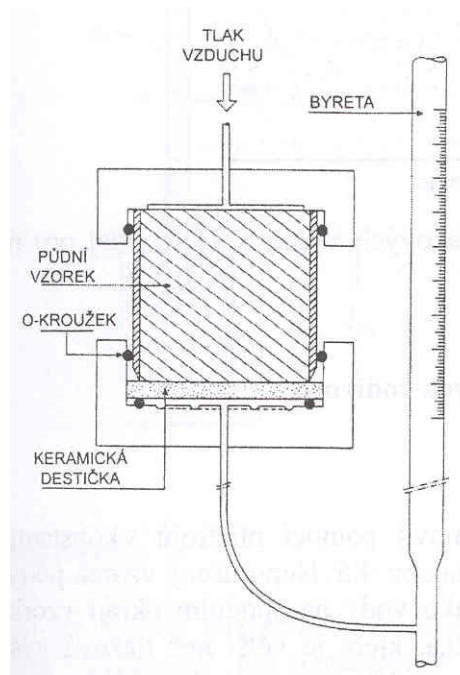
### **Těpské cely**

Kodešová et al. (2007) v experimentu zabývajícím se vlivem vegetačního pokryvu na půdní mikromorfologii studovali hydraulické vlastnosti půdy mimo jiné i v laboratoři na neporušených půdních vzorcích o objemu  $100 \text{ cm}^3$  umístěných v Těpských celách. V experimentální části mé práce bylo provedeno laboratorní stanovení retenčních čar půdní vlhkosti v Těpských celách, proto se o měření tímto zařízením zmíním podrobněji.

### **Popis TC**

Schéma a uspořádání cely je patrné z obr. 7. Důležitou součástí Těpské cely je keramická destička. Destička je nasycena vodou a prostor mezi destičkou a hladinou vody v byretě, která

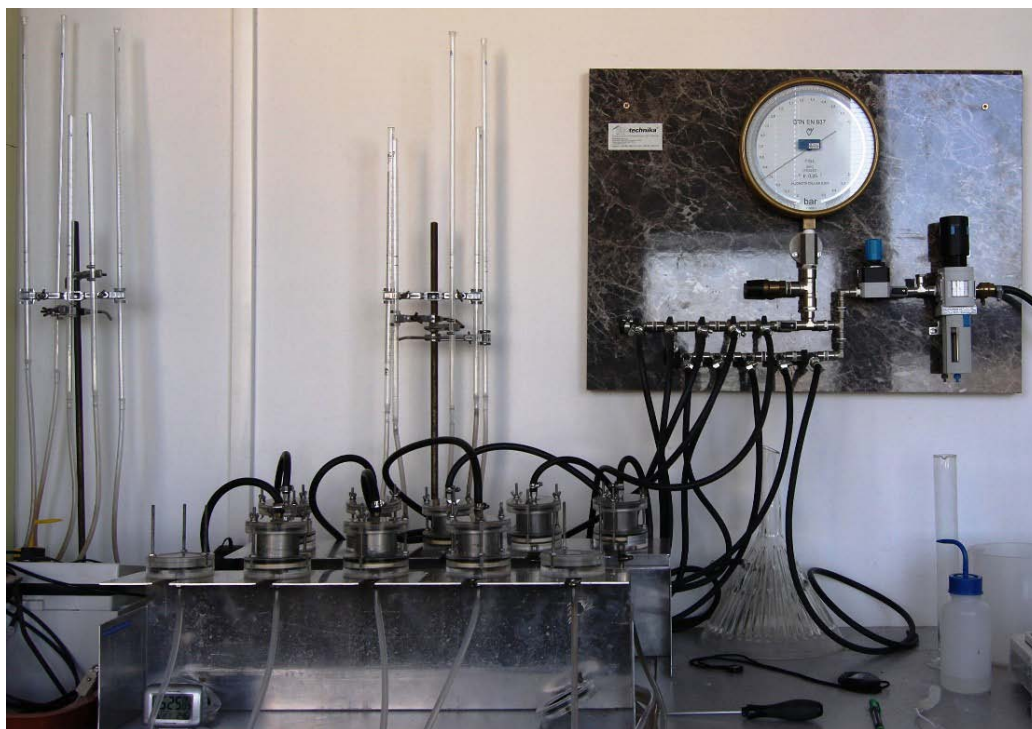
je připojena hadičkou ke spodnímu okraji Tempské cely, je vyplněn vodou. Tlaková výška vody je nastavována buď polohou byrety pod úrovní destičky nebo přetlakem vzduchu. Drenážní i zvlhčovací  $\theta(h)$  křivky jsou na neporušených půdních vzorcích stanoveny tak, že jsou půdní vzorky umístěny do Tempské cely a nasyceny vodou. Poté jsou v několika postupných tlakových krocích drénovány nebo zvlhčovány (Kodešová, 2005).



Obr. 7: Schéma Tempské cely (Kodešová, 2005)

### Postup stanovení

Spodní část Tempské cely připojíme k byretě, hladinu vody v byretě necháme v úrovni Tempské cely. Do spodního víka Tempské cely vložíme keramickou destičku a nasytíme vodou tak, aby nedošlo k vniknutí vzduchu. Utěsníme pomocí o – kroužků. Po té vložíme do Tempské cely Kopeckého váleček se vzorkem půdy, přiklopíme horní víko a pevně sešroubujeme. Umístěním byrety do požadované výšky zajistíme sycení vzorku vodou do ustáleného stavu. Na byretě odečítáme množství vody. Byretu snížíme o 10 cm a znovu odečítáme pokles hladiny v byretě až do ustáleného stavu. Dalším krokem je snížení o 30 cm a odečítání hladiny opět do ustáleného stavu. Teprve po té začneme působit přetlakem a měříme, kolik vody přiteklo do byrety (obr. 8). Získané hodnoty (body retenční křivky) vyneseme do grafu.



Obr. 8: Tempské cely v činnosti

### Vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení výsledků je nutné znát konečnou objemovou vlhkost  $\theta_k$  [ $L^3 L^{-3}$ ], kterou lze vypočítat pomocí rovnice (17):

$$\theta_k = \frac{(m_v - m_s) / \rho_w}{V_s} \quad (17)$$

kde  $m_v$  je hmotnost vlhké půdy [M],  $m_s$  je hmotnost suché půdy [M],  $\rho_w$  je hustota vody [ $M L^{-3}$ ] a  $V_s$  je objem vzorku [ $L^3$ ]. Pro získání tlakové výšky je nutné definovat  $\Delta\theta$  (18):

$$\Delta\theta = \frac{\Delta Q}{V_s} \quad (18)$$

kde  $\Delta Q$  je množství oteklé vody [ $L^3 T^{-1}$ ]. Odpovídající tlakovou výšku  $\theta_h$  je možné vypočítat z rovnice (19):

$$\theta_h = \theta_k + \sum \Delta\theta \quad (19)$$



Příklady naměřených hodnot demonstrují tab. 1 a 2. Zvýrazněné řádky v tab. 1 zobrazují postupné tlakové kroky. Poslední řádek v tab. 2 vyjadřuje konečnou objemovou vlhkost.

Tab. 1: Poklesy hladin v jednotlivých Tempských celách (TC 1 – 10) v závislosti na čase

Čas			Výška [cm]	Pokles hladiny [cm <sup>3</sup> ]									
Den	Hodina	Minuta		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10
0	8	47	10	47,1	46	43,2	41,8	40,5	47	44,3	46,9	45,2	44,3
0	8	49	10	47	45,8	43,1	41,6	40,2	46,9	44,2	46,7	44,4	44,1
0	8	51	10	46,9	45,7	43	41,5	40,1	46,8	44,1	46,7	43,9	43,8
0	8	57	10	46,7	45,3	42,6	41,1	39,6	46,6	43,9	46,5	42,6	43,3
0	9	2	10	46,6	45	42,4	40,9	39,4	46,6	43,7	46,4	42,3	43,1
0	9	15	10	46,2	44,4	41,9	40,3	39	46,4	43,5	46,1	41,7	42
0	10	35	10	45,6	44	40,6	39,6	38,8	43,2	43,2	45,3	41,4	40,9
0	10	53	10	45,5	44	40,4	39,4	38,7	46,2	43,2	45,2	41,3	40,8
0	11	21	10	45,5	43,9	40,2	39,4	38,7	46,1	43,2	45,2	41,3	40,8
0	16	34	10	45,4	43,8	40	38,2	38,6	45,8	43	44,9	41	40,6
1	8	44	30	45,3	43,7	40	39,2	38,6	45,5	43	44,8	40,5	40,5
1	8	46	30	45,1	43,5	39,7	38,9	38,3	45,4	42,8	44,6	39,5	40,2
1	8	43	30	45	43,4	39,7	38,7	38,2	45,3	42,7	44,6	38,8	40,1
1	9	14	30	44,4	42,2	38,8	37,8	37,8	44,9	42,2	44,2	36,2	38,8
1	10	26	30	43,2	40	36,9	35,8	37,5	44,5	41,9	43,3	34,1	37,8
1	11	18	30	42,2	39,1	35,6	34,2	37,4	44,4	41,8	42,5	33,3	37,4
1	14	0	30	40,7	38,1	33,9	32,8	37,4	44,3	41,7	39,9	32,8	37,1
1	15	15	30	40,2	38	33,5	32,5	37,3	44,2	41,6	38,8	32,7	37,1
2	9	16	30+20	39,6	37,9	32,8	32	37,1	44,1	41,4	35,5	32,6	36,8
2	9	18	30+20	39	37,7	32,6	31,7	36,8	44	40,3	34,7	32,1	36,3
2	9	20	30+20	38,5	37,5	32,6	31,6	36,7	44	40	34,6	31,8	36
2	9	31	30+20	37,9	36,8	32,2	31,1	35,2	43,2	39,1	34,2	30,8	35,1
2	10	3	30+20	36,8	35,8	31,5	29,9	32,5	42	37,7	33,3	29,3	33,8

Tab. 2: Množství odtklé vody při jednotlivých tlakových výškách a objemové vlhkosti

Výška h [cm]	Množství odtklé vody [cm <sup>3</sup> ]									
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10
1	-23,4	-23,5	-22,5	-24,8	-22,9	-18,7	-20,8	-28,1	-27,2	-23
10	-21,6	-21,2	-19,3	-22,2	-21	-17,2	-19,5	-26	-22,5	-19,2
30	-15,9	-15,4	-12,1	-15	-19,5	-15,8	-17,9	-16,7	-14,6	-15,5
50	-10,6	-11,4	-8,5	-10,1	-12,9	-10,3	-12,1	-9,8	-9,3	-10,8
100	-8,4	-8,6	-6,8	-7,9	-10,2	-8,2	-9,5	-7,7	-7,1	-8,6
170	-6,3	-6,5	-5,2	-5,9	-7,7	-6	-7	-5,6	-5,2	-6,2
250	-5,1	-5,2	-4,1	-4,8	-6,3	-4,9	-6	-4,6	-4,5	-5,3
350	-4,1	-4,2	-3,4	-3,9	-5	-4,1	-4,7	-3,7	-3,6	-4,3
500	-2,5	-2,7	-2,2	-2,5	-3,2	-2,6	-3	-2,4	-2,3	-2,7
1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Objemové vlhkosti [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]									
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10
	0,4891	0,4826	0,4785	0,4965	0,4801	0,4552	0,4654	0,5193	0,5085	0,4749
	0,4711	0,4596	0,4465	0,4705	0,4611	0,4402	0,4524	0,4983	0,4615	0,4369
	0,4141	0,4016	0,3745	0,3985	0,4461	0,4262	0,4364	0,4053	0,3825	0,3999
	0,3611	0,3616	0,3385	0,3495	0,3801	0,3712	0,3784	0,3363	0,3295	0,3529
	0,3391	0,3336	0,3215	0,3275	0,3531	0,3502	0,3524	0,3153	0,3075	0,3309
	0,3181	0,3126	0,3055	0,3075	0,3281	0,3282	0,3274	0,2943	0,2885	0,3069
	0,3061	0,2996	0,2945	0,2965	0,3141	0,3172	0,3174	0,2843	0,2815	0,2979
	0,2961	0,2896	0,2875	0,2875	0,3011	0,3092	0,3044	0,2753	0,2725	0,2879
	0,2801	0,2746	0,2755	0,2735	0,2831	0,2942	0,2874	0,2623	0,2595	0,2719
	0,2551	0,2476	0,2535	0,2485	0,2511	0,2682	0,2574	0,2383	0,2365	0,2449

### **3.2.2.3. Hydraulická vodivost půdy**

Schopnost půdy přenášet vodu je charakterizována hydraulickou vodivostí. Hydraulická vodivost půdy je jedna z nejdůležitějších hydraulických vlastností, která ovlivňuje pohyb vody v půdě (Šindelář a kol., 2008). Na hydraulické vodivosti závisí například infiltrace, nebo-li vsak vody do půdy. Infiltrace je zvláštním případem neustáleného proudění v nenasyčeném půdním prostředí. Základními infiltračními charakteristikami jsou rychlost (intenzita infiltrace – skutečná míra infiltrace za určitý čas) a velikost infiltrace (kumulativní infiltrace – celkové množství vody zasáklé do půdy za určitý čas) (Badalíková a Hrubý, 2008). V dnešní době jsou pro terénní stanovení k dispozici například diskové infiltrometry či jak uvádí Kutílek and Nielsen (1994), často se pro terénní infiltrační testy používá dvouválcové metody (metody soustředných válců), kdy vnější válec zajišťuje podmínky vertikální infiltrace pod váleci.

#### **Přístroje na měření hydraulické vodivosti**

Valla a kol. (2004) uvádí, že metodicky dělíme měření hydraulické vodivosti na laboratorní metody za nasycených a nenasyčených podmínek a na polní (terénní) metody pod hladinou a nad hladinou podzemní vody. V současné době bývá dávana přednost stanovení nasycené i nenasyčené hydraulické vodivosti přímo v terénu před laboratorním stanovením.

#### **3.2.2.3.1. Metody pro stanovení nasycených hydraulických vodivostí**

Laboratorní metody měření nasycené hydraulické vodivosti jsou založeny na přístrojích s konstantním rozdílem horní a dolní hladiny – přístroj s konstantním spádem nebo nekonstantním rozdílem hladin – přístroj s proměnným spádem. Neporušený vzorek půdy je na počátku nasycen vodou za působení konstantního tlaku vody na spodním okraji vzorku. Po nasycení je na horním okraji aplikována tlaková výška, která je větší než tlaková výška na spodním okraji. Rozdílnými tlakovými výškami je vyvolán průtok vody půdním vzorkem. V případě, že jsou hladiny udržovány na stejné úrovni a rozdíl tlakových výšek  $h$  je konstantní, jedná se o přístroj s konstantním spádem. V případě, že dochází k poklesu tlakové výšky na horním okraji a tedy ke změně rozdílů tlakových výšek, jedná se o přístroj s proměnným spádem.

V terénu je možné nasycené hydraulické vodivosti stanovit pomocí dvouválcové výtopové infiltrace, tlakovým permeametrem (propustoměrem) a Guelphským, permeametrem. V případě výskytu hladiny podzemní vody lze nasycenou hydraulickou

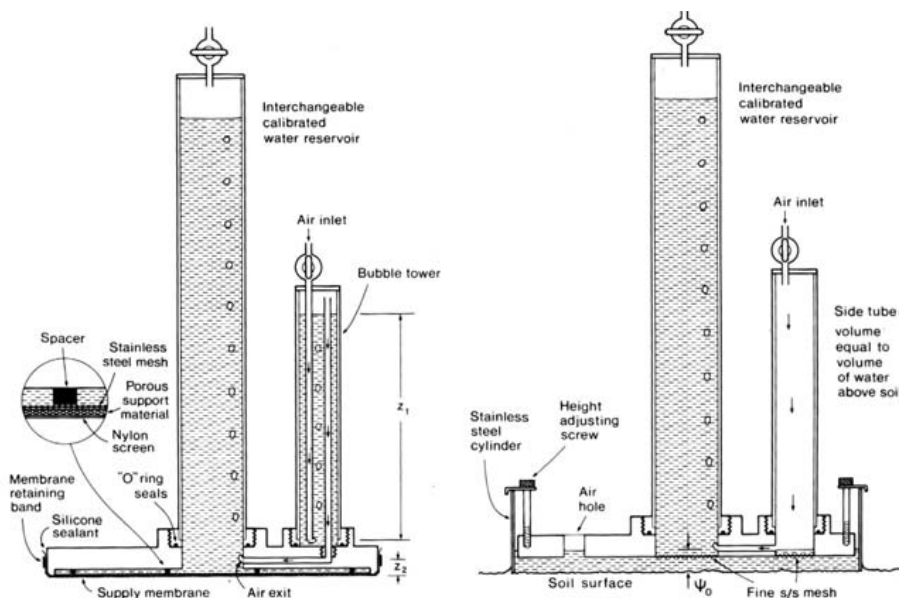
vodivost nasycené části půdního profilu stanovit jednosondovou a piezometrickou metodou (Kodešová, 2005).

### 3.2.2.3.2. Metody pro stanovení nenasyčených hydraulických vodivostí

Mezi laboratorní metody stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti patří crust metoda. Crust metoda je založena na podobném principu jako metoda konstantního spádu. Principem metody je, že pomocí méně propustné vrstvy je uvnitř měřeného půdního vzorku dosaženo rovnovážného nenasyčeného proudění (Kodešová, 2005).

V terénu je možné nenasyčené hydraulické vodivosti stanovit například podtlakovým diskovým permeametr (obr. 9). Důležitými součástmi diskového permeamtru jsou zásobník vody, membrána propouštěcí vodu (keramická destička) a probublávací věž. Diskový permeametr je na půdní povrch umístěn tak, aby byl zajištěn dokonalý kontakt membrány s půdou.

V této práci jsem použila k terénnímu měření hydraulické vodivosti MiniDiskový Infiltrometr (zjednodušený klasický diskový permeametr z obr. 9) a Guelphský permeametr, proto se o těchto přístrojích a metodice měření zmíním podrobněji.



Obr. 9: Klasický diskový permeametr a přetlakový permeametr (Perroux and White, 1988)

### 3.3. Terénní měření hydraulické vodivosti pomocí infiltračních pokusů

#### 3.3.1. Mini Disk Infiltrometer (MDI)

Mnoho autorů potvrzuje, že MDI umožňuje rychlé a přesné měření nenasycené hydraulické vodivosti půdy  $K(h)$  v terénu i v laboratoři. Například Lawrence and Hornberger (2007) využili MDI k měření in situ hydraulické vodivosti. Zkoumali variabilitu vlhkosti půdy v různých klimatických zónách. Také Lichner et al. (2007a) ve své studii o zhodnocení vlivu vegetace na hydraulické vlastnosti písčité půdy využívají diskový infiltrometr. Diskovým infiltrometrem provedli měření nenasycené hydraulické vodivosti  $K(h)$  písčité půdy s rozdílnou vegetací na lokalitě Mláky II v jihovýchodním Slovensku. Kromě toho, někteří autoři použili MDI pro stanovení vodoodpudivosti půdy. Robichaud et al. (2008) provedli zajímavý několikaletý srovnávací test. Porovnávali vhodnost dvou metod vedoucích ke stanovení vodoodpudivosti půdy – MDI test a water drop penetration time (WDPT) test. Zjistili, že měření MDI je rychlou efektivní technikou pro stanovení vodoodpudivosti půdy i infiltrační schopnosti půdy. Navíc je tato technika kompatibilní s WDPT a že korelace mezi WDPT a MDI byla velmi vysoká tam, kde se projevila silná vodoodpudivost půdy. Lewis et al. (2006) uvádějí, že měření v terénu MDI je vhodnou metodou k zjištění hydraulické vodivosti půdy i vodoodpudivosti. Ve své publikaci se též zabývají problematikou kompatibility měření hydraulických vlastností oběma testy (MDI a WDPT). Lichner et al. (2007b) zkoumali vliv rozdílného vegetačního pokryvu na pohyb vody v půdě. Ke svému polnímu i laboratornímu pokusu využili MDI. V obou měřeních ověřili zřetelný vliv rozdílného vegetačního pokryvu na pohyb vody v půdě. Také Daniels et al. (2009) využili ve svém laboratorním experimentu MDI ke stanovení hydraulických vlastností půdy (především vodoodpudivosti) po aplikaci přípravku Zycosoil.

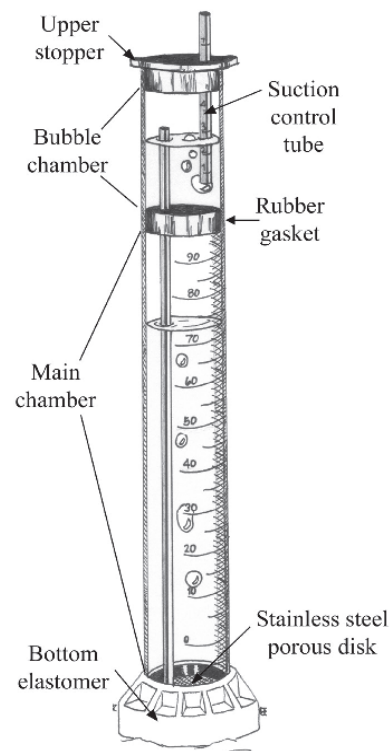
#### Popis MDI

MDI se skládá ze dvou částí (obr. 10). V horní části - probublávací věži - se nachází polykarbonátová trubička, která slouží k nastavení podtlaku v rozmezí 0,5 – 6 cm. MDI je používán pro měření hydraulické vodivosti matričních pórů, tj. jsou-li vyloučeny póry gravitační. Rozmezí je dáno hodnotou tlakové výšky  $h_0$  [L], která se pro jednotlivé půdy liší. Nejčastěji je však užívána hodnota  $h_0 = -2$  cm. Probublávací věž je shora uzavřena gumovou zátkou. Horní a dolní části jsou od sebe odděleny těsnící přepážkou. Spodní část se nazývá zásobník vody. Tato část je ze spodu zajištěna ocelovým diskem se semipermeabilní nerezovou (porézní) membránou a je opatřena stupnicí. V zásobníku vody se nachází

polykarbonátová Mariottova trubička. Parametry MDI jsou uvedeny v tab. 3. (Decagon, 2007).

Tab. 3: Parametry Mini Disk Infiltrometru

Celková délka infiltrometru	32,7 cm
Průměr komor	3,1 cm
Objem zásobníku vody	135 ml
Průměr disku	4,5 cm
Tloušťka membrány disku	3 mm
Délka zásobníku vody	21,2 cm
Délka kontrolní trubičky	10,2 cm
Délka Mariottovy trubičky	28 cm
Nastavení podtlaku	0,5 – 7 cm



Obr. 10.: schema Mini Disk Infiltrometer (Decagon, 2007)

### Postup měření

Na kruhovém infiltrometru odklopíme horní zátku a probublávací věž naplníme vodou až k vrchnímu konci polykarbonátové trubičky. Vratíme zátku zpět a kontrolní trubičku podtlaku zasuneme dolů, až dosedne na těsnící přepážku, po té infiltrometr otočíme. Opatrně z probublávací věže sejmeme polopropustnou nerezovou membránu a naplníme zásobník vodou až po okraj. Nerezovou membránu nasadíme zpět na infiltrometr a otočíme do původní polohy (Šindelář a kol., 2008). Před samotným měřením upravíme povrch experimentální plochy následujícím způsobem: špachtlí seřízneme povrch půdy do roviny a sítem o průměru ok 2 mm vytvoříme vrstvu 1 mm ze seříznuté zeminy tak, aby byl docílen co nejlepší kontakt MDI a půdy. Měření začíná ve chvíli, kdy je MDI umístěn na půdní povrch (dojde ke kontaktu



Obr.:11:MDI-při měření

porézní membrány a půdního povrchu). Ještě před umístěním MDI na půdní povrch nastavíme v probublávací věži podtlak (pro tento experiment  $h = -2$  cm), (obr. 11). Od této chvíle dochází k infiltraci vody do půdy a zapisujeme čas vždy při odečtu poklesu hladiny. Malý průměr MDI umožňuje nezkršené měření na relativně nestejnorožném půdním povrchu (Decagon, 2007).

### Vyhodnocení výsledků

Stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti půdy použitím diskového infiltrometru zjednodušil Zhang (1997). Teoretické stanovení infiltrace popisuje Richardsova rovnice (3). Kromě numerických řešení Richardsovy rovnice existují zjednodušená analytická řešení. Zhang (1997) vycházel ze základní rovnice infiltrační křivky, odvozenou Philipem (1968), jejímiž parametry jsou sorptivita půdy a druhá odmocnina času infiltrace, která nezahrnuje účinky gravitace (20):

$$I = S * t^{1/2} \quad (20)$$

kde  $I$  je kumulativní infiltrace (příjem) vody na jednotku plochy [L],  $t$  je čas [T], a  $S$  je sorptivita půdy [ $L T^{-1/2}$ ]. Tato rovnice je platná pouze během velmi krátké doby infiltrace a pouze pro vertikální tok vody v půdě. Zhang (1997) ve své studii použil dvoučlennou matematickou rovnici, charakterizující infiltrační proces pod kruhovým infiltrometrem (Dane and Topp, 2002) (21):

$$I = C_1 t + C_2 t^{1/2} \quad (21)$$

kde  $C_1$  [ $L T^{-1}$ ] a  $C_2$  [ $L T^{-1/2}$ ] jsou parametry funkce. Tyto parametry se vztahují k hydraulické vodivosti půdy a k sorptivitě půdy podle rovnic (22) a (23):

$$C_1(h_0) = A_1 K(h_0) \quad (22)$$

$$C_2(h_0) = A_2 S(h_0) \quad (23)$$

kde  $A_1$  a  $A_2$  jsou bezrozměrné koeficienty a  $h_0$  ( $\leq 0$ ) je aplikovaný podtlak (v mém pokusu  $h_0 = -2$  cm).

Úpravou rovnice (22) dostaneme rovnici pro výpočet hydraulické vodivosti půdy  $K(h_0)$  (24):

$$K(h_0) = C_1 / A_1 \quad (24)$$

kde parametr  $C_1$  je získán při úpravě naměřených hodnot kumulativní infiltrace vody v závislosti na druhé odmocnině času pomocí rovnice (21).  $C_1$  je parametr funkce související s hydraulickou vodivostí. Koeficient  $A_1$  je proměnlivý s celkovou dobou infiltrace. Avšak proměnlivost koeficientu se s narůstajícím časem měření infiltrace zmenšuje na hodnoty, které mohou být považovány za ustálené. Pak  $A_1$  je považován za konstantu.

Pro koeficient  $A_1$  jako funkci parametru retence půdy, infiltrace a počáteční vlhkosti půdy byly pevně stanoveny početní empirické vztahy. Zhang (1997) ve své studii popsal tři typy stanovení koeficientu  $A_1$  podle rozdílné retenční funkce půdy. Van Genuchtenův typ, Russeho typ a Zhang-Genuchtenův typ. Všechny tři typy stanovení koeficientu  $A_1$  jsou závislé na retenčních parametrech půdy, aplikovaném podtlaku infiltrometru, poloměru kruhového infiltrometru a počáteční vlhkosti půdy.

Výpočet parametru  $A_1$  pro stanovení hydraulické vodivosti půdy pro Mini Disk infiltrometr byl proveden podle van Genuchtenova typu (25) a (26):

$$A_1 = \frac{11,65(n^{0,1} - 1) * \exp[2,92(n - 1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad \text{pro } n \geq 1,9 \quad (25)$$

$$A_1 = \frac{11,65(n^{0,1} - 1) * \exp[7,5(n - 1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad \text{pro } n < 1,9 \quad (26)$$

kde  $n$  a  $\alpha$  jsou retenční půdní parametry,  $h_0$  ( $\leq 0$ ) je aplikovaný podtlak [L] a  $r_0$  je poloměr kruhového infiltrometru [ $L^2$ ].

Podle rovnic (25) a (26) byly pro kruhový infiltrometr Mini Disk s poloměrem  $r_0 = 2,2$  cm stanoveny hodnoty parametru  $A_1$  pro 12 základních půdních druhů a pro rozdílný nastavitelný podtlak infiltrometru  $h_0$  (tab. 4) (Decagon, 2007).

Tab. 4: Vypočtené hodnoty parametru  $A_1$  pro 12 základních půdních druhů a pro rozdílnou podtlakovou výšku infiltrometru  $h_0$  podle van Genuchtenových rovnic (Decagon, 2007)

Texture	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]	$h_0$ [cm]						
			-0,5	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-5,0	-6,0
			$A_1$						
sand	0,145	2,68	2,9	2,5	1,8	1,3	0,9	0,7	0,5
loamy sand	0,124	2,28	3,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4
sandy loam	0,075	1,89	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1
loam	0,036	1,56	5,6	5,8	6,4	7,0	7,7	8,4	9,2
silt	0,016	1,37	8,1	8,3	8,9	9,5	10,1	10,8	11,5
silty loam	0,02	1,41	7,2	7,5	8,1	8,7	9,4	10,1	10,9
sandy clay loam	0,059	1,48	3,3	3,6	4,3	5,2	6,3	7,6	9,1
clay loam	0,019	1,31	6,0	6,2	6,8	7,4	8,0	8,7	9,5
slity clay loam	0,01	1,23	8,1	8,3	8,7	9,1	9,6	10,1	10,6
sandy clay	0,027	1,23	3,4	3,6	4,2	4,8	5,5	6,3	7,2
slity clay	0,005	1,09	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3
clay	0,008	1,09	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,1	5,3

Tab. 5: Příklad naměřených hodnot MDI pro  $h_0 = -2$  cm

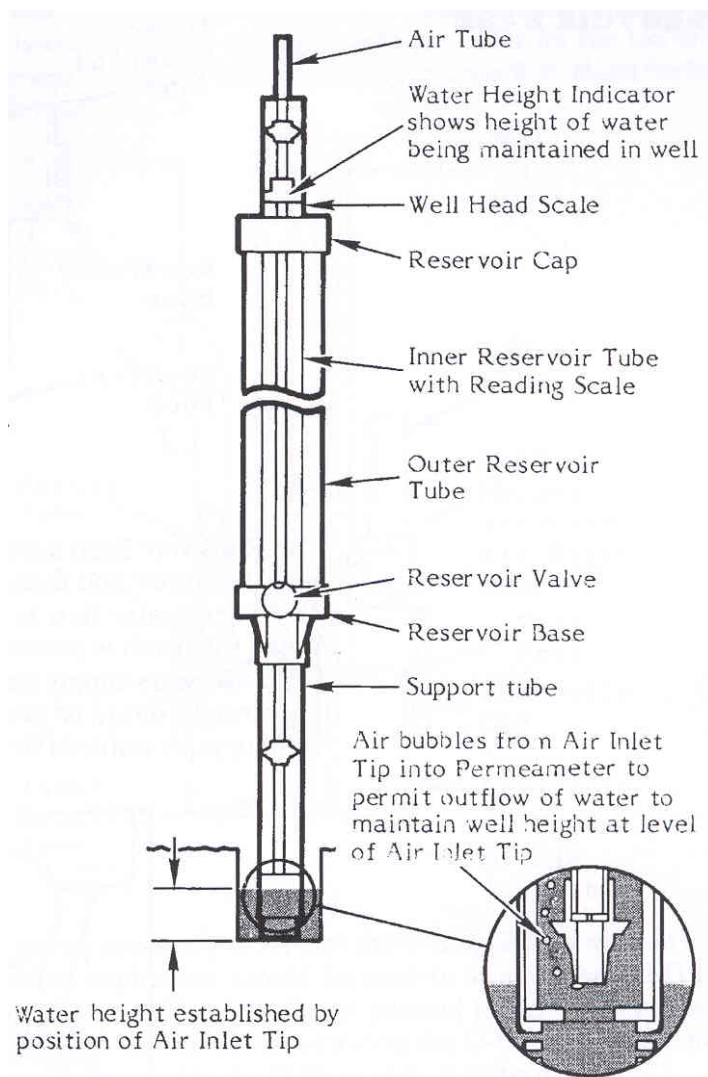
minuty	sekundy	suma min	čas [min]	V [cm <sup>3</sup> ]	I [cm]	odm. t
0	5	0,08	0,00	80	0,00	0,00
0	15	0,25	0,17	78	0,13	0,41
0	31	0,52	0,43	76	0,26	0,66
0	56	0,93	0,85	74	0,39	0,92
1	10	1,17	1,08	72	0,53	1,04
1	25	1,42	1,33	71	0,59	1,15
1	35	1,58	1,50	70	0,66	1,22
1	52	1,87	1,78	68	0,79	1,34
2	22	2,37	2,28	66	0,92	1,51
2	47	2,78	2,70	64	1,05	1,64
3	29	3,48	3,40	61	1,25	1,84
4	14	4,23	4,15	58	1,45	2,04
4	36	4,60	4,52	56	1,58	2,13
5	22	5,37	5,28	53	1,78	2,30
5	37	5,62	5,53	52	1,84	2,35

Naměřené hodnoty (tab. 5) lze graficky vyjádřit v grafu zobrazujícím závislost kumulativní infiltrace vody [cm] na druhé odmocnině času [min<sup>1/2</sup>]. Naměřené hodnoty proložíme křivkou se zobrazením rovnice včetně hodnoty  $R^2$ . Z rovnice křivky vyjádříme parametr funkce  $C_1$  související s hydraulickou vodivostí půdy. Podle půdního druhu a nastavené hodnoty  $h_0$  určíme z tab. 4 koeficient  $A_1$ . Pak po dosazení do vzorce (24) vypočteme hydraulickou vodivost půdy  $K$  pro nastavenou tlakovou výšku  $h_0$ .



### 3.3.2. Guelphský Permeometr (GP)

GP je zařízení pro měření nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s = K(\theta_s)$ ) půdy fungující na principu Mariottovy láhve. Poskytuje rychlou a jednoduchou terénní metodu pro měření této hydraulické charakteristiky (Soilmoisture, 2008). Aplikace GP pro měření nasycené hydraulické vodivosti ve vadózní zóně bylo předmětem mnoha studií, např. Elrick et al. (1989), Amoozegar (2002), Murray et al. (2003).



#### Popis GP

GP se skládá ze vzduchové trubice (regulátoru vodní hladiny), zátky s O-kroužkem, rezervoáru vody, který slouží jako zásobárna vody a ke sledování rychlosti infiltrace, když je GP v činnosti. Rezervoár se skládá z vnitřního a vnějšího válce – oba jsou opatřeny stupnicí a zakončeny ventilem. Dále z nosné roury (zakončené výpustí vody), která vede vodu z rezervoáru do výtopové sondy a vzduchové trubičky na vytvoření vodní hladiny (výtopy) v sondě (obr. 12). Je nutné zajistit konstantní, nekolísavou hladinu v sondě. Ke stabilizaci zařízení slouží trojnožka. Parametry GP jsou uvedeny v tab. 6. (Soilmoisture, 2008)

Obr. 12: Schema Guelphského Permeometru (Soilmoisture, 2008).

Tab. 6: Parametry Guelphského Permeamtru

Průměr sondy	6 cm
Výška výtopy v sondě	2,5 cm – 25 cm
Rozsah hydraulické vodivosti	$10^{-4} - 10^{-7} \text{ cm s}^{-1}$
Kapacita permeamtru	3,18 l
Rozsah měřených hloubek	15 – 75 cm
Průřezová plocha zásobníku (kombinovaná a vnitřní)	$X = 35, 22 (\pm 1 \%), Y = 2,16 (\pm 2 \%)$

### Postup měření

Půdním vrtákem vyhloubíme sondu o požadované hloubce a známém průměru. Správný průměr a tvar sondy zajistíme tvarovacím vrtákem. Protože při vrtání a úpravě sondy může dojít k uhlazení povrchu a tudíž ke snížení infiltrace v sondě, upravíme sondu nakonec štětkou, abychom uhlazený povrch jemně narušili. Po té nad sondu umístíme trojnožku. Sestavíme zařízení dle manuálu od výrobce. Zásobník permeamtru naplníme vodou a sestavené zařízení opatrně umístíme do trojnožky (obr. 13) a zajistíme tak, aby došlo ke kontaktu permeamtru se dnem sondy (obr. 14). Pomocí trubice zajišťující přístup vzduchu je nastavena hladina vody v sondě (konstantní tlaková výška). Pokud měříme ve vysoce propustných půdách, používáme stupnici na vnějším válci, pokud měříme naopak půdy málo propustné, sledujeme stupnici na vnitřním válci. Průtok



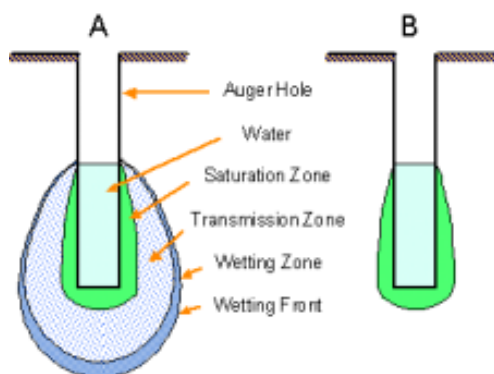
Obr. 13: Kontakt permeamtru

vody ve válcích ovlivňujeme otočením ventilu s drážkou. Ve zvolených intervalech zapisujeme pokles hladiny ve válci.



Obr. 14: Sestavený GP se sondou

Po ustanovení konstantní hladiny v sondě dojde k nasycení zóny kolem výtopy (obr. 15). Tato vrstva je teoreticky stálá a závisí na půdním typu, průměru sondy a výšce vody v sondě. Čelo zvlhčení se však šíří.



Obr. 15: Schéma okolo výtopy v ustáleném stavu (A) a během počátečního stadia infiltrace (B) (Amoozegar, 2002)

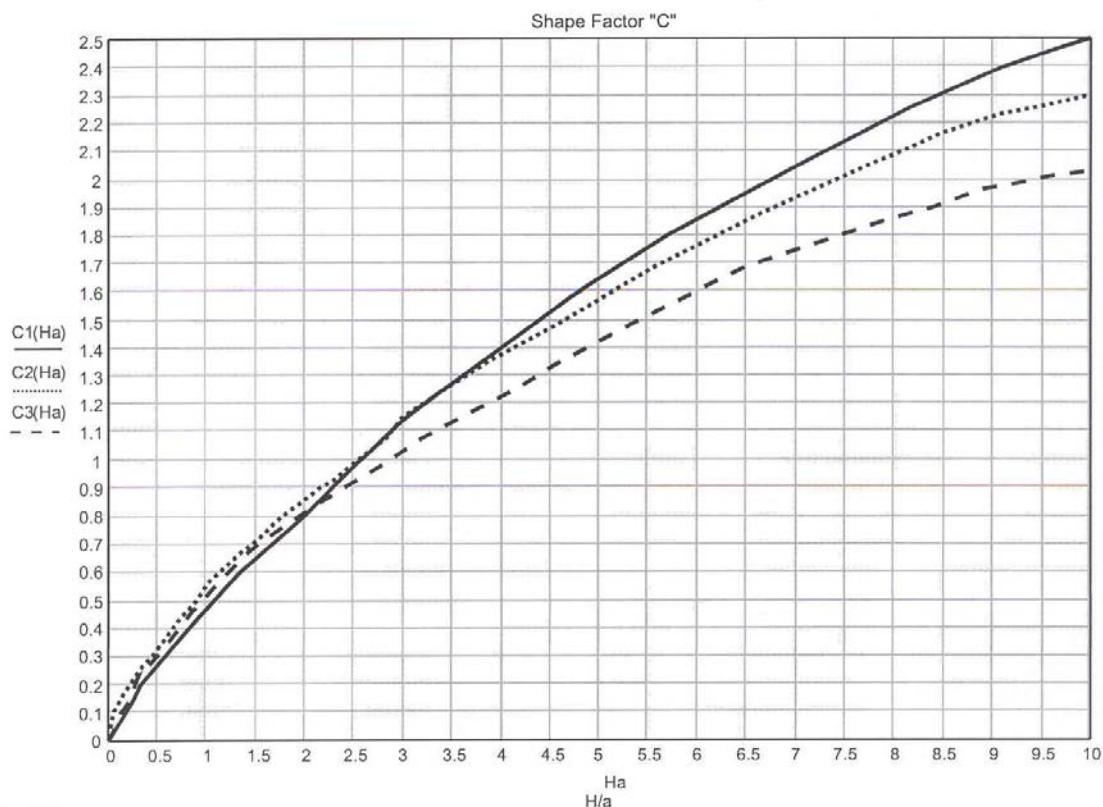
### Vyhodnocení výsledků

Transport vody v půdě lze vyjádřit Darcyho rovnicí (2). Pokud je porézní materiál nasycen, pak hodnota  $K(h)$  je rovna nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$  [ $L T^{-1}$ ].

Soilmoinsture (2008) uvádí, že nasycená hydraulická vodivost  $K_s$  může být vypočtena z jedné hodnoty aplikovaného tlaku  $H$  a jedné ustálené infiltrační schopnosti a podle Elricka et al. (1989) lze použít následující rovnici (27):

$$K_s = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha}}, \quad Q = RA \quad (27)$$

kde  $C$  je bezrozměrný tvarový koeficient závisící na  $H/a$  a na parametru  $\alpha$  (obr. 16),  $Q$  je ustálený infiltrační tok [ $L^3 T^{-1}$ ]  $A$  je vnější/vnitřní průřezová plocha zásobníku vody GP [ $L^2$ ],  $R$  je ustálený pokles hladiny v zásobníku za časovou jednotku [ $L T^{-1}$ ],  $a$  je poloměr sondy [ $L$ ] a  $\alpha$  je parametr charakterizující půdní strukturu [ $L^{-1}$ ] (tab. 7).



Obr. 16: Tvarový koeficient  $C_1$  (Soilmoisture, 2008)

Pro potřeby experimentu byl použit koeficient  $C_1$ , který je charakterizován parametrem  $\alpha \geq 0,12 \text{ cm}^{-1}$  (tab. 5) (Soilmoisture, 2008).

Tab. 7: Kategorie půdní struktury dle parametru  $\alpha$  (Soilmoisture, 2008)

Soil Texture - Structure Category	$\alpha^*$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
Compacted, structureless, clayey or silty materials such as landfill caps and liners, lacustrine or marine sediments, etc.	0.01
Soils which are both fine textured (clayey or silty) and unstructured; may also include some fine sands.	0.04
Most structured soils from clays through loams; also includes unstructured medium and fine sands. The category most frequently applicable for agricultural soils.	0.12
Coarse and gravelly sands; may also include some highly structured soils with large and/or numerous cracks, macropores, etc.	0.36

Pro výpočet koeficientu  $C_1$  a parametru  $\alpha \geq 0,12$  uvádí Soilmoisture (2008) rovnici (28):

$$C_1 = \left( \frac{H/a}{2,074 + 0,093(H/a)} \right)^{0,754} \quad (28)$$

po dosazení ( $H = 5$ ,  $a = 3$ ) do rovnice (28) lze vypočítat koeficient  $C_1 = 0,8032$ .

Dosazením  $C_1, H, a, \alpha$  do rovnice (28) lze získat rovnici (29) pro  $K_s$ :

$$K_s = 1,82 * 10^{-3} Q \quad (29)$$

Průtok  $Q$  získáme jako průměr posledních 3 – 5 hodnot (tab. 8).

Tab. 8: Příklad naměřených hodnot GP

minuty	sekundy	suma min	čas [min]	V [cm <sup>3</sup> ]	prům.čas [min]	Q [cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> ]
0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00
0	17	0,28	0,28	98,62	0,14	348,06
0	33	0,55	0,55	133,84	0,42	132,08
1	5	1,08	1,08	169,06	0,82	66,04
2	2	2,03	2,03	204,28	1,56	37,07
3	52	2,87	2,87	239,50	2,45	42,26
4	49	3,82	3,82	274,72	3,34	37,07
6	56	4,93	4,93	309,94	4,38	31,54
7	21	6,35	6,35	345,16	5,64	24,86
9	58	7,97	7,97	380,38	7,16	21,79
11	41	9,68	9,68	415,60	8,83	20,52
13	35	11,58	11,58	450,82	10,63	18,54
15	28	13,47	13,47	486,04	12,53	18,70
17	33	15,55	15,55	521,26	14,51	16,91
19	37	17,62	17,62	556,48	16,58	17,04

Naměřené hodnoty lze graficky vyjádřit v grafu zobrazujícím průtok  $Q$  [cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>] a průměrný čas [min].

#### 4. Materiál a metoda

Pro zjištění vlivu kompostu na hydraulické vlastnosti půdy byly provedeny dva experimenty: laboratorní (nádobový) a polní (maloparcelový) experiment. Nádobový experiment sloužil ke stanovení nenasyčených hydraulických vodivostí  $K(h=-2)$  Mini Disk Infiltrometry na porušených, uměle připravených vzorcích směsi kompostu a půdy a ke stanovení průběhu retenčních čar těchto vzorků Tempskými celami. Polní experiment sloužil ke stanovení nenasyčených hydraulických vodivostí  $K(h=-2)$  Mini Disk Infiltrometry, ke stanovení nasycených hydraulických vodivostí  $K_s$  Guelphským permeametrem a ke stanovení průběhu retenčních čar. Přístroje a stanovení daných charakteristik jsou podrobně popsány v předcházejících kapitolách.

##### 4.1. Stanovení hydraulických vlastností nádobovým pokusem

Hydraulické vlastnosti uměle připravené směsi kompostu a půdy byly zjišťovány v březnu 2009 krátkodobým nádobovým pokusem v laboratoři Katedry pedologie a ochrany půd. Směs půdy a kompostu byla namíchána ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky, v. v. i. v Praze Ruzyni. Směs byla mísená v bubnové míchačce po dobu 3 minut a bylo vytvořeno 8 variant (tab. 9) s různým zastoupením kompostu ve třech opakováních.

Tab. 9: Obsah kompostu ve směsi

Varianta	Podíl kompostu (% celkové hmotnosti směsi)
A	1
B	2
C	3
D	4
E	5
F	6
G	7
H	8

##### Půda

K provedení experimentu byla vybrána půda z areálu Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. Praha – Ruzyně. Tato půda tvoří přechod mezi půdním typem hnědozem a půdním typem černozem luvická. Půdotvorným substrátem je spraš na křídové opuce. Půdní druh lze charakterizovat přechodem mezi půdou hlinitou až jílovitohlinitou. Klimatický region zvoleného pokusného pozemku lze charakterizovat jako mírně teplý, suchý, s mírnou zimou.

Průměrná roční teplota je 8,2 °C (průměr v červenci 17,9 °C; v lednu - 2,2 °C). Průměrný roční úhrn srážek činí 526 mm, maximum měsíčních srážek připadá na měsíc červenec; průměrný počet dnů se sněhovou pokrývkou se pohybuje v rozmezí 35 až 40; průměrná vrstva sněhu je 50 mm a nadmořská výška pokusného pozemku je 330 m.

### **Aplikovaný kompost**

Výroba kompostu byla provedena na experimentální kompostárně VÚZT, v. v. i. umístěné v areálu VÚRV, v. v. i. (obr. 17). Kompostárna se zde nachází na oplocené ploše o rozměrech cca 60 m x 10 m. Na kompostárně je ke zpracovávání zbytkové biomasy, resp. bioodpadů využívána technologie řízeného kompostování v pásových hromadách na volné ploše. Na kompostárně byl vyroben kompost vyhovující kvality využitelný v experimentech zaměřených na zlepšení fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností vybraných půd. Hlavními surovinami při zakládání kompostů byly: posečená čerstvá tráva z údržby areálu VÚRV, v. v. i, listí, štěpka, nadsítná frakce a omezené množství slámy. Jako hlavní technické prostředky jsou využívány: univerzální čelní nakladač UNC – 060, nakládací lopata o geometrickém objemu 0,375 m<sup>3</sup> (vrstvení a urovnávání hromady), štěpkovač PEZZOLATO PZ 110 (drcení některých kompostovaných surovin), překopávač kompostu OSTRATICKÝ NPK 250H (překopávání kompostu), vibrační síto deskové VSD – 01 (prosévání kompostu), pásový dopravník RM9 -19 (prosévání kompostu), traktor Zetor Z 5245 s přívěsem (převoz



surovin, popř. kompostu) a automobil AVIA 31 pro kontejnerovou dopravu (převoz surovin, popř. kompostu). Na každé hromadě kompostu probíhalo pravidelné měření teplot a obsahu vzdušného kyslíku podle zpracované metodiky

Obr. 17: Experimentální kompostárna VÚZT, v. v. i.

## Válce

K experimentu byly použity válce z tvrdého plastu o průměru 15 cm a výšce 22 cm, zesponu zajištěny netkanou textilií (obr. 18). Válce byly nahutněny směsí půdy a kompostu do výšky 20cm (obr. 19).



Obr. 18: Válce zajištěné netkanou textilií



Obr. 19: Nahutněné válce pro experiment

## Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K (h=-2)$ pomocí MDI

Pro měření nenasyčených hydraulických vodivostí  $K (h=-2)$  pomocí MDI (obr. 20) byla provedena dvě měření na každém válci. První měření (obr. 21) bylo provedeno ihned po nahutnění válců a druhé měření probíhalo po vyschnutí vzorků. Celkem byla každá varianta změřena 6 krát.



Obr. 20: MDI připravené pro měření



Obr. 21: MDI při měření



## Laboratorní stanovení průběhu retenčních čar pomocí Tempských cel

Z každé varianty (tab. 9) byly odebrány 3 vzorky pomocí Kopeckého válečku (100 cm<sup>3</sup>) pro stanovení retenčních čar v Tempských celách.

### 4.2. Stanovení hydraulických vlastností maloparcelovým polním pokusem

#### Charakteristika pozemku

K maloparcelovému pokusu byl zvolen pozemek v areálu VÚRV, v. v. i. Praha – Ruzyně. Klimatický region zvoleného pokusného pozemku lze charakterizovat stejně jako ve výše uvedeném nádobovém pokusu jako mírně teplý, suchý, s mírnou zimou. Genetickým půdním typem je černozem luvická a půdotvorným substrátem je spraš na křídové opuce. Půdní druh lze charakterizovat přechodem mezi půdou hlinitou a jílovitohlinitou (ČSN 46 5302) – průměrný obsah zrn menších než 0,01 mm je 44,2 %.

#### Rozvržení pozemku

Pokus byl navržen jako maloparcelový polní pokus s opakováním 4 variant (obr. 22). Jednotlivé parcely měly rozměry 3 x 3 m, mezery mezi pokusnými čtverci byly 0,5 m. Každá varianta byla provedena v šesti opakováních. Na vyměřených parcelách byly před zapravením příslušných stupňovaných dávek kompostů odebrány neporušené půdní vzorky ke stanovení základních fyzikálních vlastností (březen 2008).

Tab. 10: Dávky kompostů zapravované do půdy

Varianta	Dávka kompostu (t ha <sup>-1</sup> )
K	0
D1	124
D2	239
D3	478

Na pokusný pozemek byl v dubnu 2008 aplikován kompost (vlhkost kompostu v době aplikace 38 % hm.) ve zvolených dávkách (tab. 10) a dle předem navrženého schématu (obr. 22 a obr. 23). Kompost byl zapraven do půdy při celoplošném zpracování pokusné plochy

rotačním kypřičem s horizontálním nožovým rotorem. Ornice byla při této pracovní operaci zpracována do hloubky cca 150 mm.

	A	B	C
I. 1	D1	D2	D3
2	D2	D3	K
3	D3	K	D1
4	K	D1	D2
5	D1	K	D3
6	D2	D1	K
II. 7	D3	D2	D1
8	K	D3	D2

Obr. 22: Schéma uspořádání pokusných variant s opakováním



Obr. 23: Maloparcelový polní pokus těsně po aplikaci kompostu, duben 2008

### **Aplikovaný kompost**

Výroba kompostu byla provedena v roce 2008 na experimentální kompostárně VÚZT, v. v. i. umístěné v areálu VÚRV, v. v. i. stejně jako v nádobovém experimentu.

#### 4.2.1. Měření hydraulických vodivostí v terénu

Hydraulické vodivosti půdy byly v terénu měřeny pomocí Mini Disk Infiltrometrů (nenasyčené hydraulické vodivosti  $K(h=-2)$ ) a Guelphského permeometru (nasyčené hydraulické vodivosti  $K_s$ ). Měření na pozemku probíhalo během srpna 2009. Před měřením byl na políčko aplikován herbicidní prostředek ROUNDUP (obr. 24) a po té odstraněn plevel. Pozemek je udržován bez vegetačního pokryvu.



Obr. 24: Maloparcelový polní pokus po aplikaci ROUNDUPu, červenec/srpen 2009

#### Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K(h=-2)$ pomocí MDI

Měření pomocí MDI probíhalo na každé parcele ve 3 opakováních (obr. 25). Každá varianta (tab. 10) byla změřena 18 krát.



Obr. 25: Měření pomocí MDI ve 3 opakováních

### **Měření nasycených hydraulických vodivostí Ks pomocí GP**

Měření pomocí GP bylo plánováno stejně jako měření s využitím MDI – na každé parcele ve 3 opakováních, ale z důvodu minimálního porušení půdy bylo měření provedeno jen na několika parcelách. Byly změřeny varianty/rozmístění K/6, K/8, D1/6, D1/7, D2/7, D2/8, D3/7, D3/8 ve třech opakováních.

### **Laboratorní stanovení průběhů retenčních čar**

Z varianty s největším podílem kompostu – D3 a z kontrolní varianty bez kompostu - K (tab. 10) byly odebrány 3 vzorky půdy pomocí Kopeckého válečků (100 cm<sup>3</sup>), z ostatních variant (D1, D2) byly odebrány 2 vzorky pro stanovení retenčních čar v Tempských celách.

### **Statistické vyhodnocení**

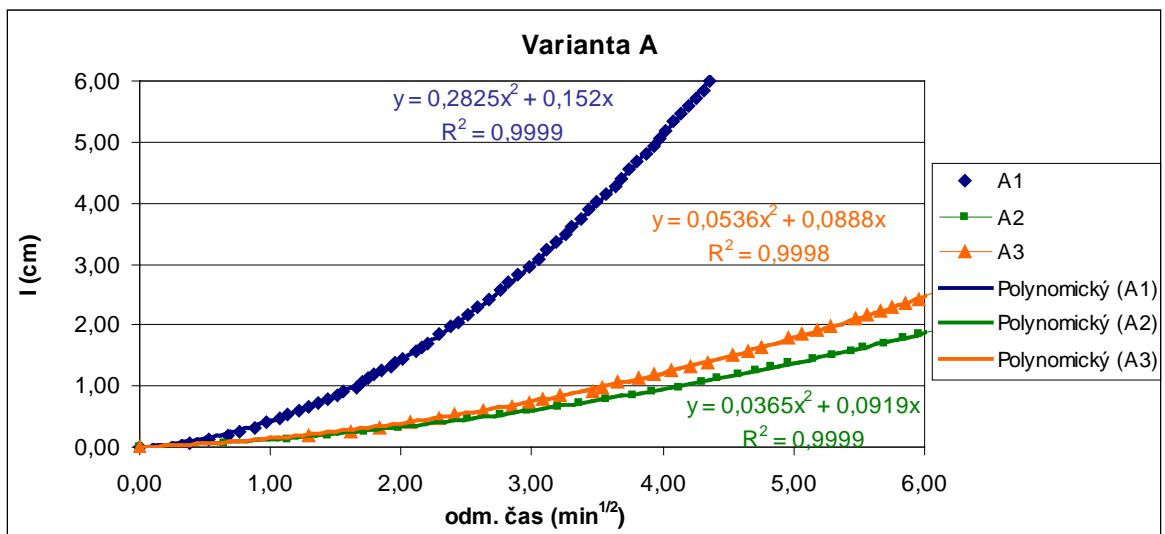
Statistické vyhodnocení bylo provedeno v programu STATISTICA ver. 9 (StatSoft, Inc. 2009). Pro všechna data zahrnutá v této práci byly vypočteny základní popisné statistiky (průměr, minimum, maximum, rozptyl, směrodatná odchylka). K vyhodnocení vlastních pokusů byla použita jednofaktorová ANOVA (analysis of variance). Pro jednotlivé experimenty byly dále vytvořeny krabicové grafy.

## 5. Výsledky a diskuze

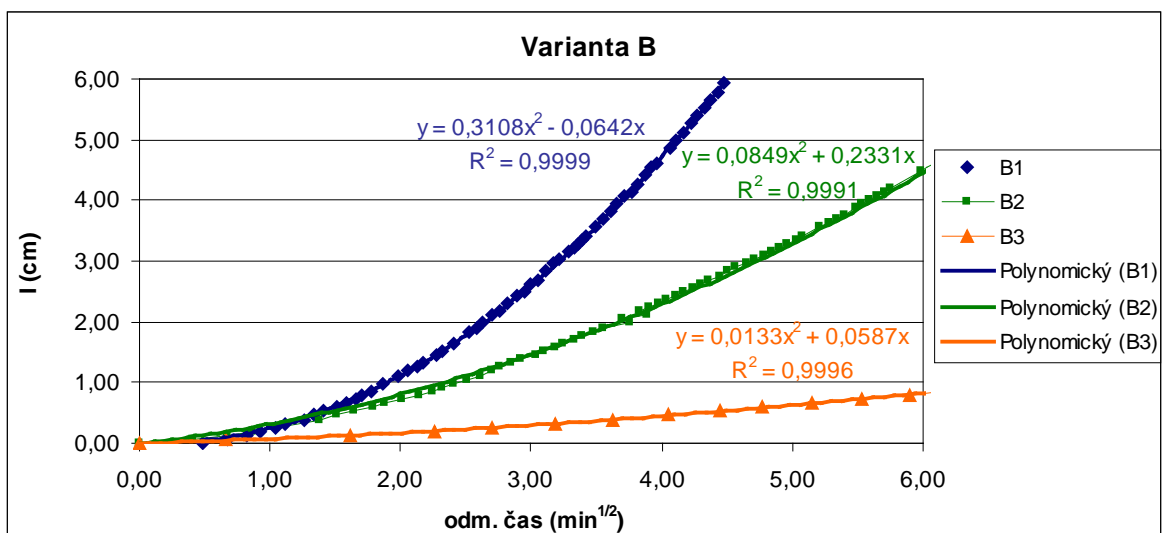
### 5.1. Stanovení hydraulických vlastností nádobovým pokusem

#### 5.1.1. Měření nenasycených hydraulických vodivostí $K$ ( $h=-2$ ) pomocí MDI po nahutnění válců

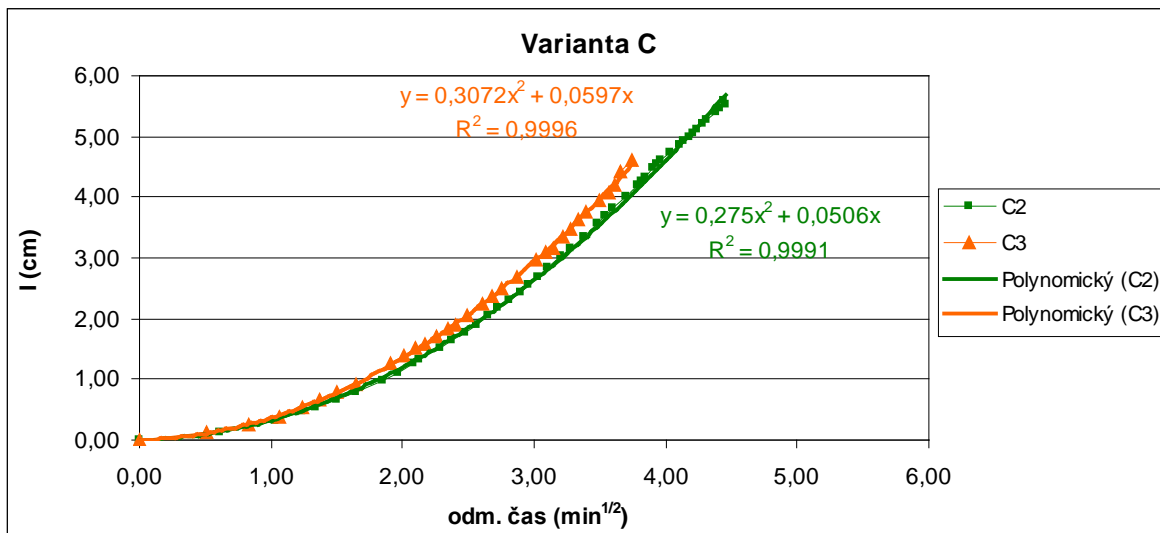
Výsledné grafy pro jednotlivé varianty a měření vyjadřují obr. 26 – 33. Hodnoty nenasycených hydraulických vodivostí  $K$  ( $h=-2$ ) pomocí MDI ihned po nahutnění válců demonstruje tab. 11. Graf zobrazující nenasycené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) všech měření a variant ukazuje obr. 34.



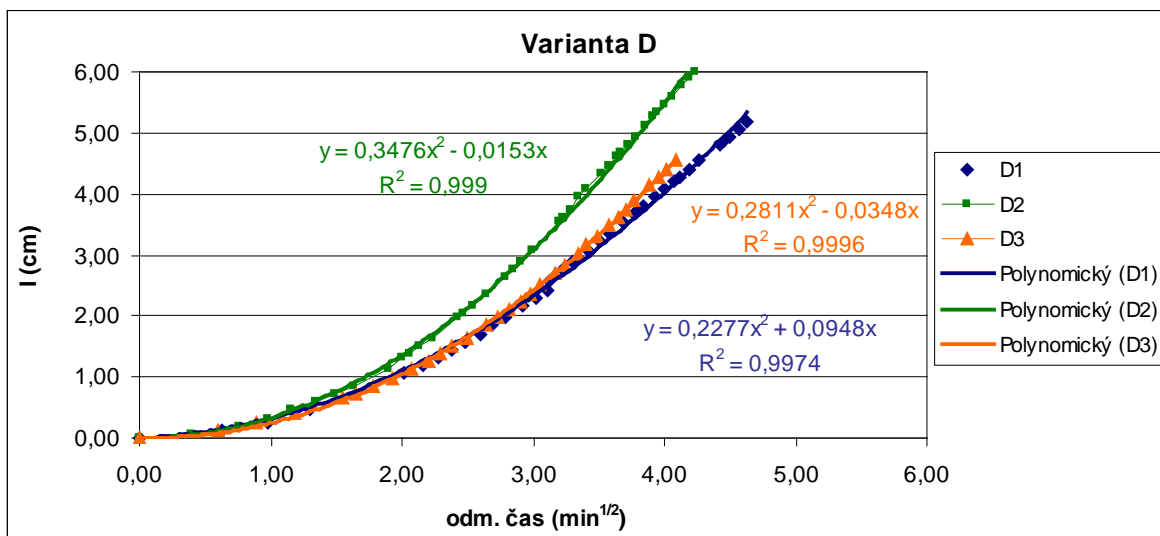
Obr. 26: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta A po nahutnění



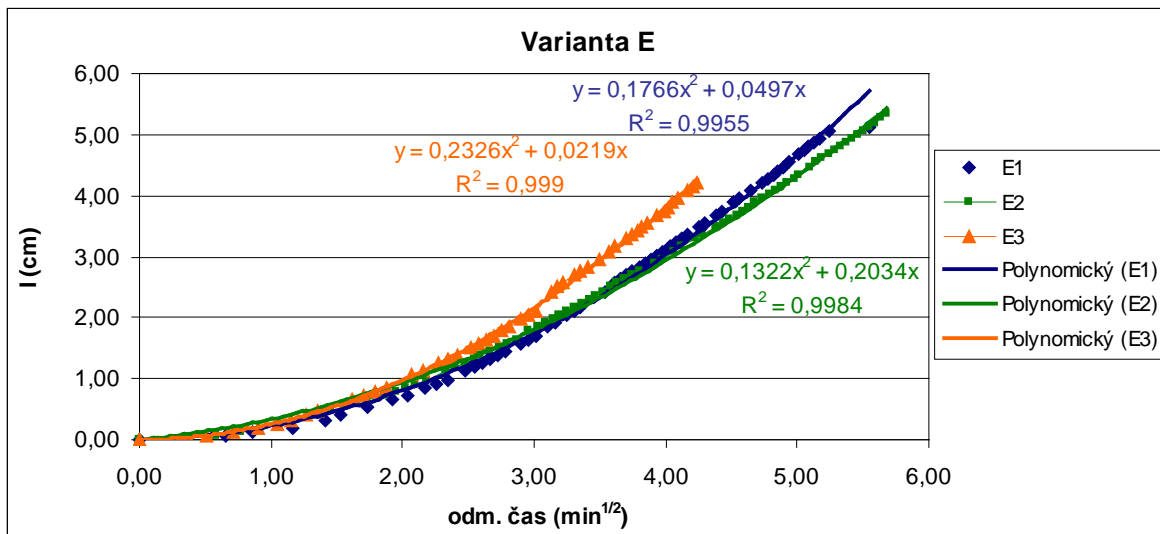
Obr. 27: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta B po nahutnění



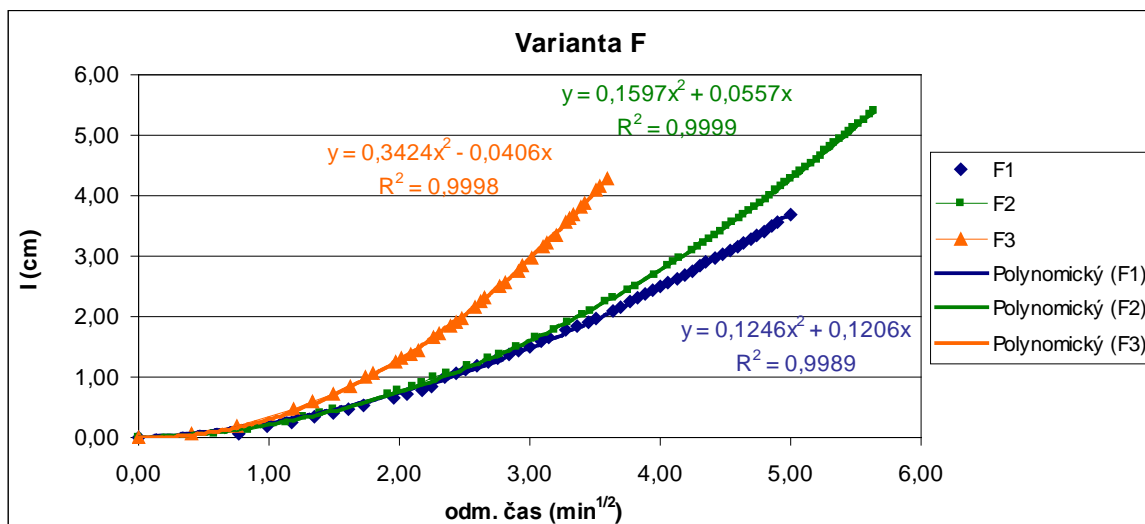
Obr. 28: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta C po nahutnění



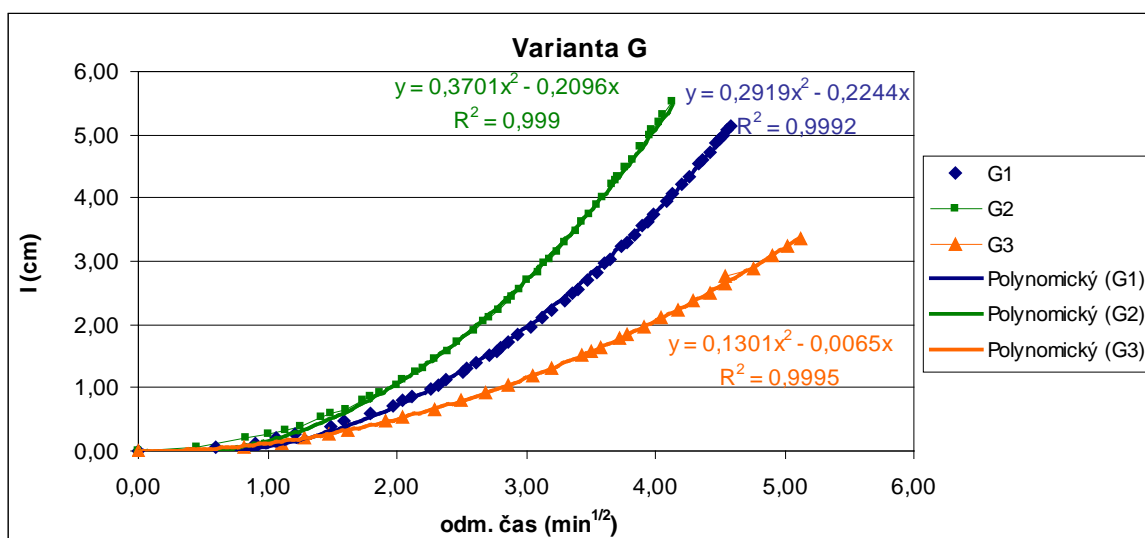
Obr. 29: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta D po nahutnění



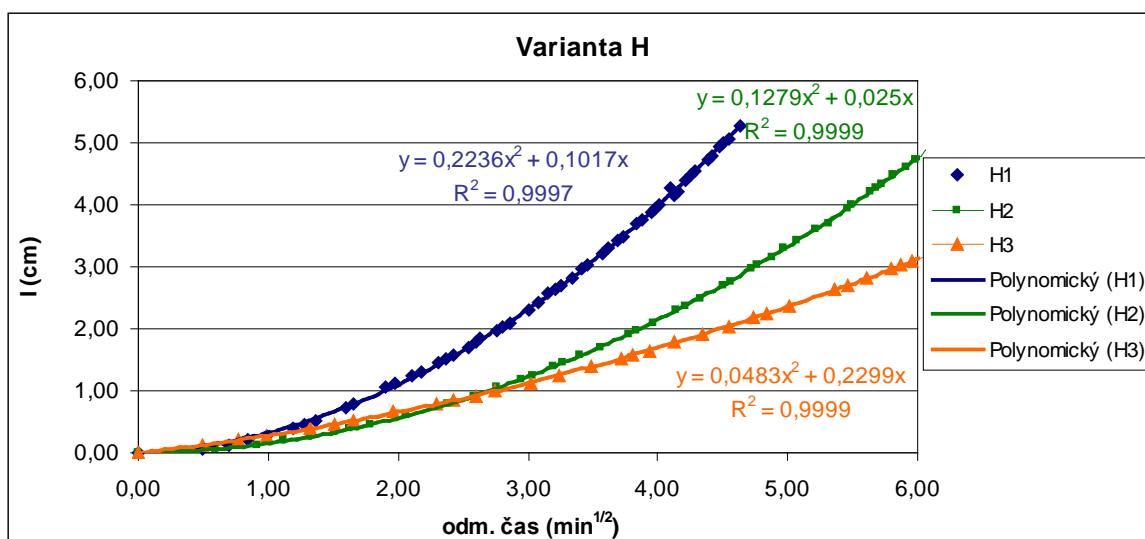
Obr. 30: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta E po nahutnění



Obr. 31: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta F po nahutnění



Obr. 32: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta G po nahutnění

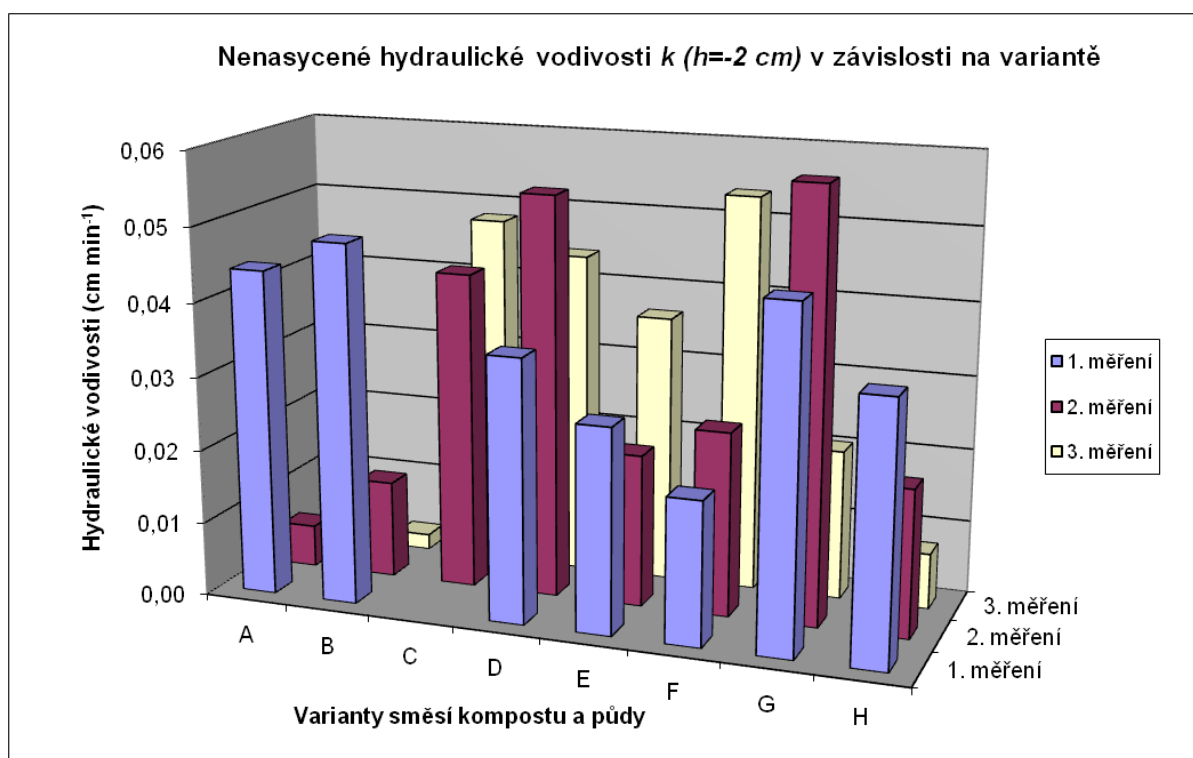


Obr. 33: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta H po nahutnění

Tab. 11: Nenasycené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) pro jednotlivá měření – měření po nahutnění válců

Nenasycené hydraulické vodivosti pro $h=-2$ cm [cm min <sup>-1</sup> ]			
Varianta	1. měření	2. měření	3. měření
A	0,0441	0,0057	0,0084
B	0,0486	0,0132	0,0021
C	X	0,0430	0,0480
D	0,0356	0,0543	0,0439
E	0,0277	0,0207	0,0363
F	0,0195	0,0250	0,0535
G	0,0456	0,0578	0,0203
H	0,0349	0,0200	0,0075

X ... měření neprovedené či nezahrnuté do výsledků



Obr. 34: Souhrnný graf nenasycených hydraulických vodivostí pro všechna měření po nahutnění

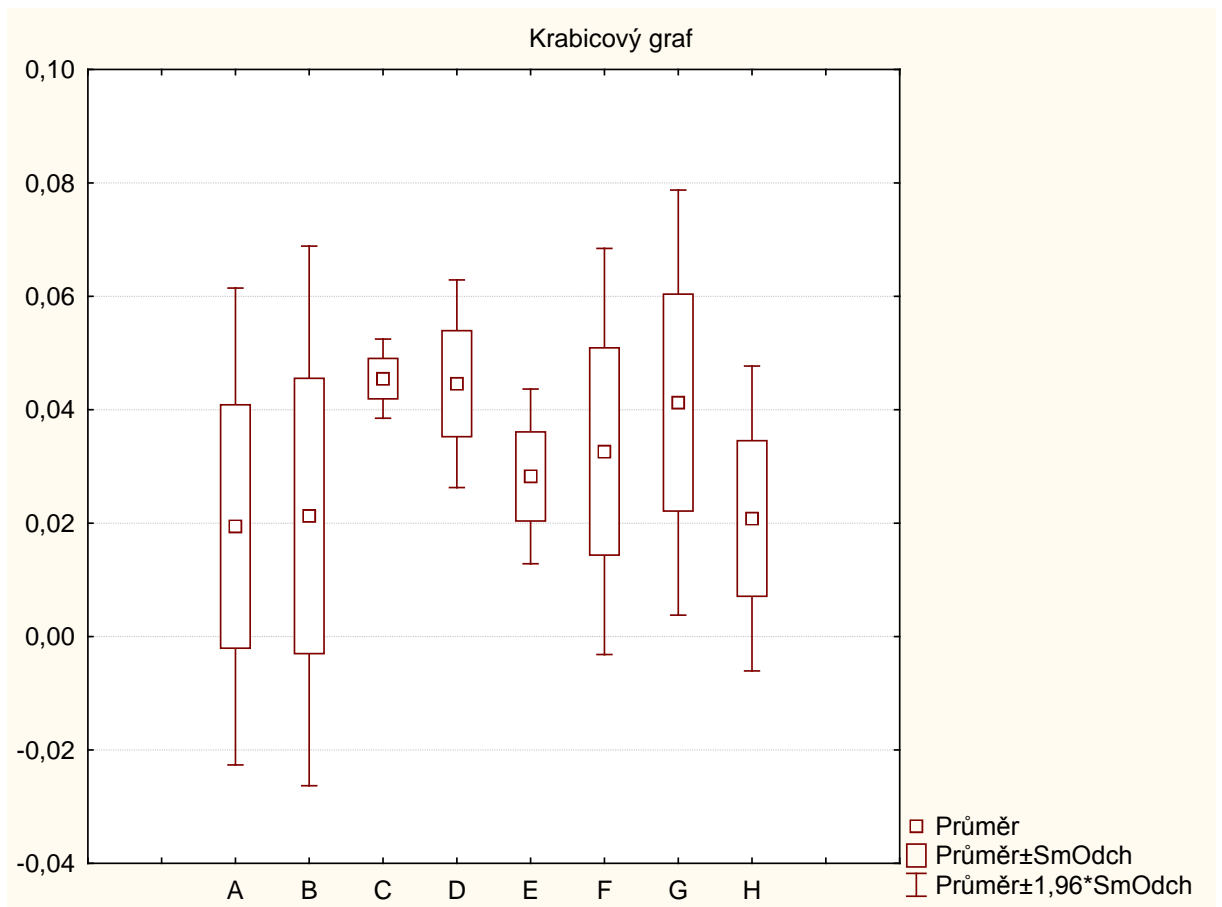
Statistickým zpracováním nebyl prokázán mezi jednotlivými variantami významný rozdíl (na hladině pravděpodobnosti 95 %). Tab. 12 vyjadřuje popisné statistiky, obr. 34 je znázorňuje graficky. Je nutné vzít v úvahu, že směs obsahovala malé množství kompostu a měření bylo provedeno bezprostředně po přípravě směsi. Půda ještě nebyla konsolidována a nebyla vytvořena půdní struktura. Mezi jednotlivými měřeními v rámci jedné varianty často došlo



k velkému rozptylu naměřených výsledků (obr. A, B, F, G, H), což potvrzuje i obr. 35. U varianty C nebylo uvažováno 1 měření kvůli podezření ze špatného těsnění přístroje.

Tab. 12: Popisné statistiky pro varianty A až H

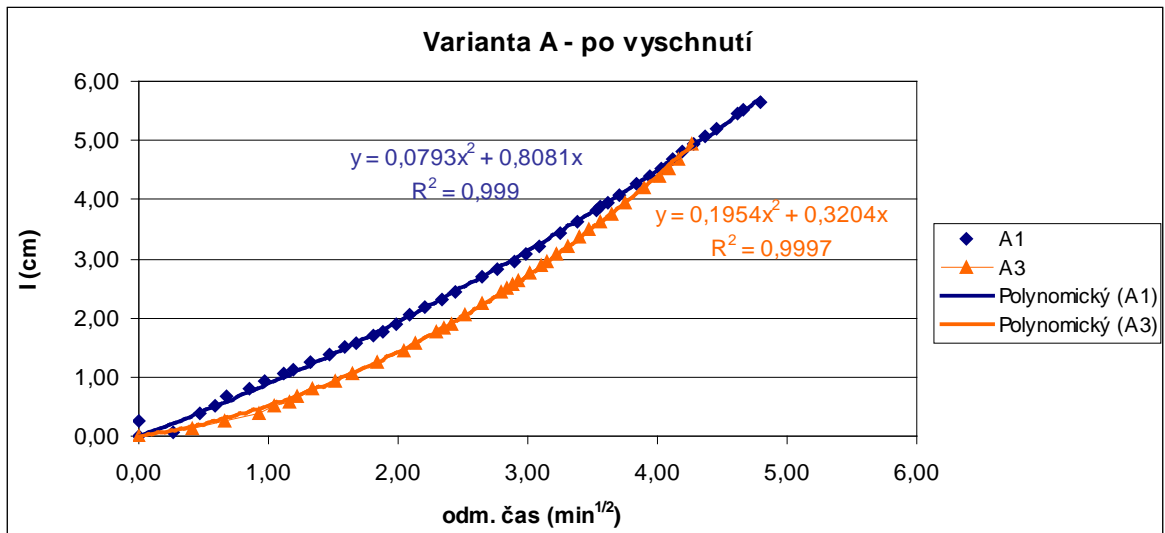
Varianta	Popisné statistiky				
	Průměr	Minimum	Maximum	Rozptyl	Sm.odch.
A	0,019411	0,005703	0,044141	0,000460	0,021458
B	0,021276	0,002078	0,048563	0,000589	0,024275
C	0,045484	0,042969	0,048000	0,000013	0,003558
D	0,044591	0,035600	0,054250	0,000087	0,009343
E	0,028245	0,020656	0,036344	0,000062	0,007856
F	0,032641	0,019469	0,053500	0,000334	0,018272
G	0,041255	0,020328	0,057828	0,000366	0,019125
H	0,020823	0,007547	0,034937	0,000188	0,013715



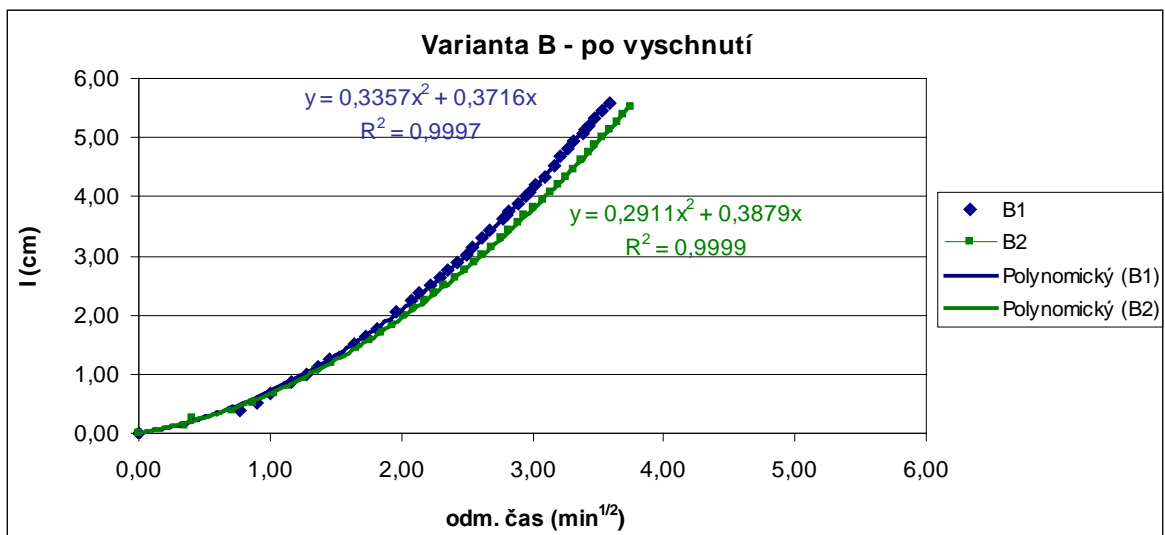
Obr. 35: Grafické vyjádření popisných statistik variant A až H

### 5.1.2. Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K$ ( $h=-2$ ) pomocí MDI po vyschnutí válců

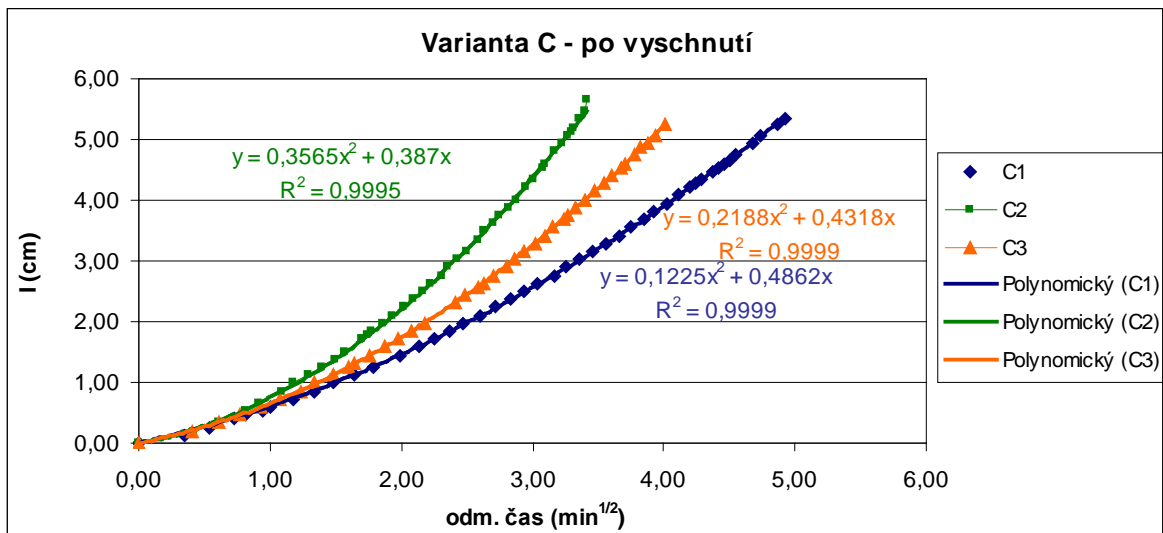
Výsledné grafy pro jednotlivé varianty a měření vyjadřují obr. 36 – 43. Hodnoty nenasyčených hydraulických vodivostí  $K$  ( $h=-2$ ) pomocí MDI po vyschnutí vyjadřuje tab. 13. Graf zobrazující nenasyčené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) všech měření a variant vyjadřuje obr. 44.



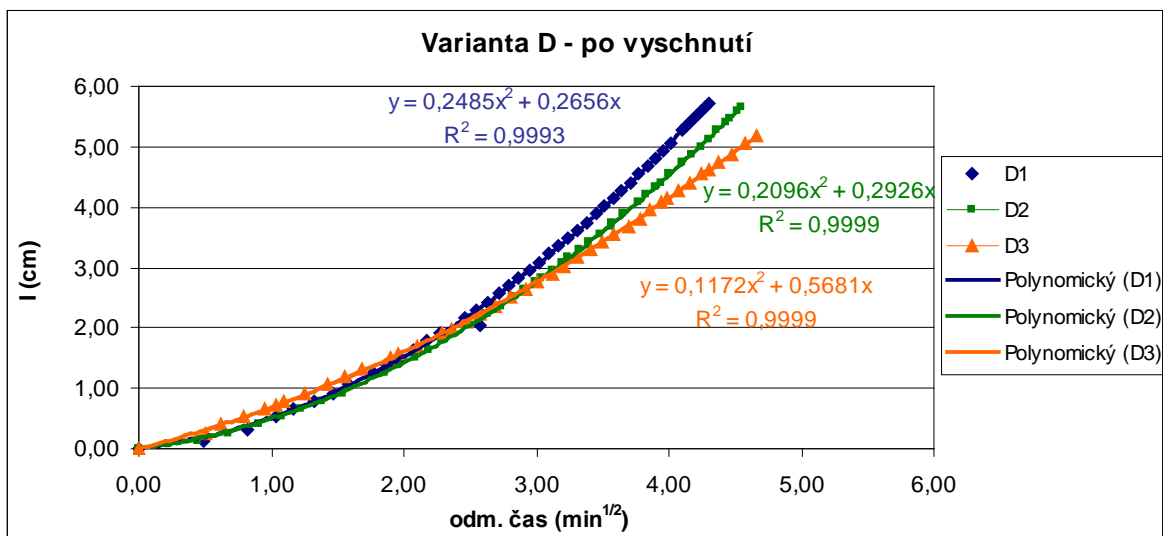
Obr. 36: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta A po vyschnutí



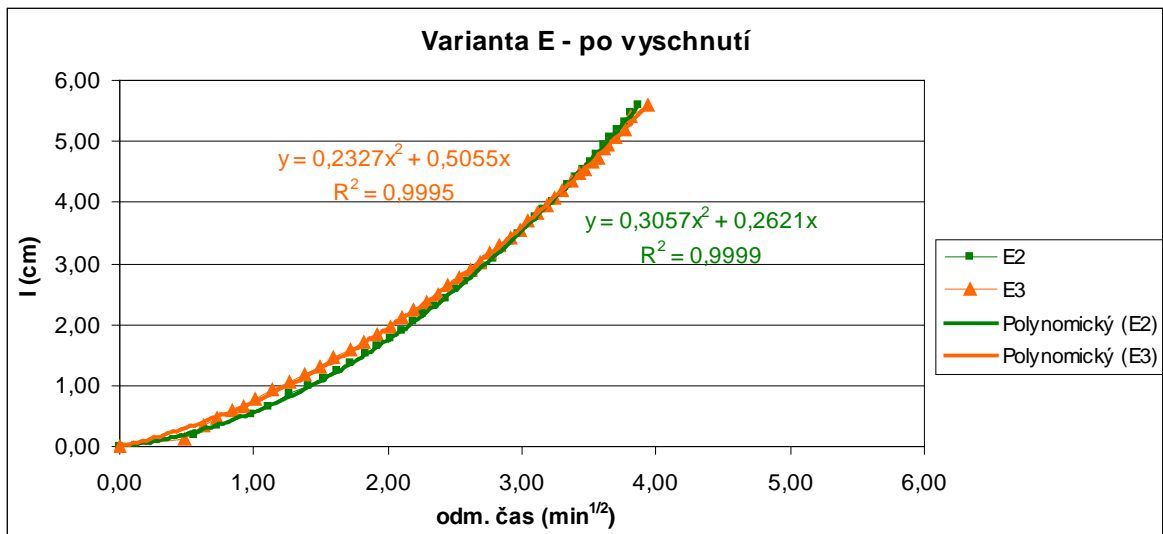
Obr. 37: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta B po vyschnutí



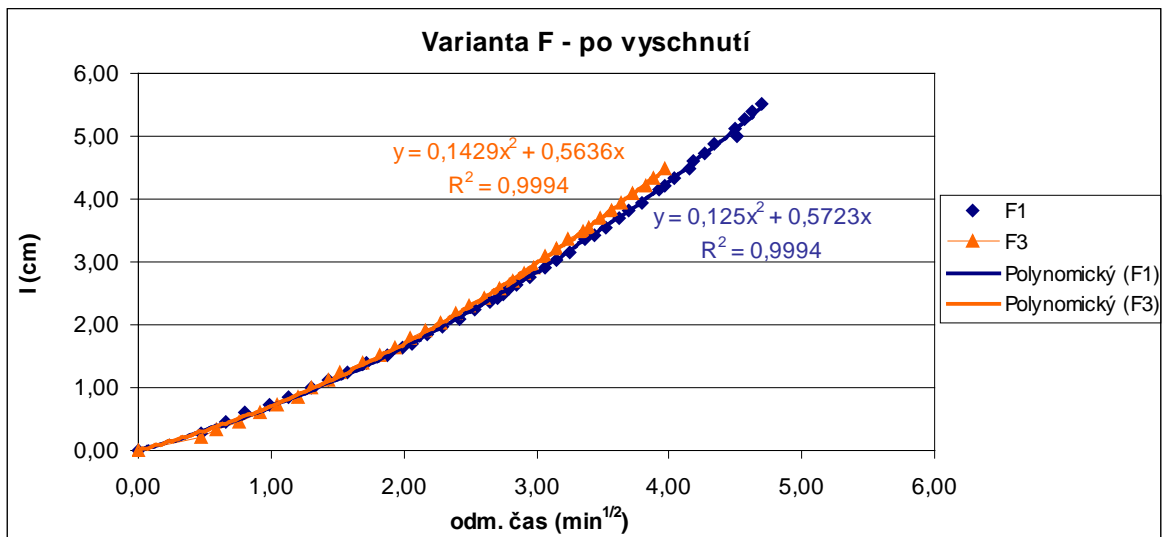
Obr. 38: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta C po vyschnutí



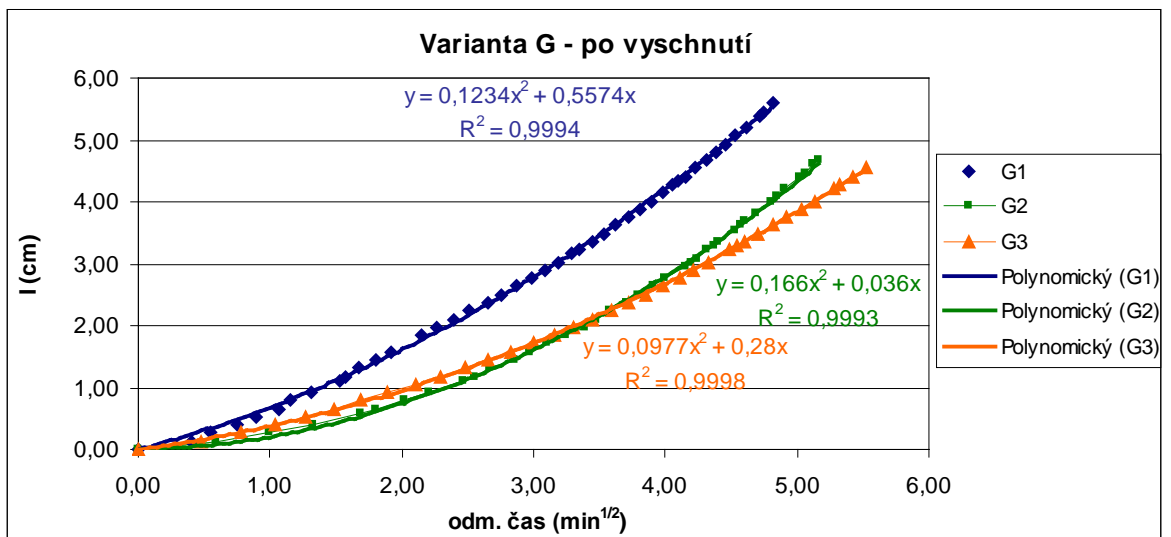
Obr. 39: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta D po vyschnutí



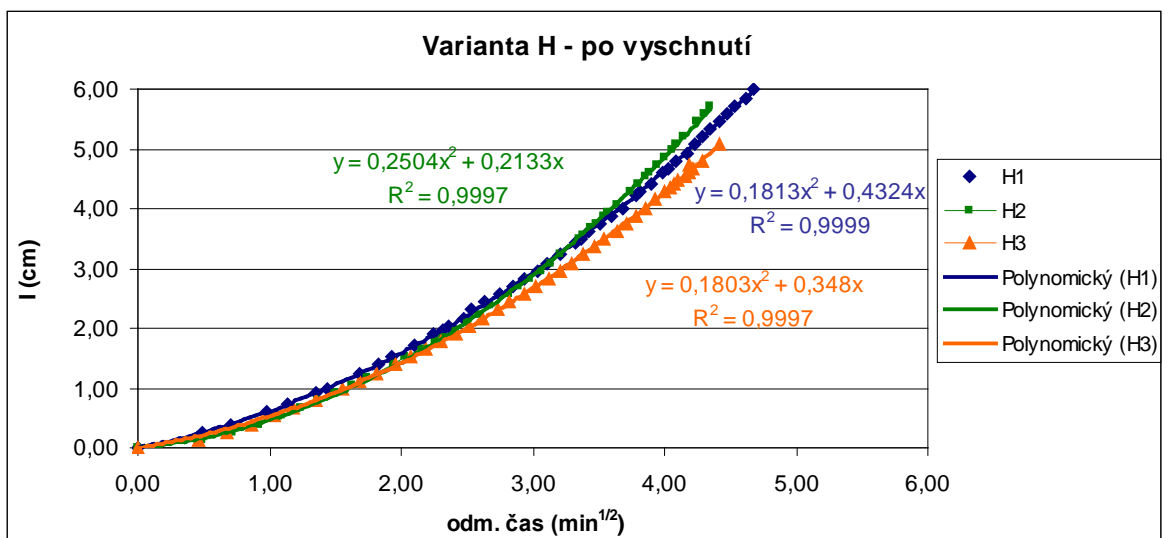
Obr. 40: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta E po vyschnutí



Obr. 41: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta F po vyschnutí



Obr. 42: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta G po vyschnutí

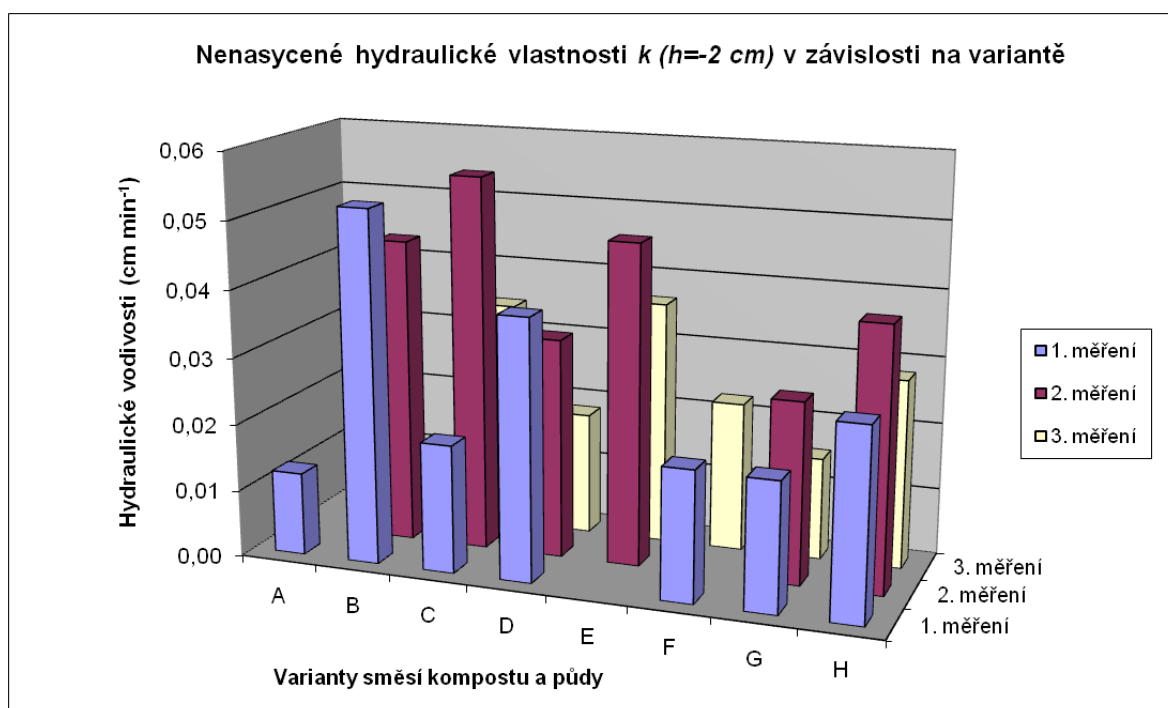


Obr. 43: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – varianta H po vyschnutí

Tab. 13: Nenasycené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) pro jednotlivá měření – měření po vyschnutí válců

Nenasycené hydraulické vodivosti pro $h=-2$ cm [cm min <sup>-1</sup> ]			
Varianta	1. měření	2. měření	3. měření
A	0,0124	X	0,0305
B	0,0525	0,0455	X
C	0,0191	0,0557	0,0342
D	0,0388	0,0328	0,0183
E	X	0,0478	0,0364
F	0,0195	X	0,0223
G	0,0193	0,0271	0,0153
H	0,0283	0,0391	0,0282

X ... měření neprovedené či nezahrnuté do výsledků

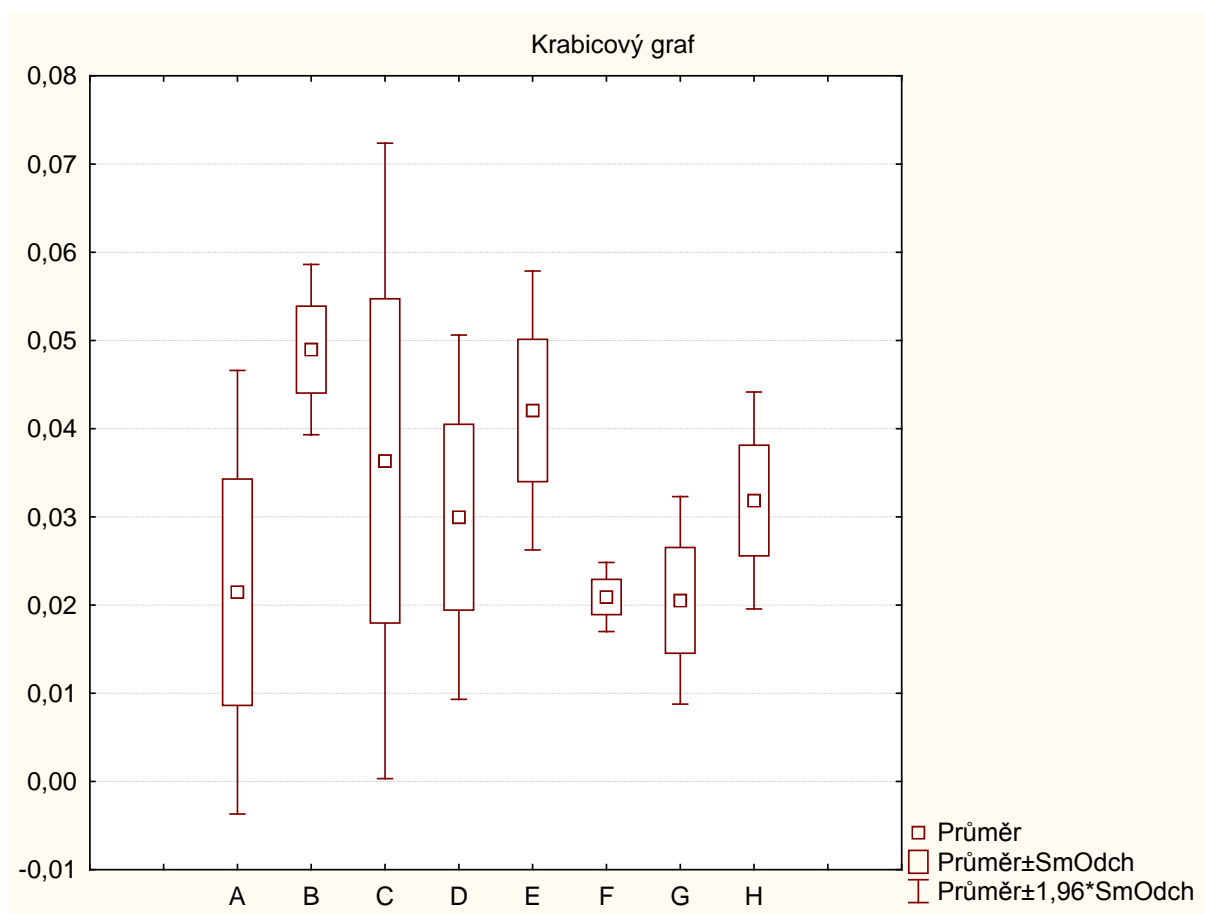


Obr. 44: Souhrnný graf nenasycených hydraulických vodivostí pro všechna měření po vyschnutí válců

Také u druhého nádobového pokusu (měření po vyschnutí směsi) nebyl mezi variantami prokázán statisticky významný rozdíl (tab. 14, obr. 45). Na rozdíl od měření ihned po namíchání směsi a nahutnění válců, se častěji objevil menší rozptyl naměřených hodnot mezi jednotlivými měřeními v rámci jedné varianty (obr. B, E, F, G, H), což potvrzuje i obr. 45. U varianty A, B, E a F průtok naměřených hodnot vykazoval opačný trend zakřivení, než je předpokládáno, proto nebyla tato data zahrnuta do analýzy.

Tab.: 14 Popisné statistiky nádobového pokusu pro varianty A až H

Varianta	Popisné statistiky				
	Průměr	Minimum	Maximum	Rozptyl	Sm.odch.
A	0,021461	0,012391	0,030531	0,000165	0,012827
B	0,048969	0,045484	0,052453	0,000024	0,004928
C	0,036344	0,019141	0,055703	0,000338	0,018376
D	0,029964	0,018312	0,038828	0,000111	0,010538
E	0,042063	0,036359	0,047766	0,000065	0,008065
F	0,020914	0,019500	0,022328	0,000004	0,002000
G	0,020536	0,015266	0,027062	0,000036	0,005998
H	0,031857	0,028172	0,039100	0,000039	0,006273

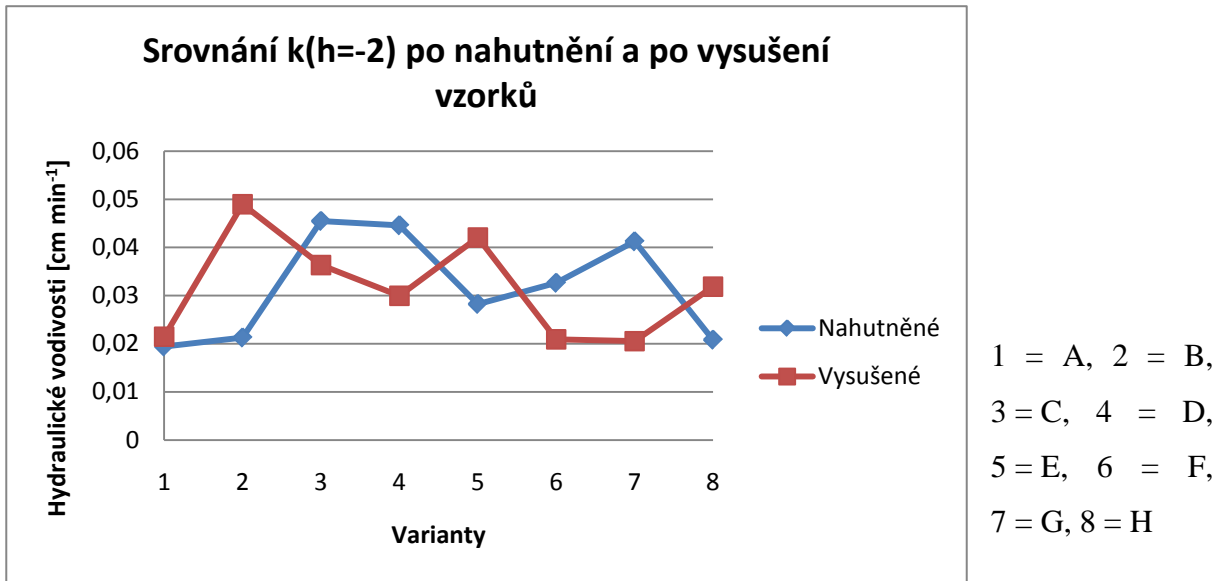


Obr. 45: Grafické vyjádření popisných statistik nádobového pokusu variant A až H

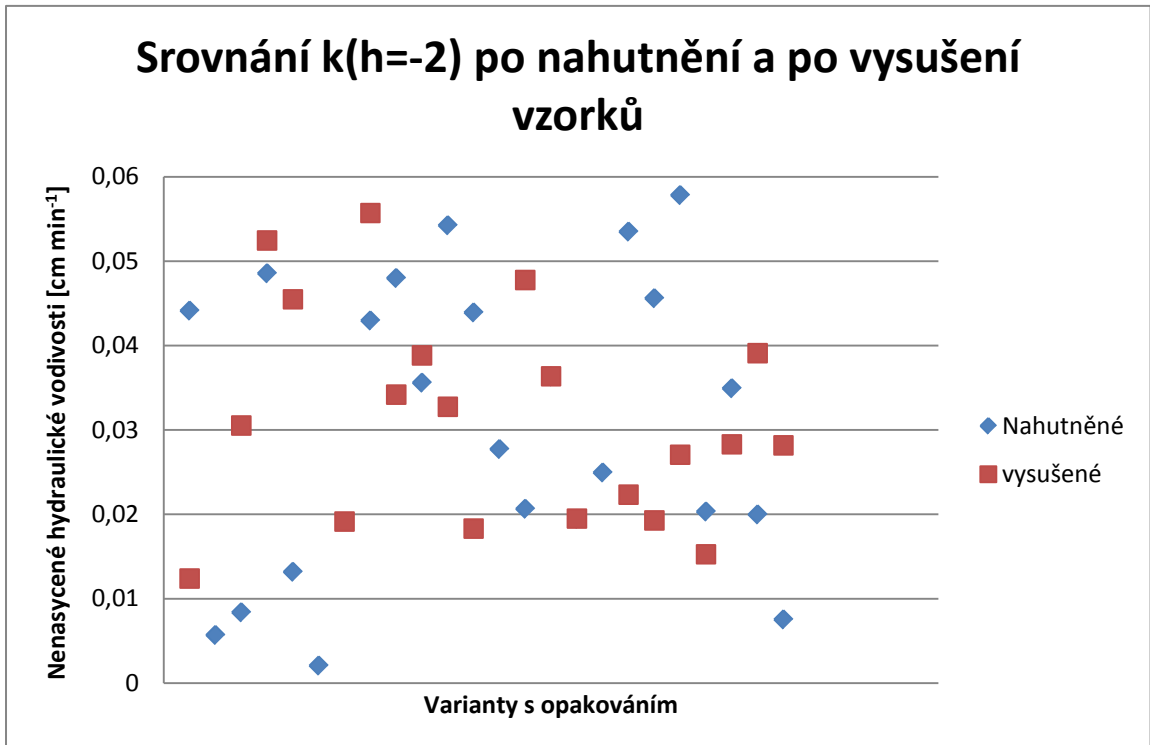
### 5.1.3. Porovnání měření nenasycených hydraulických vodivostí pomocí MDI po nahutnění a po vysušení vzorků

Mezi hodnotami naměřenými ihned po nahutnění a poté až po vysušení vzorků nebyl pozorován významný rozdíl (viz obr. 46 zobrazující průměrné hodnoty a obr. 47 vyjadřující všechny hodnoty). Ani v rámci jednotlivých variant (A – H) nebyla objevena souvislost mezi hodnotami získanými ihned po nahutnění či až po vysušení vzorků. U variant C, D, E byl

zjištěn uží rozptyl naměřených hodnot ihned po nahutnění vzorků. Naopak u variant B, E, F, G, H byl pozorován menší rozptyl naměřených hodnot po vysušení vzorků.



Obr. 46: Srovnání průměrných hodnot  $K$  ( $h=-2$ ) jednotlivých variant po nahutnění a po vysušení vzorků

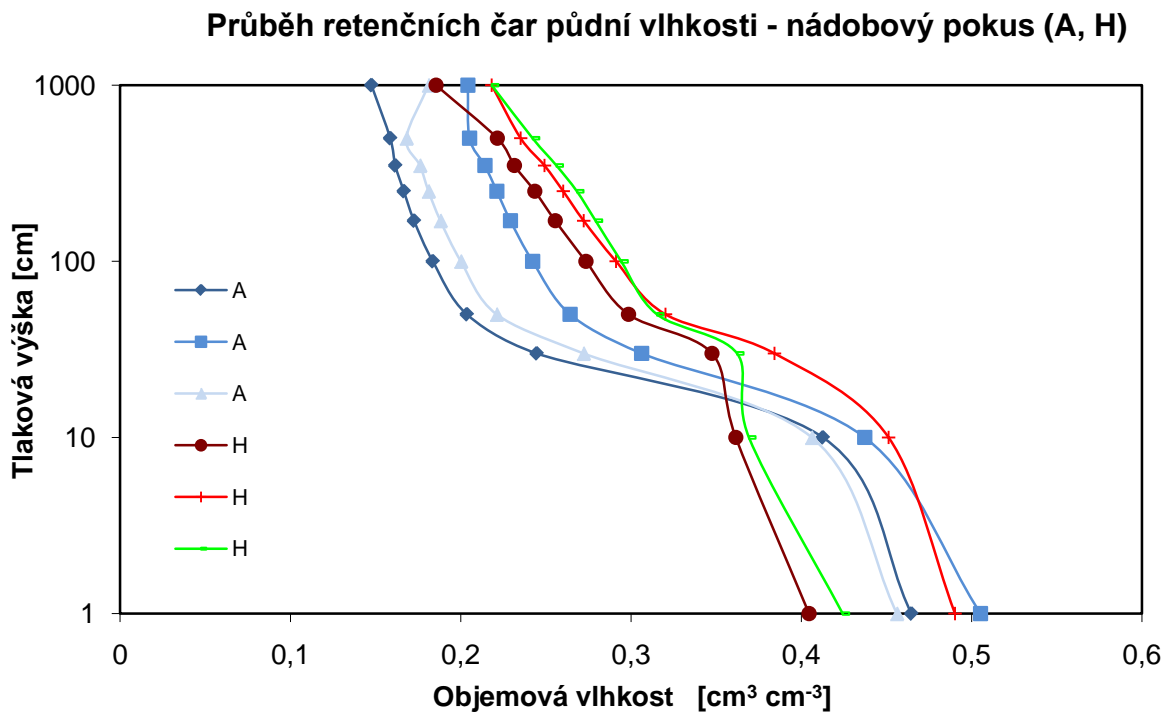


Obr. 47: Srovnání všech hodnot  $K$  ( $h=-2$ ) po nahutnění a po vysušení vzorků

#### 5.1.4. Laboratorní stanovení průběhu retenčních čar pomocí Tempských cel

Z každé varianty (tab. 9) byly stanoveny retenční čáry půdní vlhkosti na 3 vzorcích.

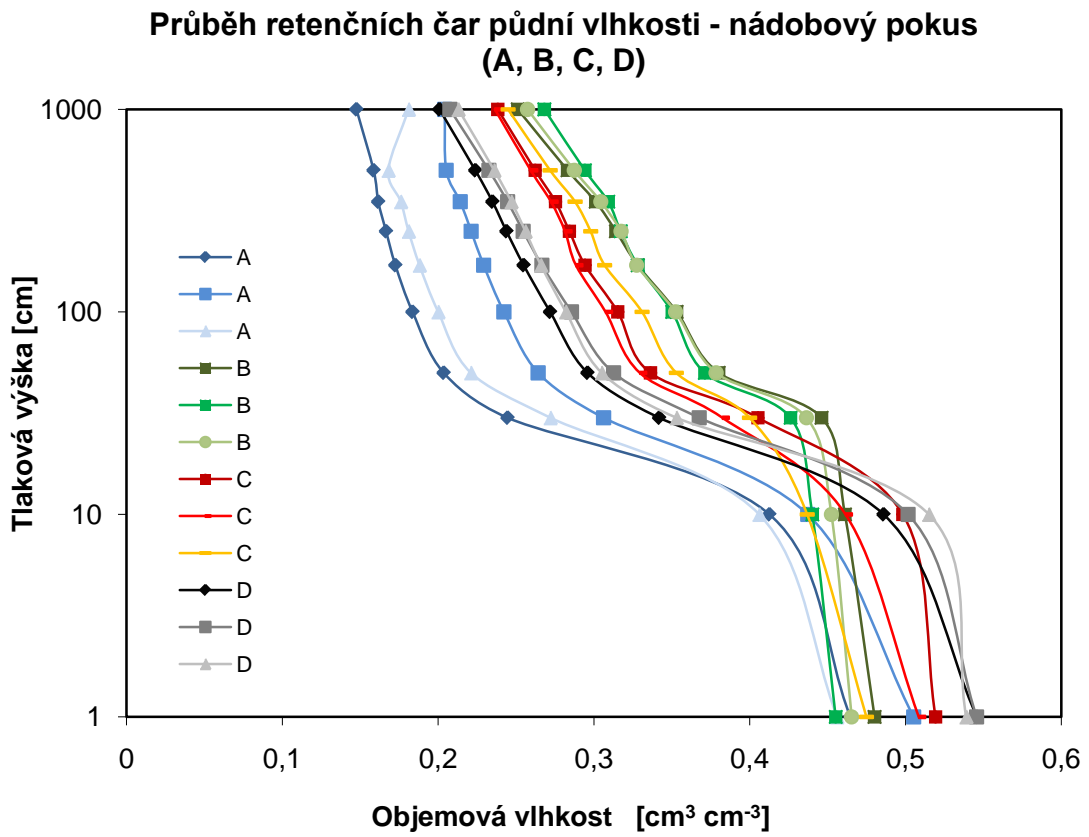
Průběhy retenčních čar půdní vlhkosti u variant s nejmenším (A) a největším obsahem kompostu (H) znázorňuje obr. 48. Z obr. 48, 49 a 50 zdánlivě vyplývá, že přidaný kompost zvýšil retenční schopnost půdy, ale nevyskytuje se zde patrný vliv jednotlivých podílů



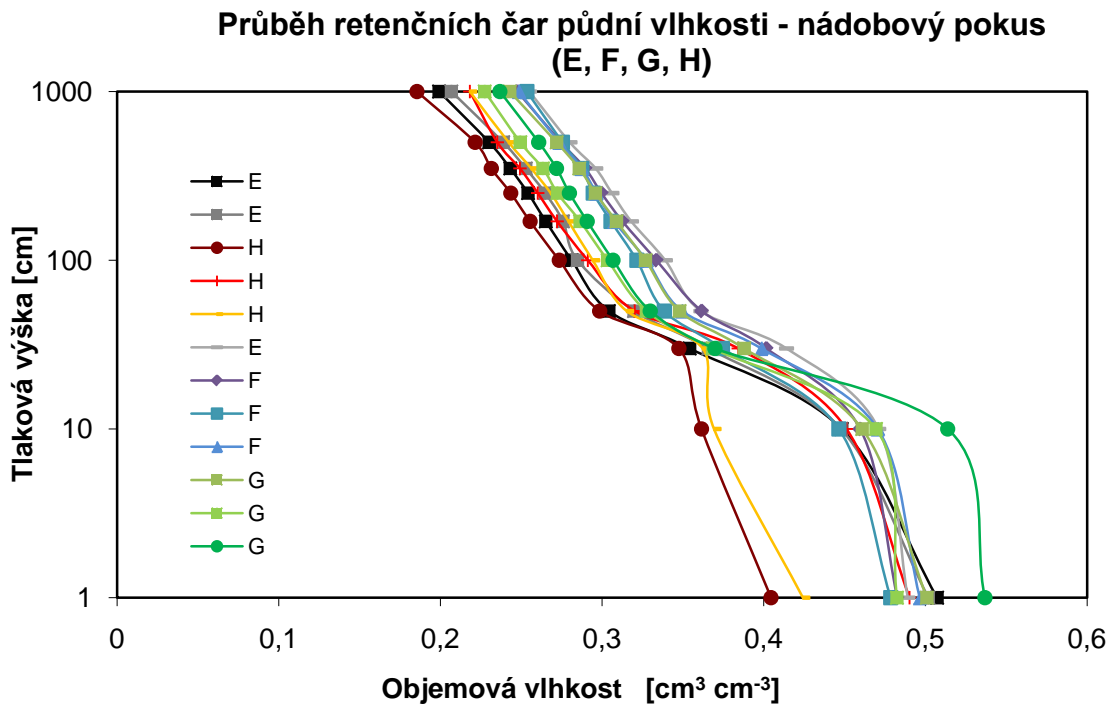
Obr. 48: Průběh retenčních čar půdní vlhkosti variant A a H

Retenční čáry půdní vlhkosti variant A – D jsou zobrazeny v obr. 49. Z grafu je patrné, že si retenční čáry jednotlivých stanovení ve variantě tvarově odpovídají, ale v průběhu retenčních čar mezi variantami s odstupňovanými dávkami kompostu (tab. 9) nejsou významné rozdíly. Na obr. 50 jsou demonstrovány průběhy retenčních čar půdní vlhkosti variant E – H. I v tomto případě (kromě jednoho ze stanovení varianty G a 2 stanovení varianty H) si retenční čáry tvarově odpovídají jako u variant A – D. Na rozdíl od průběhů retenčních čar u variant A – D mají průběhy retenčních čar variant E – H menší rozptyl hodnot. Z obr. 48, 49 a 50 zdánlivě vyplývá, že přidaný kompost zvýšil retenční schopnost půdy, ale nevyskytuje se zde patrný vliv jednotlivých podílů.





Obr. 49: Průběh retenčních čar půdní vlhkosti variant A, B, C, D



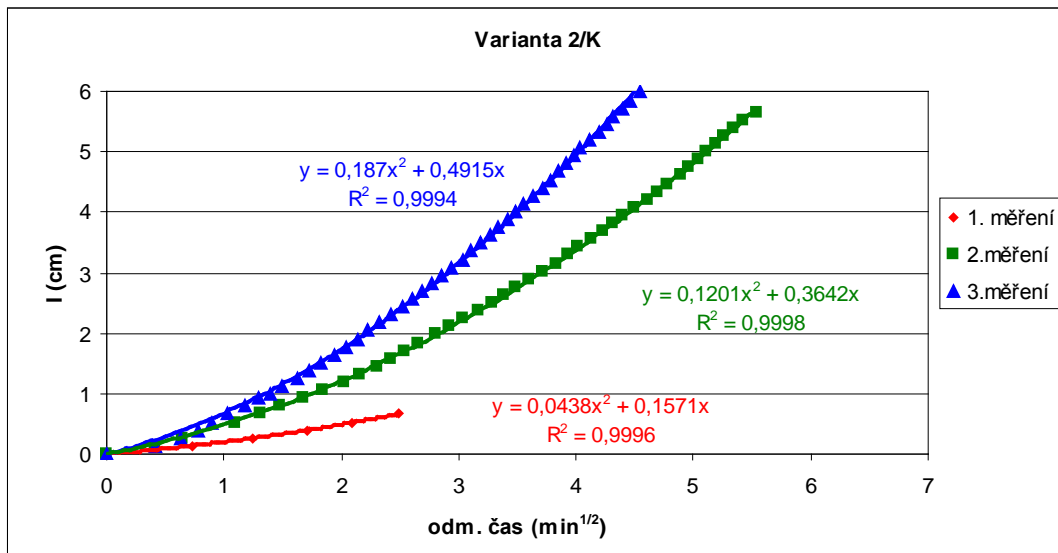
Obr. 50: Průběh retenčních čar půdní vlhkosti variant E, F, G, H

## 5.2. Stanovení hydraulických vlastností maloparcelovým polním pokusem

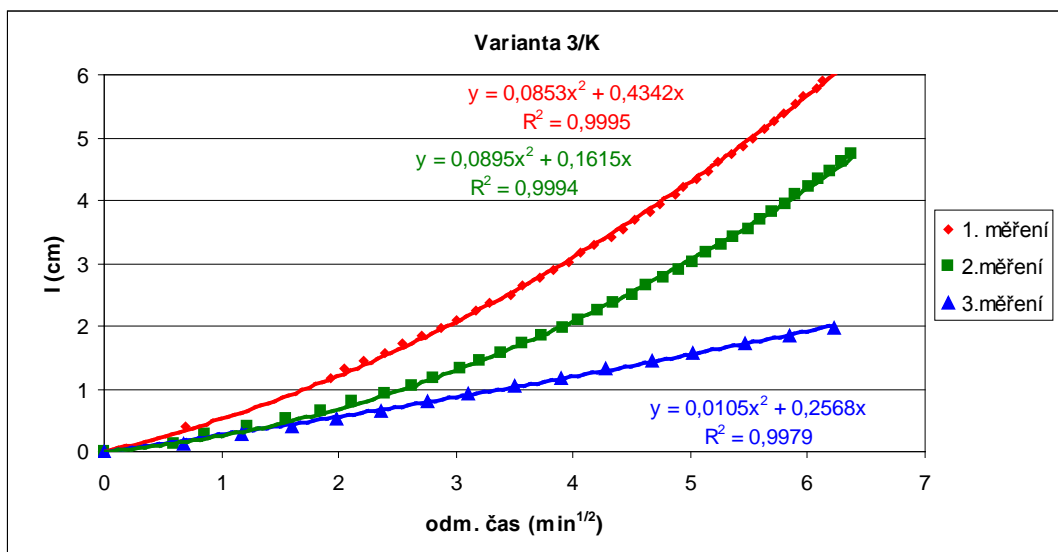
### 5.2.1. Měření nenasyčených hydraulických vodivostí $K$ ( $h=-2$ ) pomocí MDI

Výsledné grafy pro jednotlivé varianty a měření vyjadřují obr. 51 – 78. Grafy pro variantu K (bez kompostu) vyjadřují obr. 51 - 56, grafy pro variantu D1 (nejmenší dávka kompostu) vyjadřují obr. 57 - 62, grafy pro variantu D2 (střední dávka kompostu) vyjadřují obr. 63 - 72, grafy pro D3 (největší dávku kompostu) vyjadřují obr. 73 – 78. Naměřené hodnoty nenasyčených hydraulických vodivostí  $K$  ( $h=-2$ ) pomocí MDI v terénu vyjadřuje tab. 15. Graf zobrazující nenasyčené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) všech měření a variant vyjadřuje obr. 79.

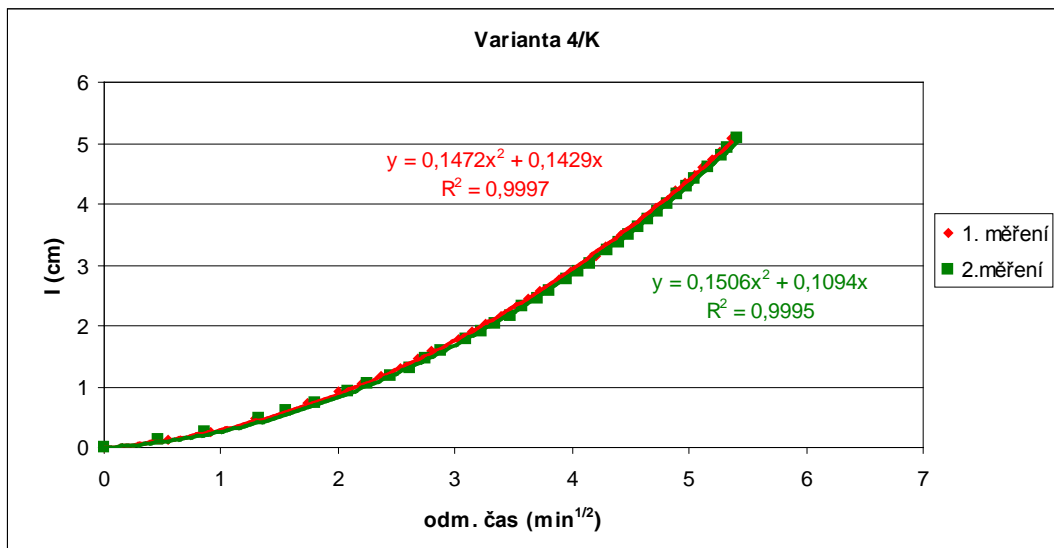
#### Varianta K (bez kompostu)



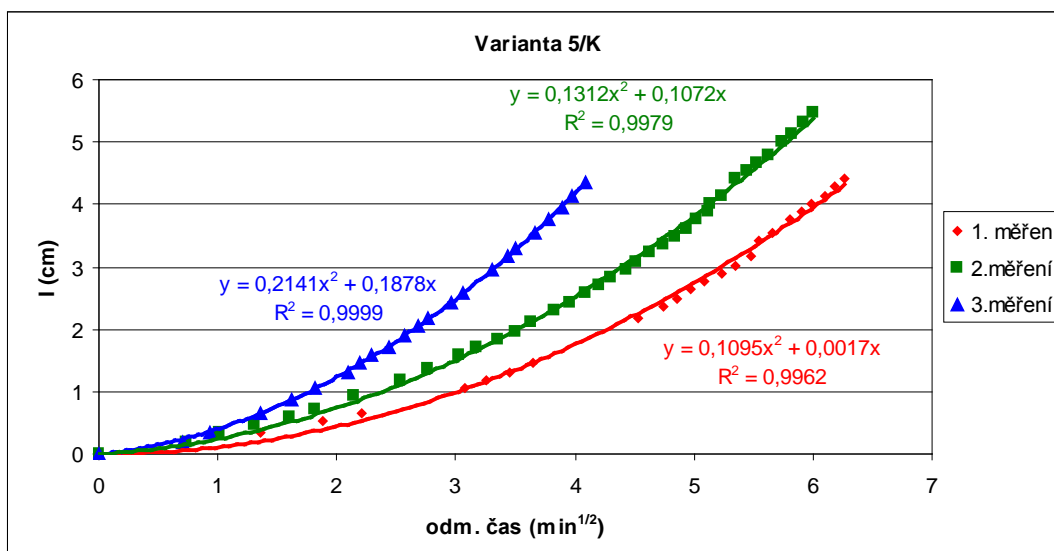
Obr. 51: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času - 2/K



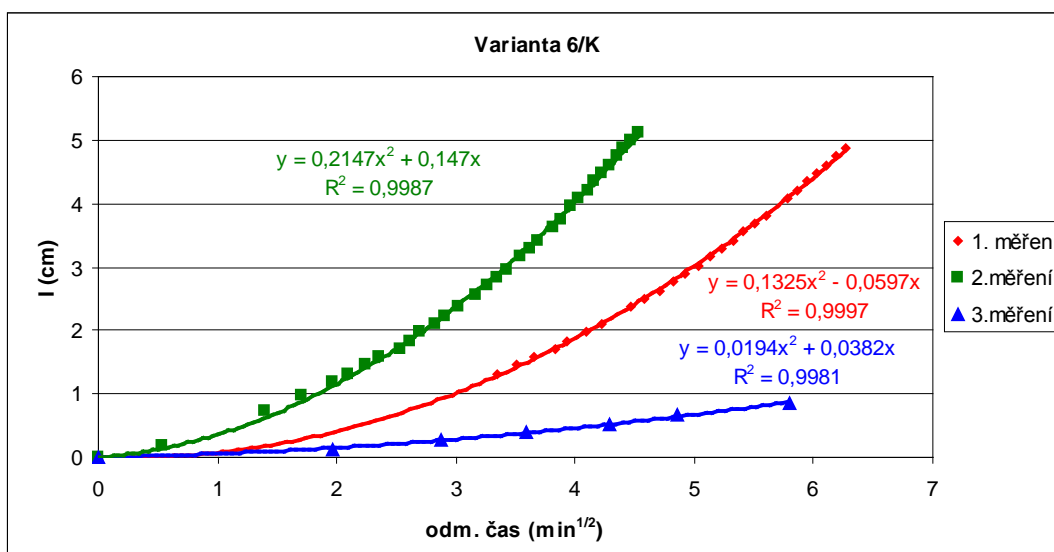
Obr. 52: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 3/K



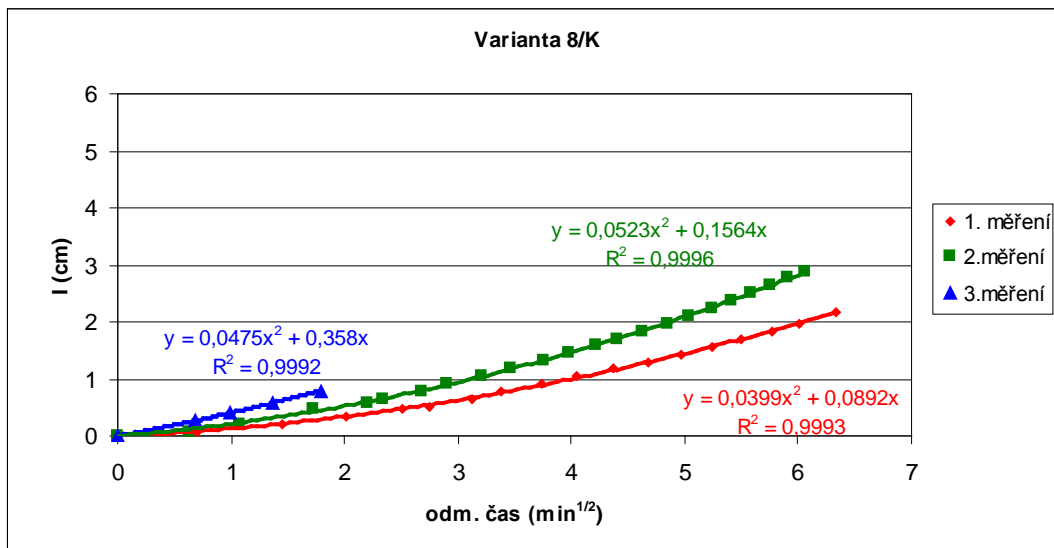
Obr. 53: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 4/K



Obr. 54: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 5/K

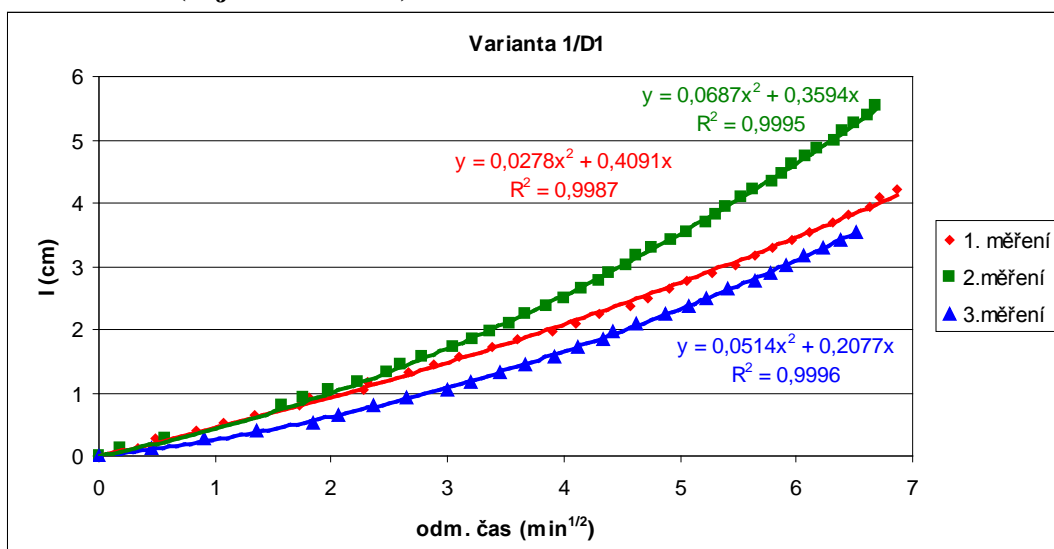


Obr. 55: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 6/K

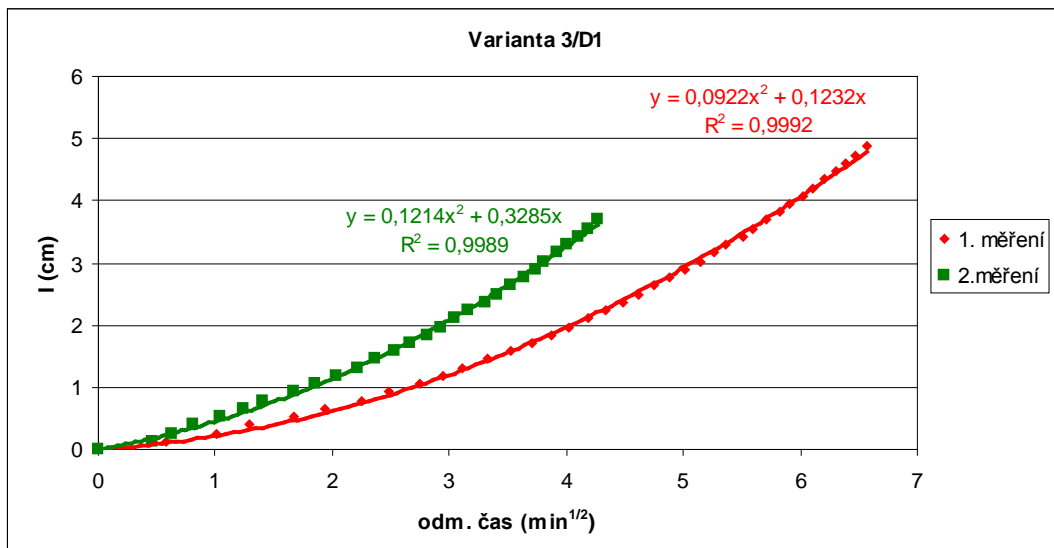


Obr. 56: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 8/K

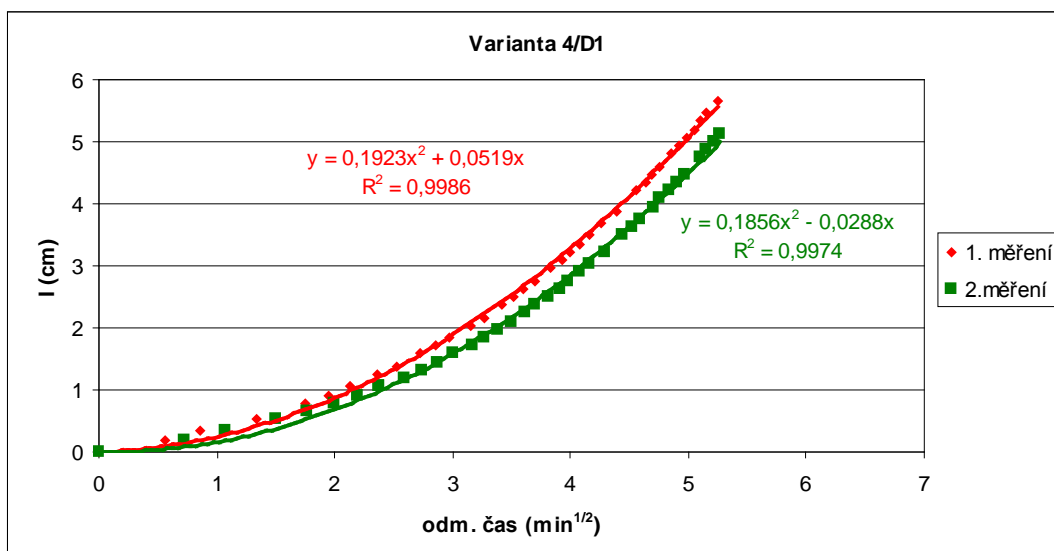
**Varianta D1 (nejmenší dávka)**



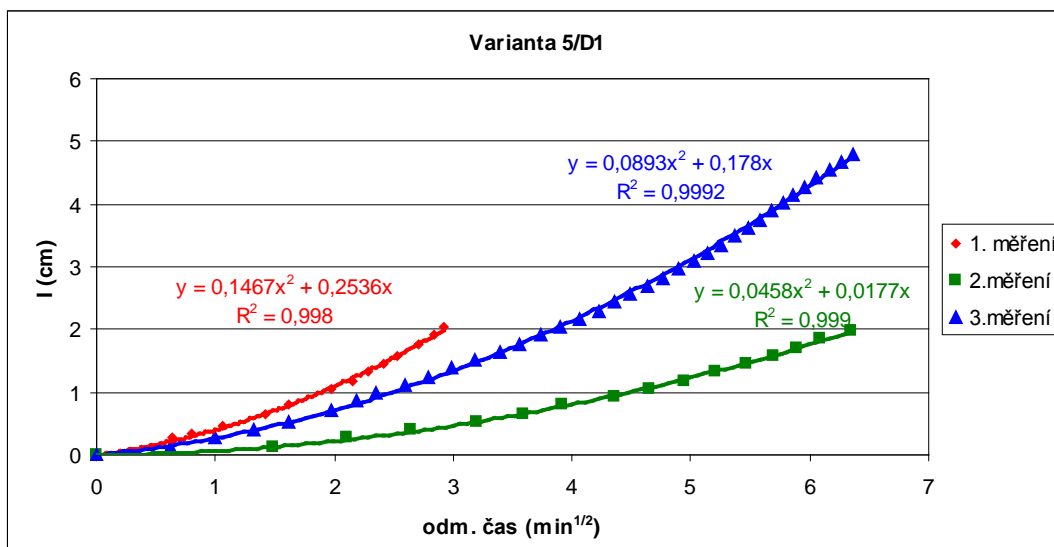
Obr. 57: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 1/D1



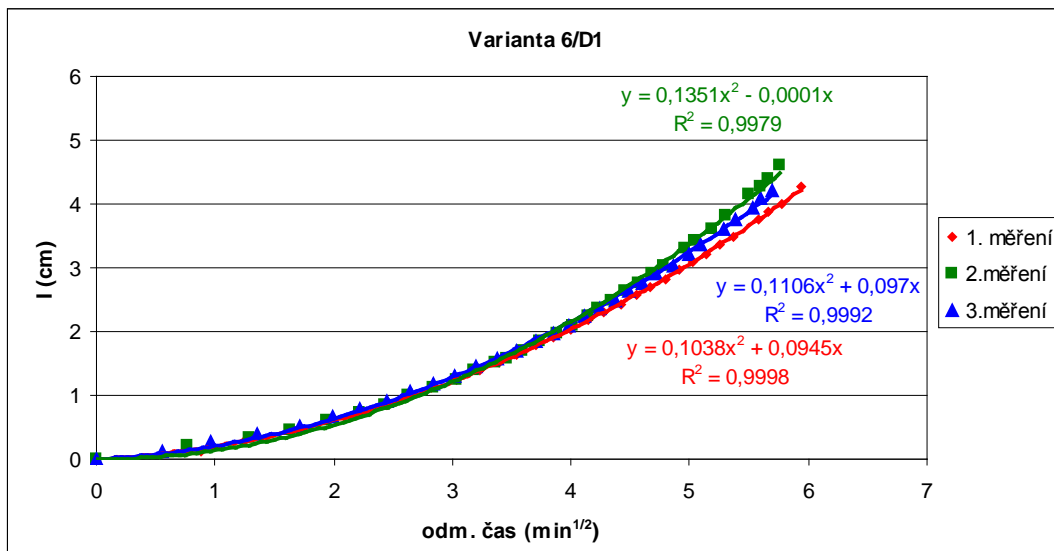
Obr. 58: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 3/D1



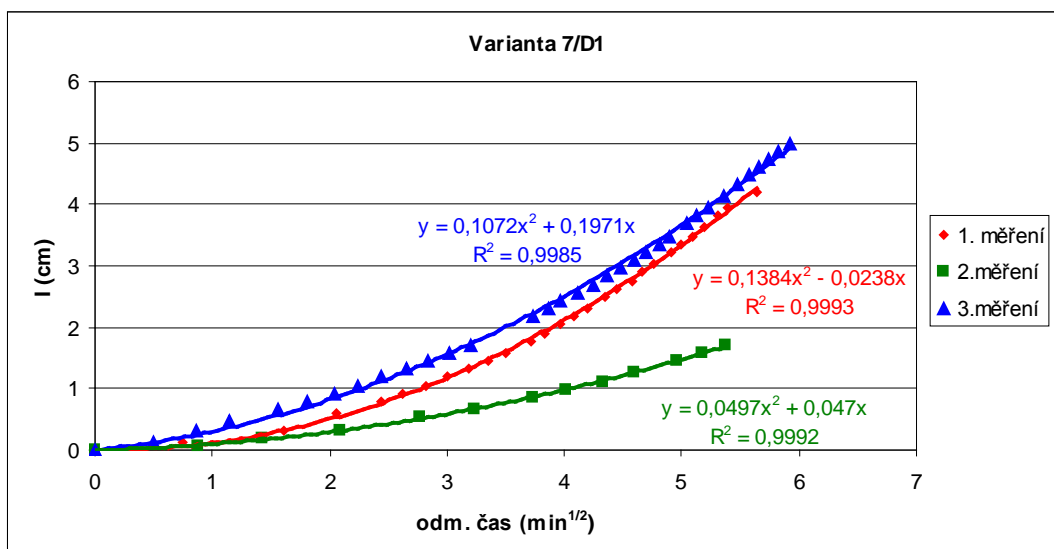
Obr. 59: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 4/D1



Obr. 60: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 5/D1

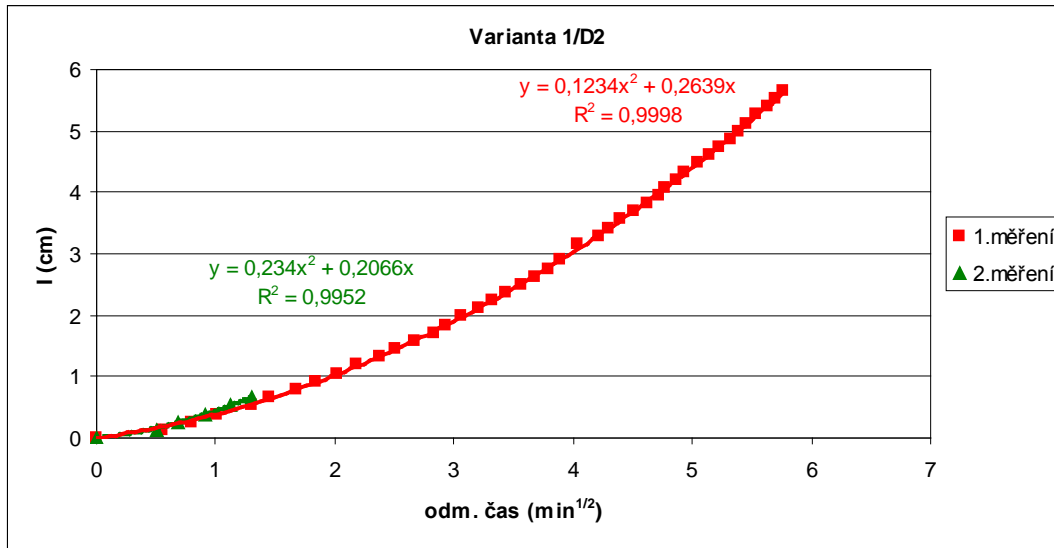


Obr. 61: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času - 6/D1

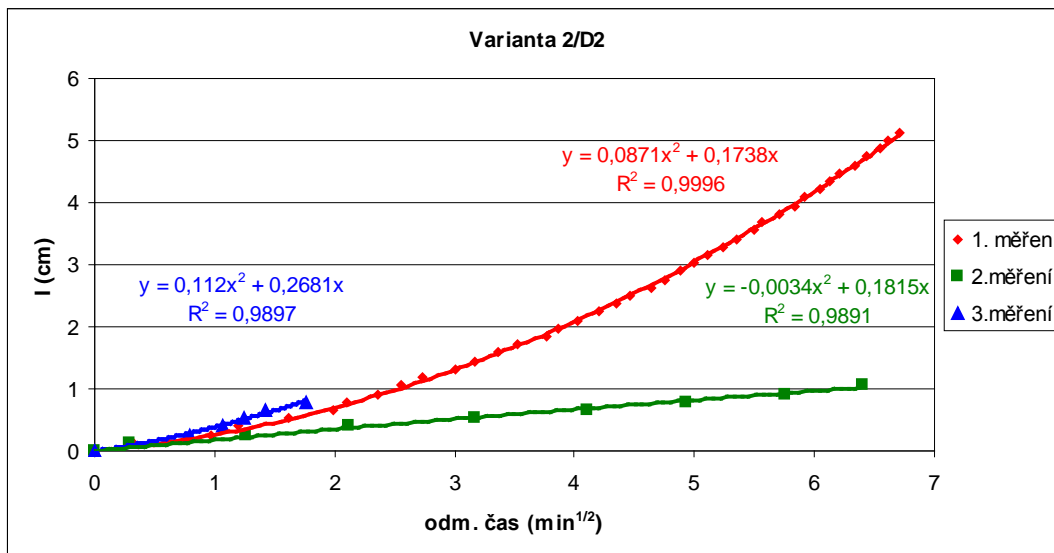


Obr. 62: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 7/D1

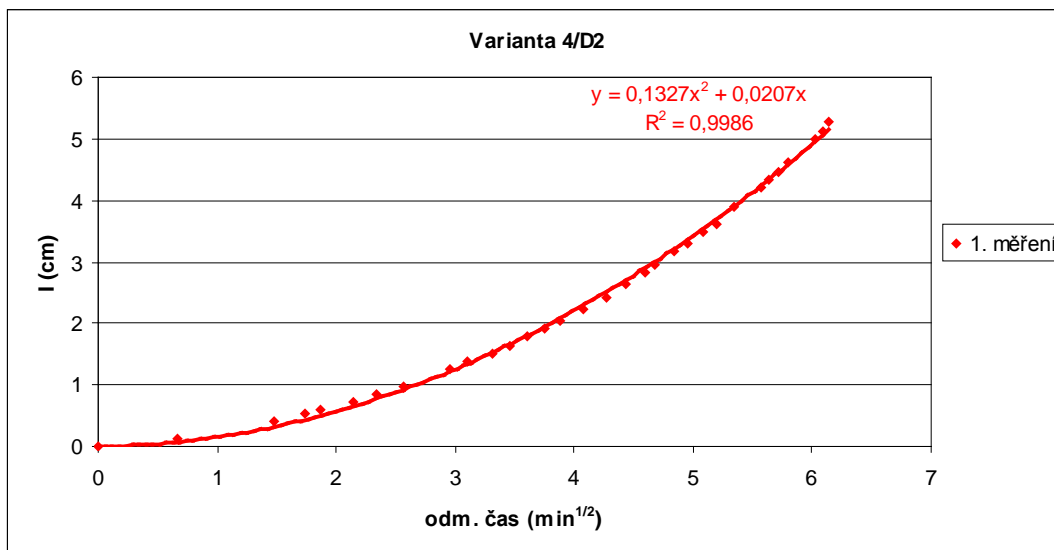
### Varianta D2 (střední dávka)



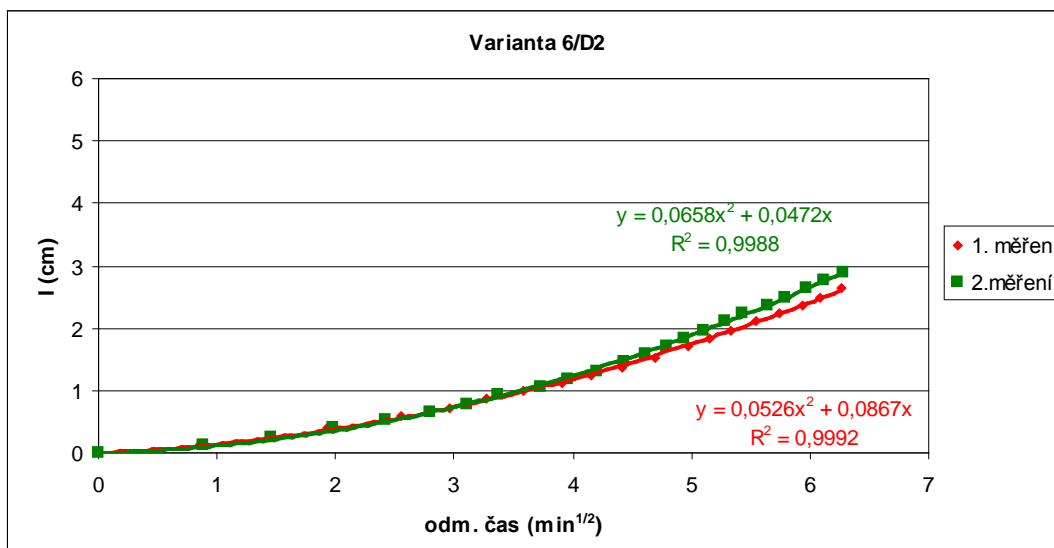
Obr. 63: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 1/D2



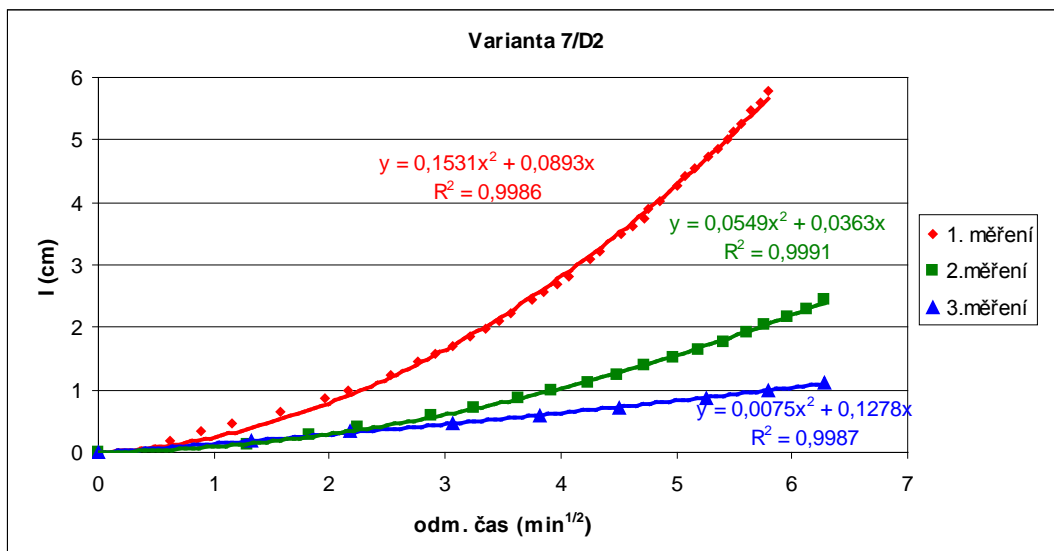
Obr. 64: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 2/D2



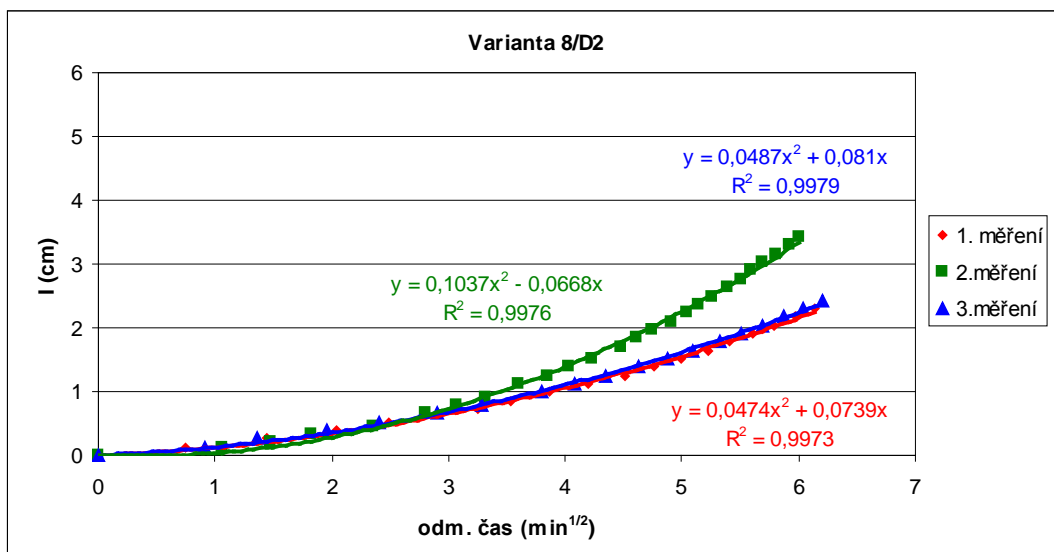
Obr. 65: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 4/D2



Obr. 70: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 6/D2



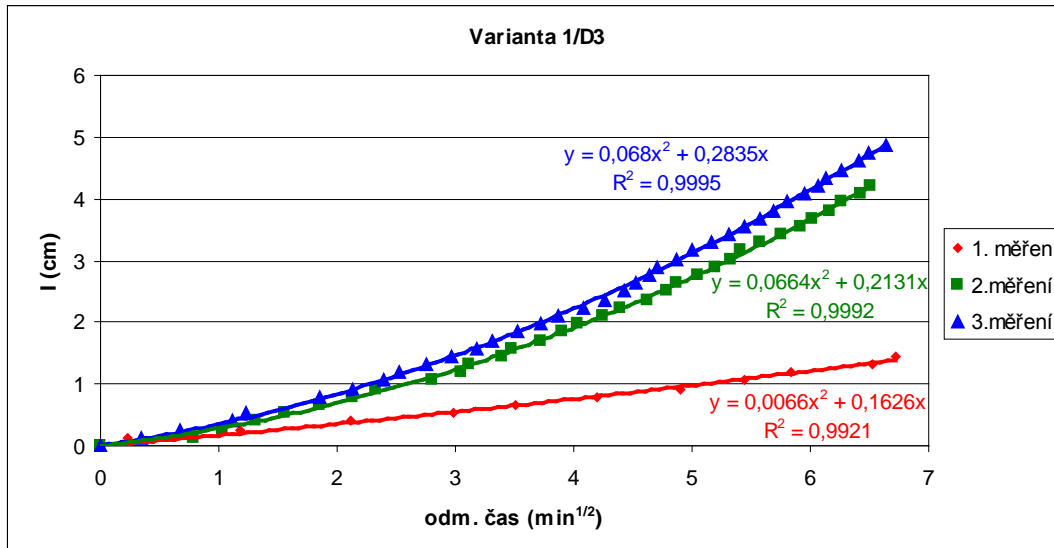
Obr. 71: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 7/D2



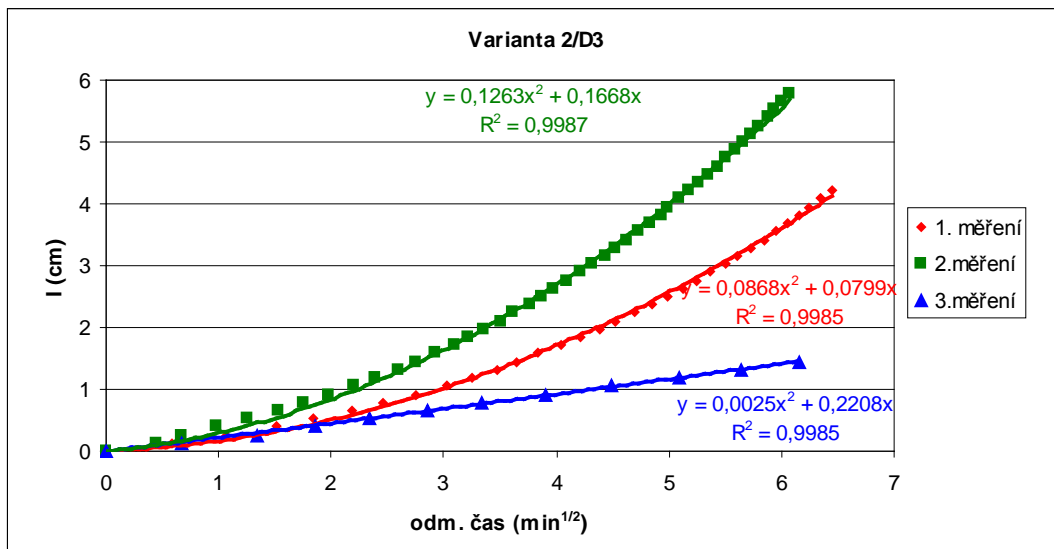
Obr. 72: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 8/D2



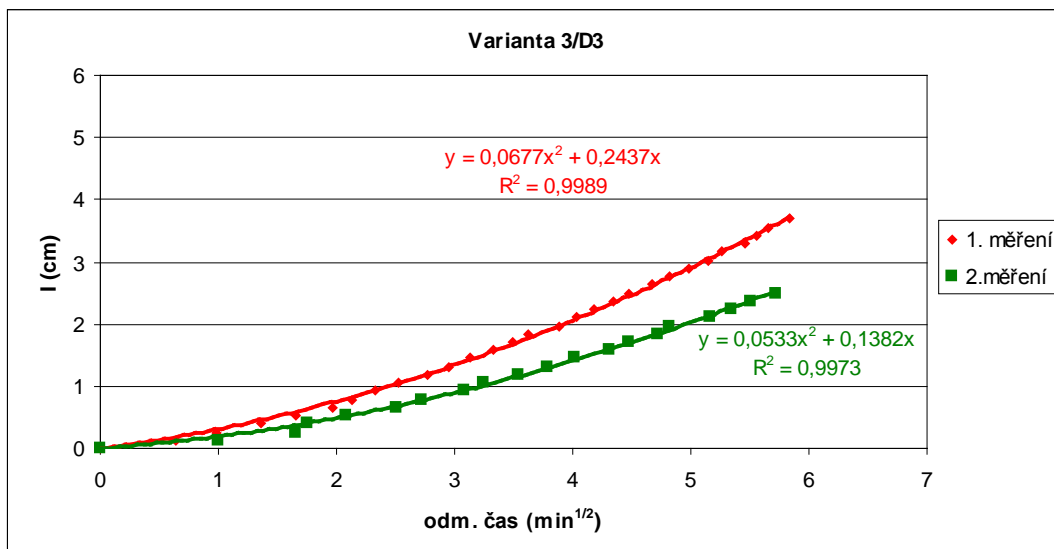
### Varianta D3 (největší dávka)



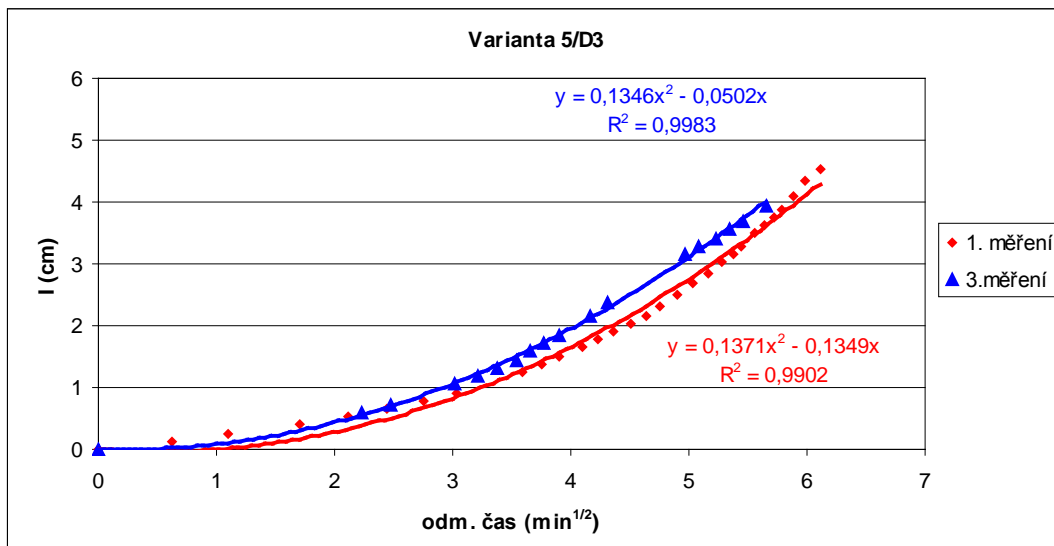
Obr. 73: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 1/D3



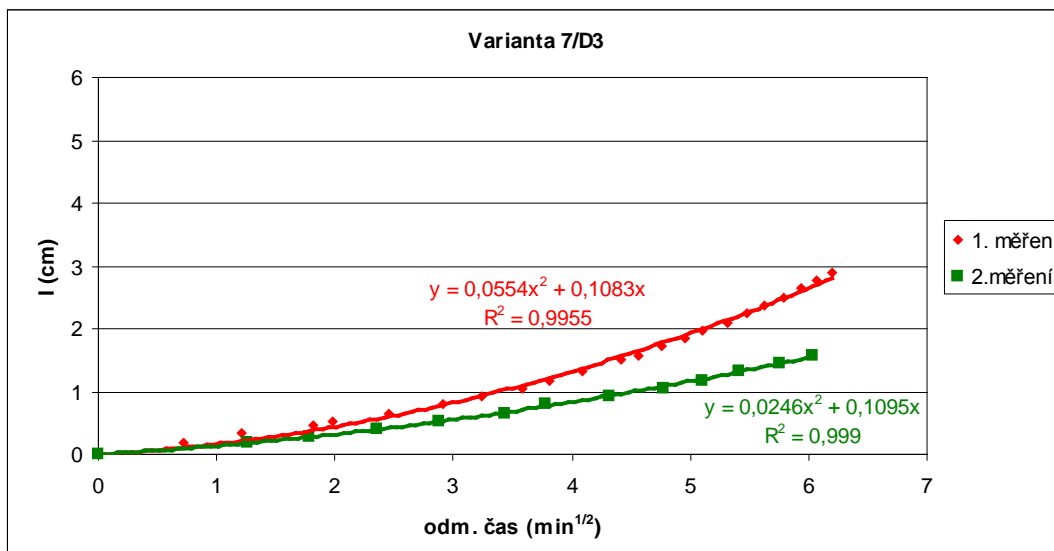
Obr. 74: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 2/D3



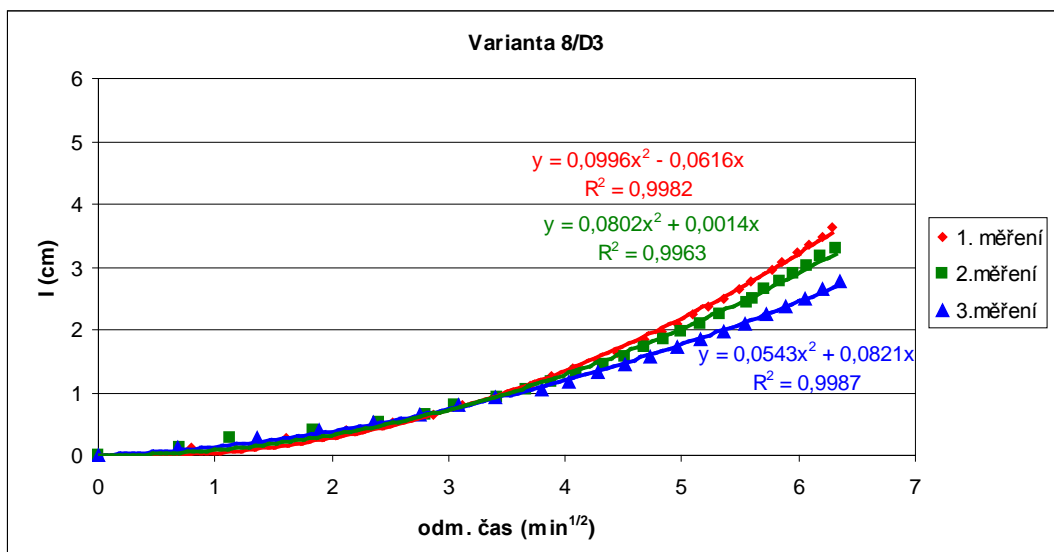
Obr. 75: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 3/D3



Obr. 76: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 5/D3



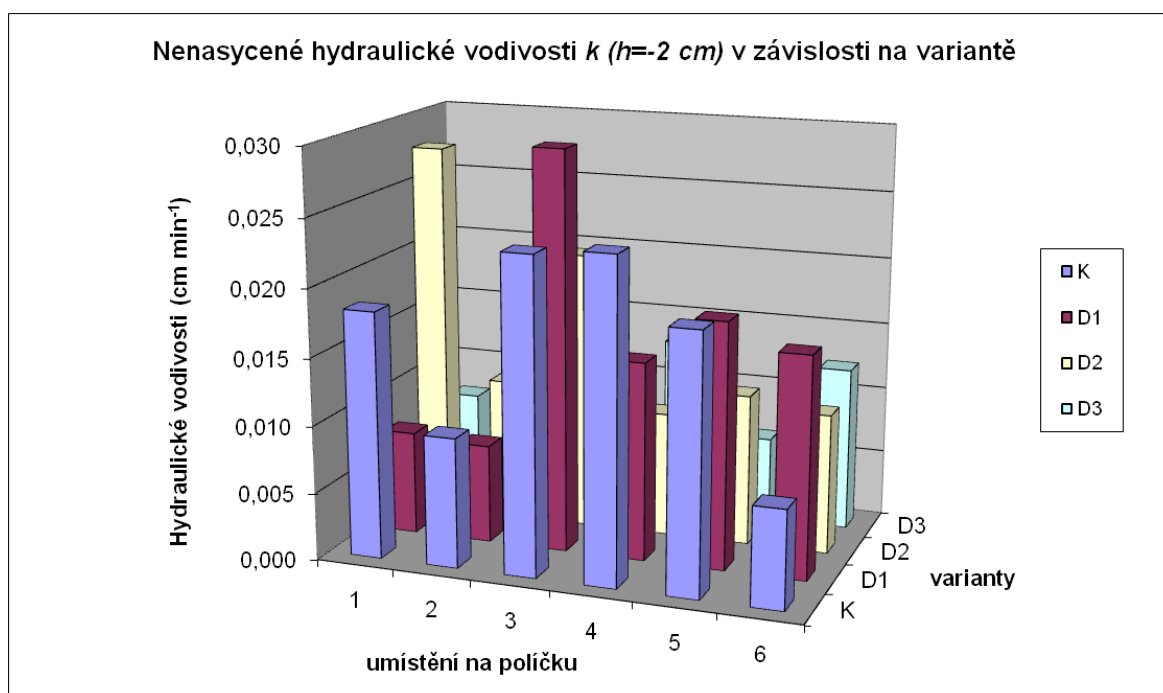
Obr. 77: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 7/D3



Obr. 78: Graf závislosti kumulativní infiltrace na odmocnině času – 8/D3

Tab. 15: Nenasycené hydraulické vodivosti  $K$  ( $h=-2$ ) pro jednotlivá měření – terénní měření

Nenasycené hydraulické vodivosti pro $h=-2$ cm [ $\text{cm min}^{-1}$ ]						
varianta/pole	2K	3K	4K	5K	6K	8K
K	0,0068	0,0133	0,0230	0,0335	0,0207	0,0062
	0,0188	0,0140	0,0235	0,0171	0,0334	0,0082
	0,0292	0,0016		0,0205	0,0030	0,0074
D1	1D1	3D1	4D1	5D1	6D1	7D1
	0,0043	0,0144	0,0300	0,0229	0,0162	0,0216
	0,0107	0,0002	0,0290	0,0072	0,0211	0,0106
D2	1D2	2D2	4D2	6D2	7D2	8D2
	0,0193	0,0136	0,0207	0,0082	0,0239	0,0074
	0,0366	0,0005		0,0103	0,0086	0,0162
D3	1D3	2D3	3D3	5D3	7D3	8D3
	0,0010	0,0136	0,0106	0,0214	0,0087	0,0156
	0,0104	0,0197	0,0083	0,0000	0,0038	0,0125
	0,0106	0,0004		0,0182		0,0085



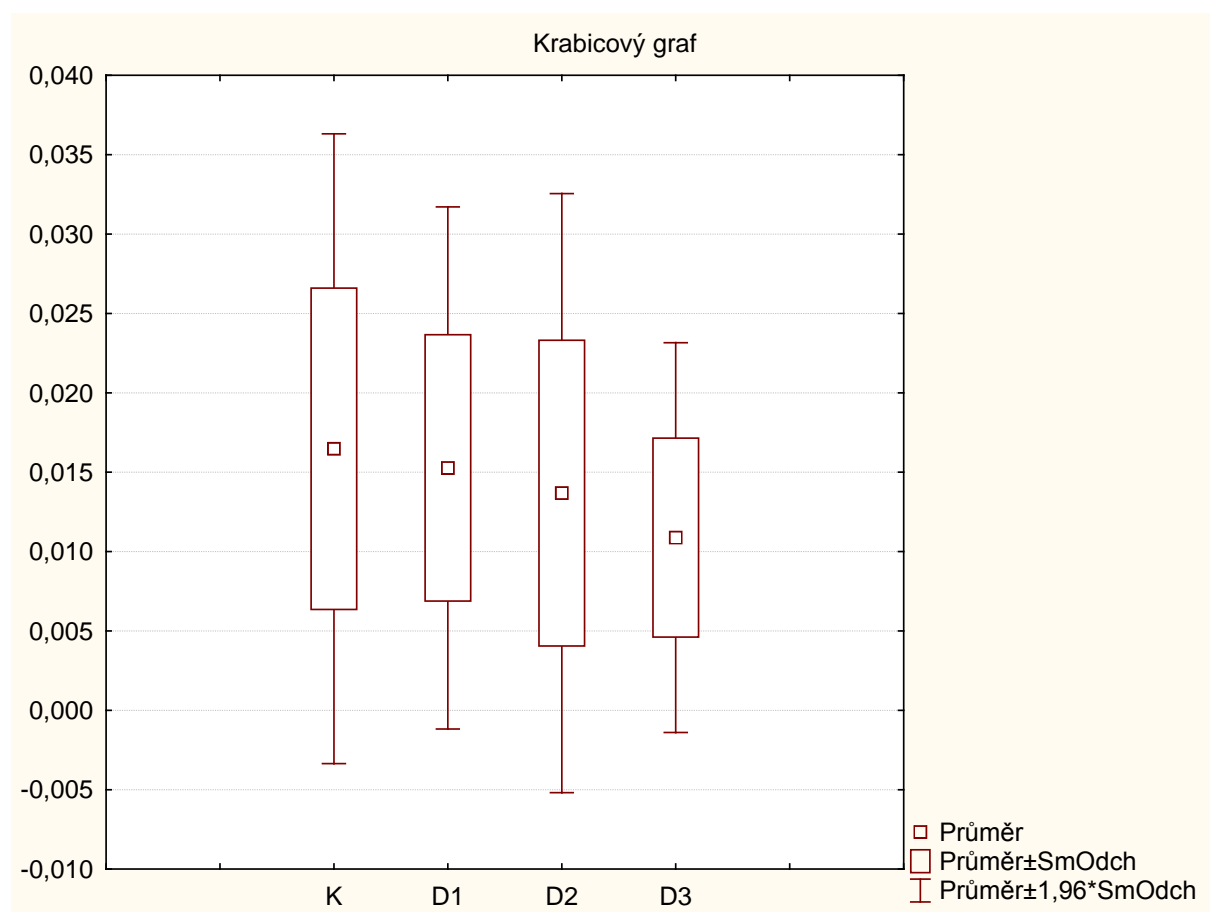
Obr. 79: Souhrnný graf nenasycených hydraulických vodivostí pro všechna měření – terénní měření

Při maloparcelovém polním pokusu sice nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými variantami (tab. 16, obr. 80), ale z měření lze vysledovat určitý trend snižování nenasycené hydraulické vodivosti se vzrůstajícím obsahem kompostu v půdě (od K nejvyšší, po D3 nejnižší). Do pokusných ploch byl kompost v určených dávkách zapraven na jaře 2008

(kap. Materiál a metodika) a po té už nebyly plochy nijak upravovány za účelem lepšího promísení kompostu s půdou a vytvoření přirozené struktury. Vytvoření přirozené struktury bylo dále znemožněno udržováním pokusných ploch bez porostu. Lze se tedy domnívat, že pokud by byl umožněn přirozený vývoj ploch, byl by vliv kompostu a jeho jednotlivých dávek výraznější. Během měření bohužel došlo k technickým problémům měřicího přístroje a než mohl být vyměněn, byly některé plochy změřeny ve 2 opakováních (místo plánovaných 3), což vzhledem k opakování celých ploch nemělo významný vliv. Na pokusném poli nebyl pozorován významný rozdíl mezi výsledky získanými z krajních či prostředních ploch (obr. 22) u žádného z měření.

Tab. 16: Popisné statistiky polního pokusu variant K až D3

Varianta	Popisné statistiky				
	Průměr	Minimum	Maximum	Rozptyl	Sm.odch.
K	0,016482	0,001600	0,033500	0,000102	0,010121
D1	0,015275	0,000200	0,030000	0,000070	0,008390
D2	0,013686	0,000500	0,036600	0,000093	0,009627
D3	0,010887	0,000400	0,021400	0,000039	0,006264

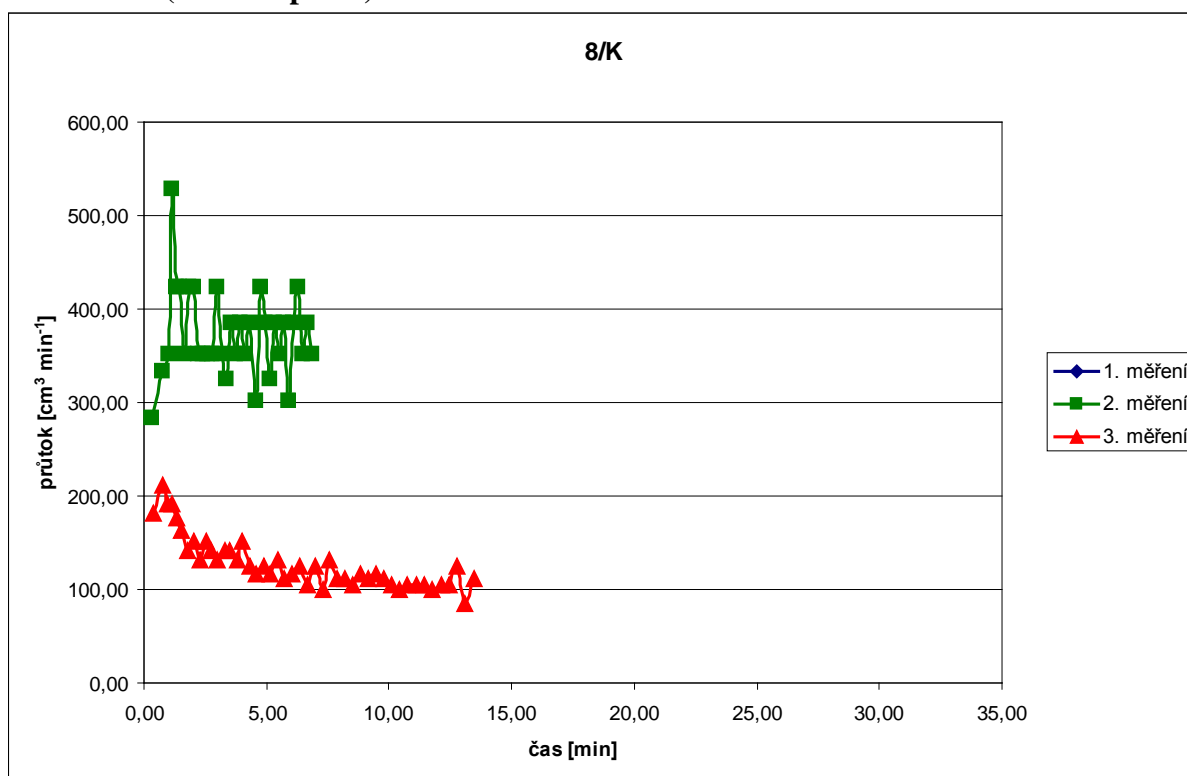


Obr. 80: Grafické vyjádření popisných statistik polního pokusu variant K až D3

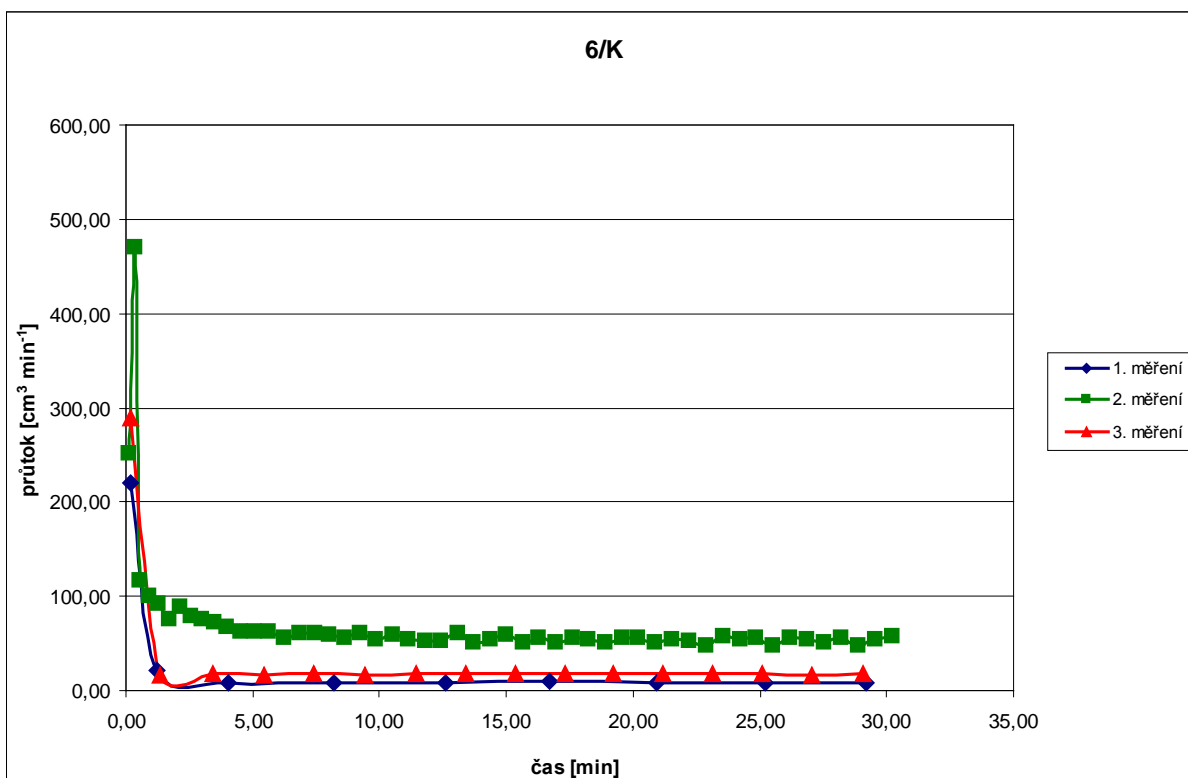
### 5.2.2. Měření nasycených hydraulických vodivostí $K_s$ pomocí GP

Výsledné grafy pro jednotlivé varianty a měření jsou uvedeny na obr. 81 – 89. Grafy pro variantu K (bez kompostu) vyjadřují obr. 81 - 82, grafy pro variantu D1 (nejmenší dávka kompostu) vyjadřují obr. 83 - 84, grafy pro variantu D2 (střední dávka kompostu) vyjadřují obr. 85 - 86, grafy pro D3 (největší dávku kompostu) vyjadřují obr. 87 – 88. Naměřené hodnoty nasycených hydraulických vodivostí  $K_s$  pomocí GP v terénu jsou shrnuty v tab. 17. Graf zobrazující nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$  všech měření a variant vyjadřuje obr. 89.

#### Varianta K (bez kompostu)

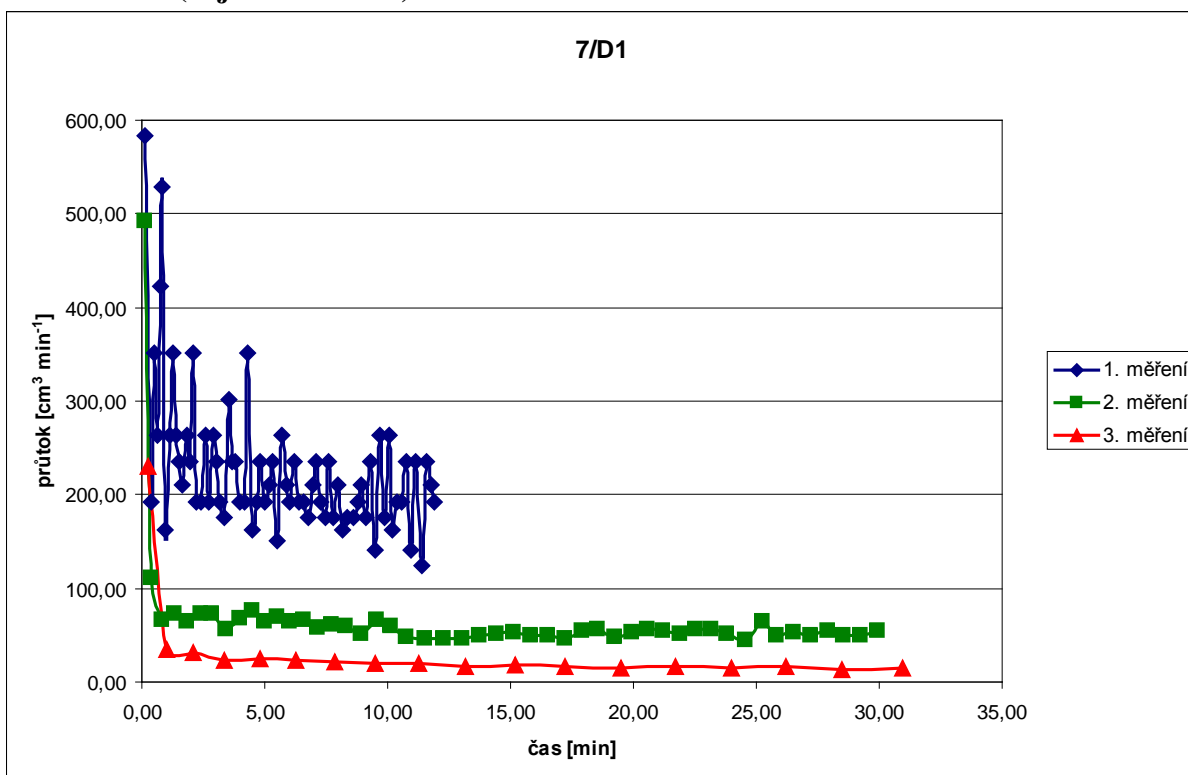


Obr. 81: Graf závislosti průtoku na čase – 8/K

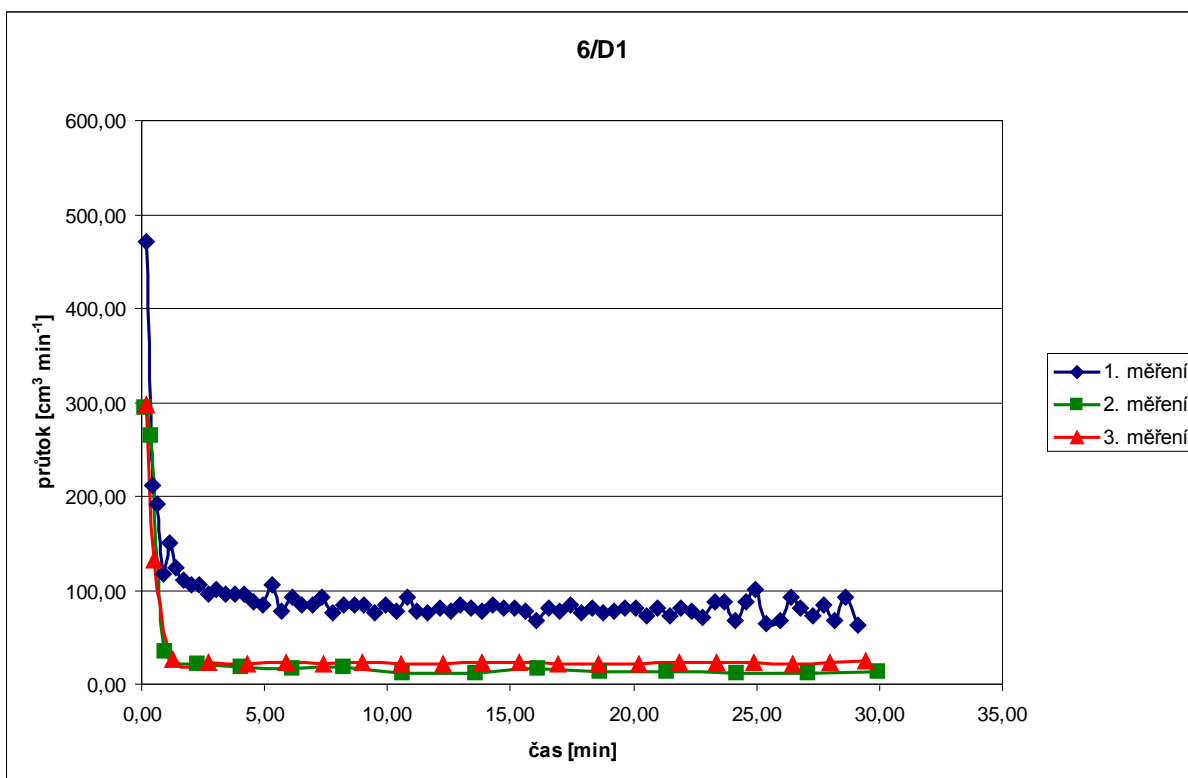


Obr. 82: Graf závislosti průtoku na čase – 6/K

**Varianta D1 (nejmenší dávka)**

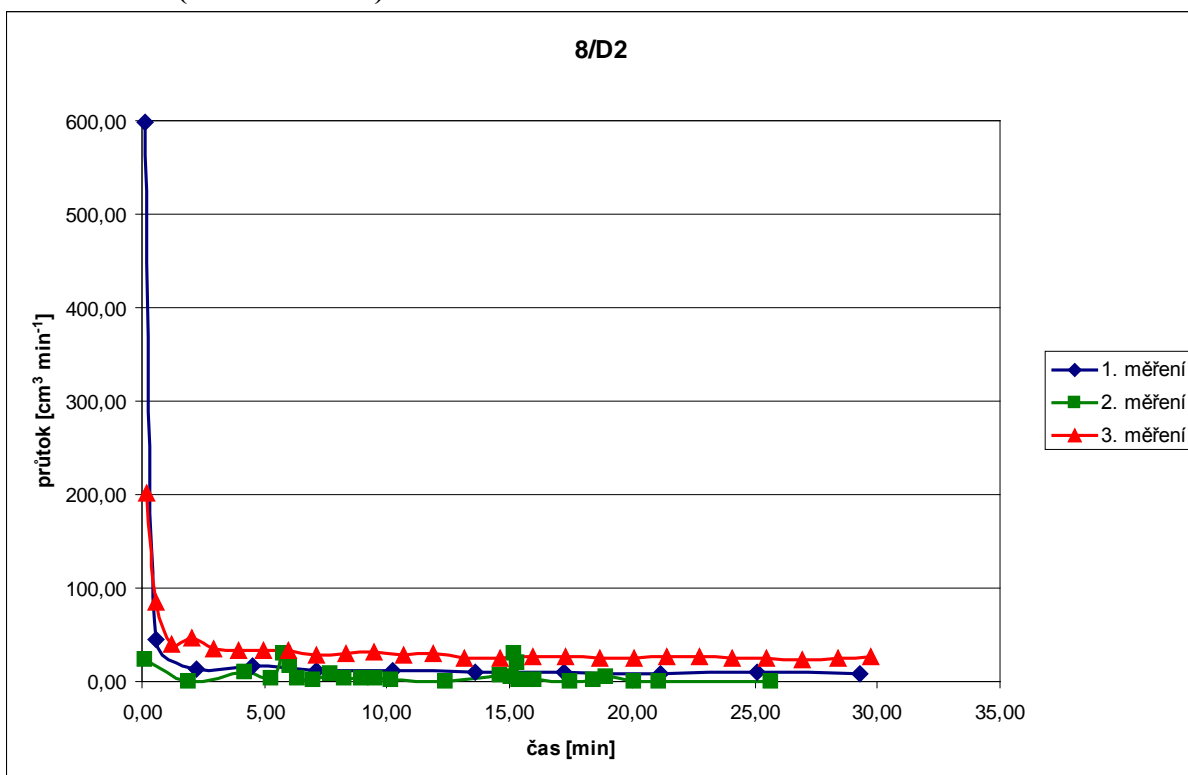


Obr. 83: Graf závislosti průtoku na čase – 7/D1

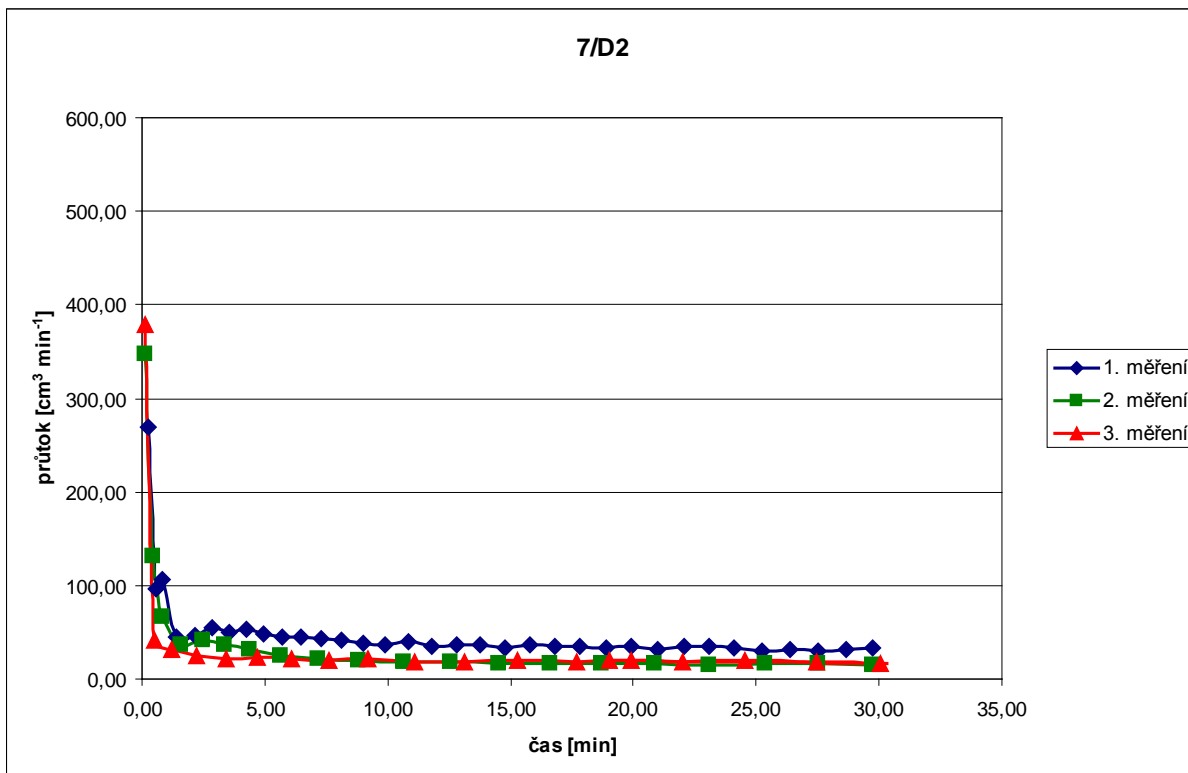


Obr. 84: Graf závislosti průtoku na čase – 6/D1

**Varianta D2 (střední dávka)**

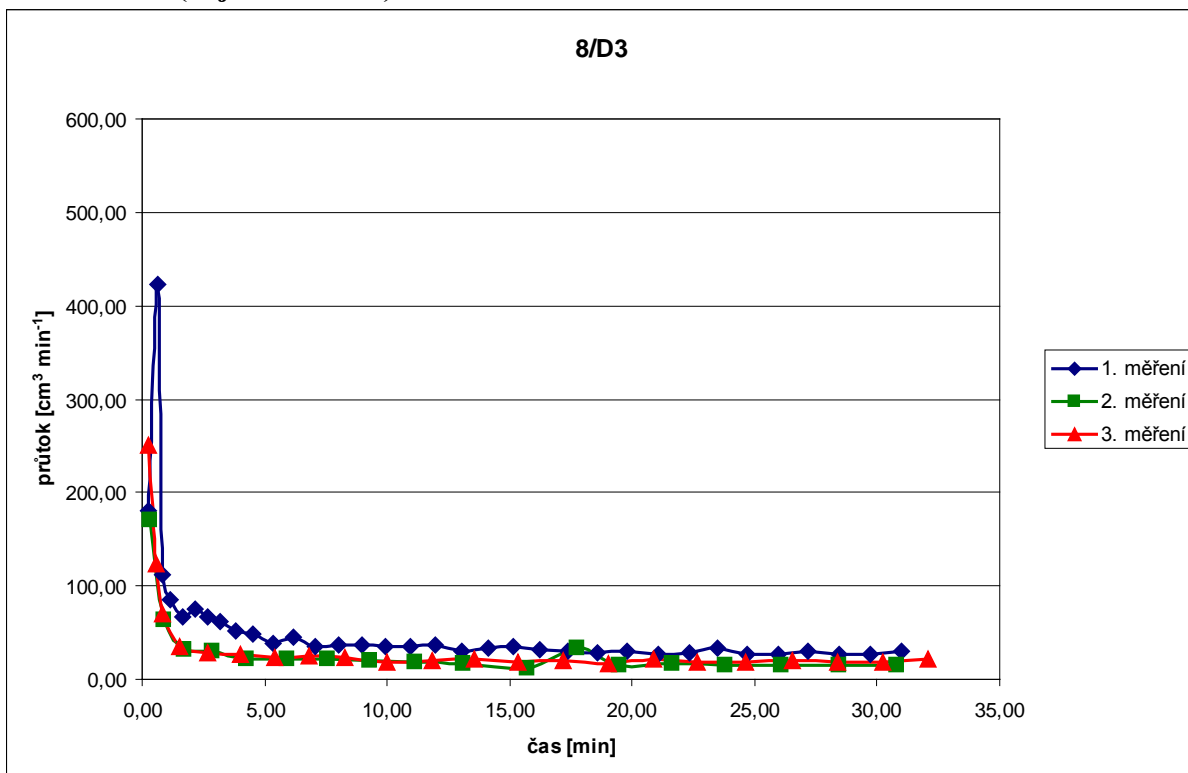


Obr. 85: Graf závislosti průtoku na čase – 8/D2



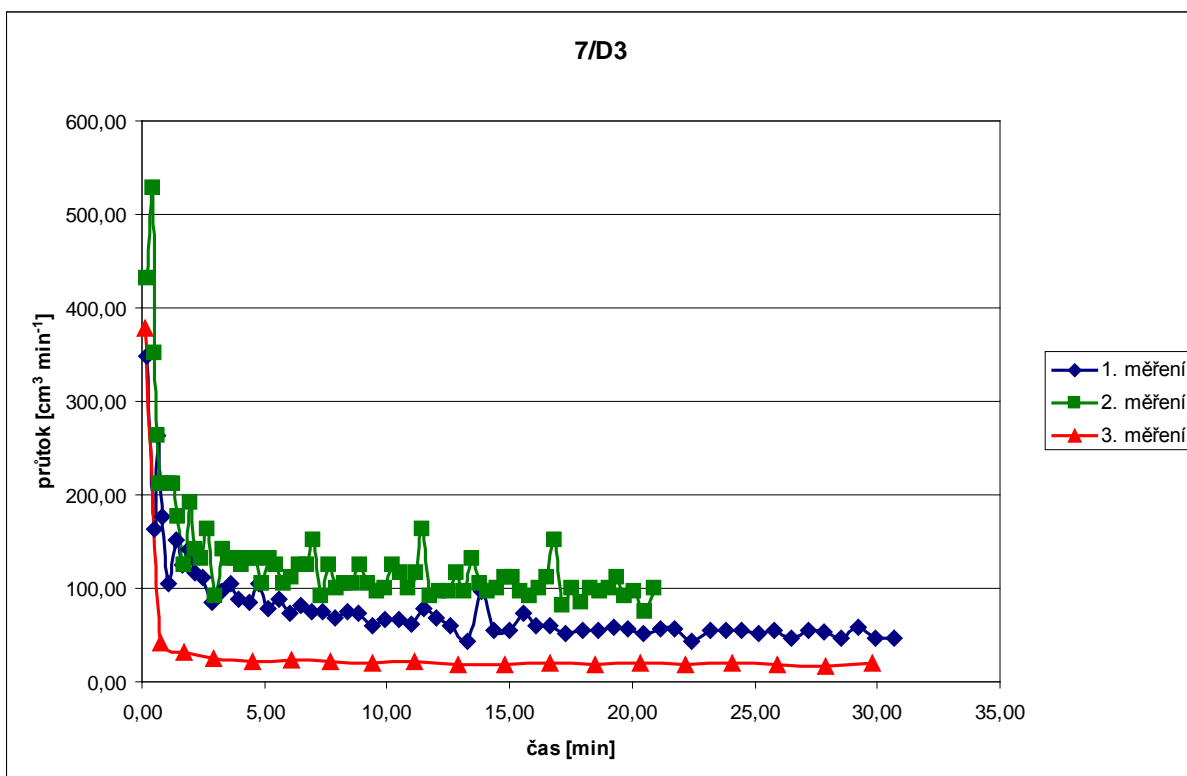
Obr. 86: Graf závislosti průtoku na čase – 7/D2

**Varianta D3 (největší dávka)**



Obr. 87: Graf závislosti průtoku na čase – 8/D3



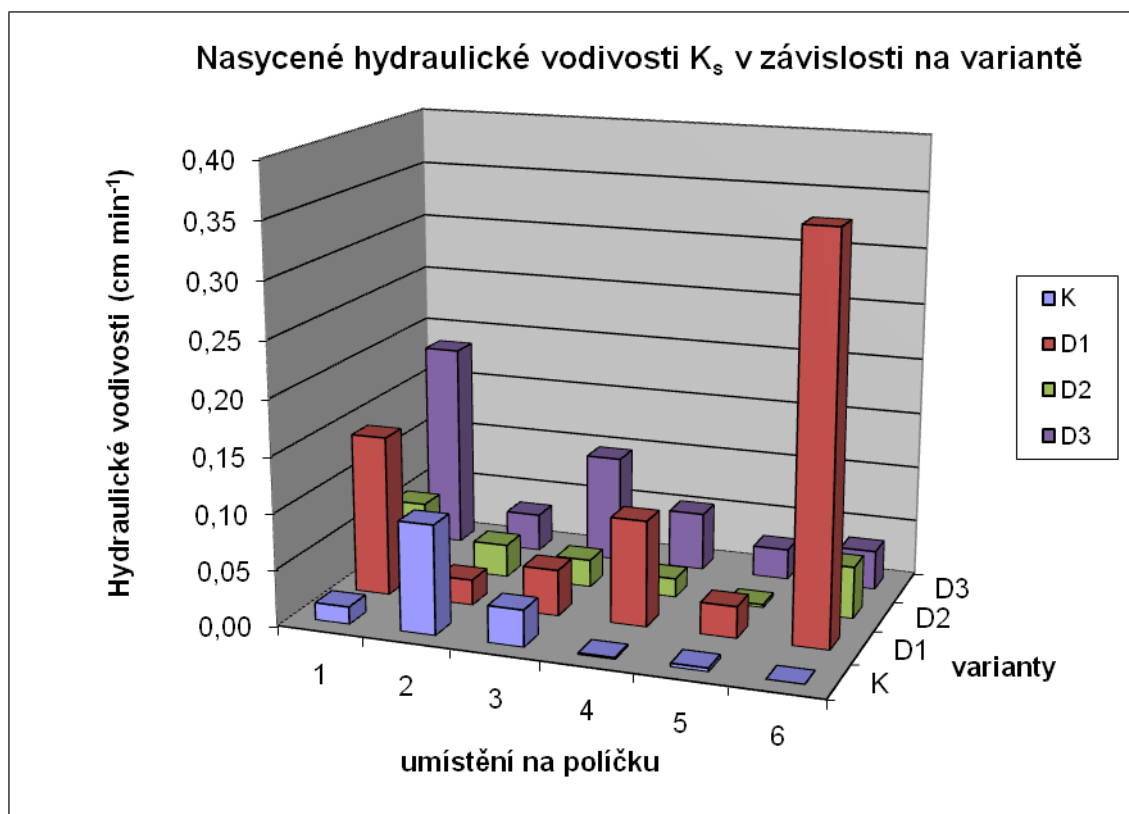


Obr. 88: Graf závislosti průtoku na čase – 7/D3

Tab. 17: Nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$  [ $\text{cm min}^{-1}$ ] pro jednotlivá měření

Nasycené hydraulické vodivosti $K_s$ [ $\text{cm min}^{-1}$ ]						
Varianta	1. měření	2. měření	3. měření	1. měření	2. měření	3. měření
K (6/K, 8/K)	0,0155	0,0976	0,0328	0,0015	0,0032	0,0000
D1 (6/D1, 7/D1)	0,1437	0,0228	0,0412	0,0942	0,0282	0,3554
D2 (7/D2, 8/D2)	0,0596	0,0295	0,0247	0,0168	0,0027	0,0464
D3 (7/D3, 8/D3)	0,1850	0,0340	0,0964	0,0523	0,0275	0,0351

... měření nezahrnutá do analýzy

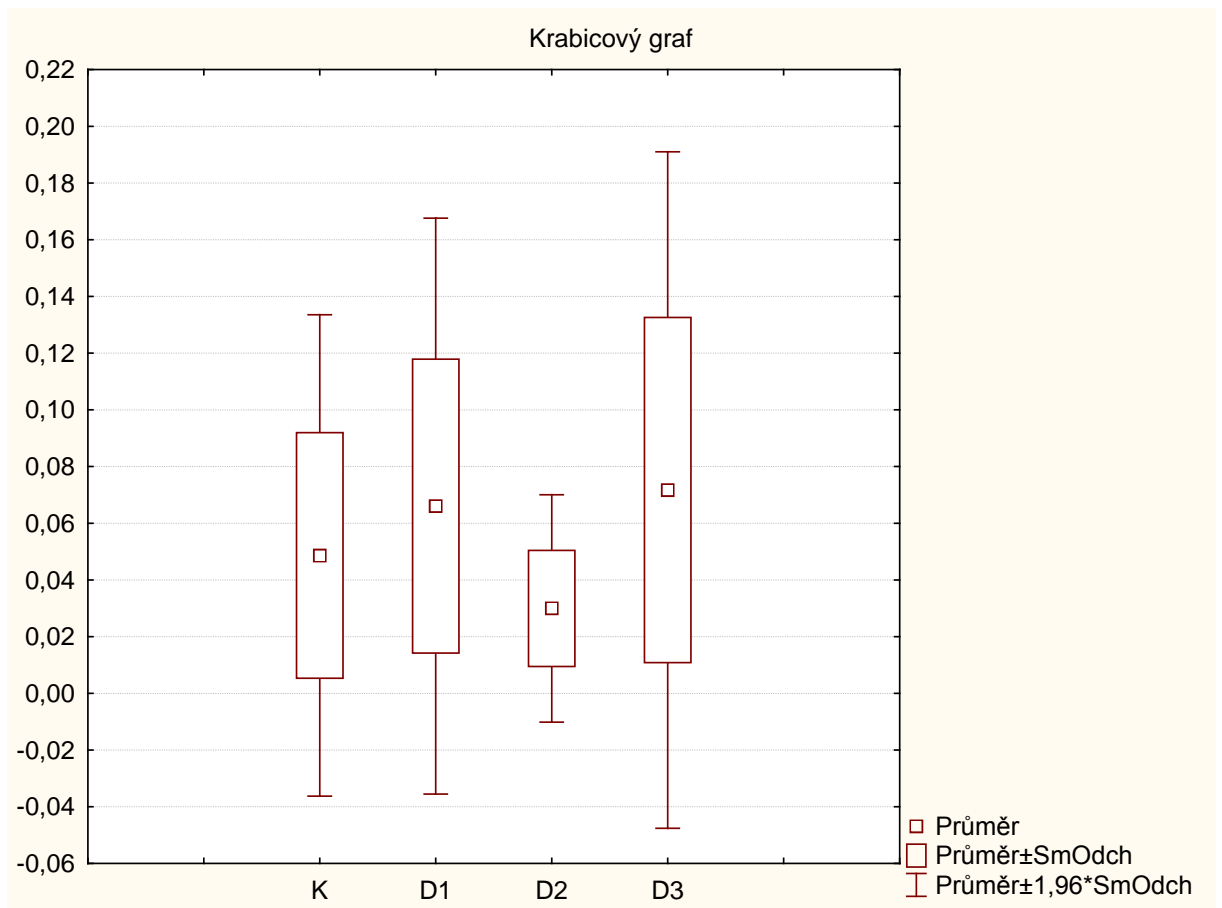


Obr. 89: Souhrnný graf nasycených hydraulických vodivostí pro všechna měření pomocí GP

Statistické zpracování jednotlivých měření a variant je shrnuto v tab. 18 resp. obr. 90. Z výsledků vyplývá, že mezi jednotlivými variantami nebyl prokázán významný rozdíl na hladině pravděpodobnosti 95 %. Na měřené pokusné ploše 8/K (obr. 81) a 7/D1 (obr. 83, 3. měření) zřejmě došlo k výskytu velkých gravitačních pórů, v důsledku čehož došlo k velice rychlému odtoku vody, a proto nebylo toto měření zahrnuto do závěrečného vyhodnocení. Na pokusném políčku nebyl pozorován významný rozdíl mezi výsledky získanými z krajních či prostředních ploch (obr. 22) ani u těchto měření.

Tab. 18: Popisné statistiky polního pokusu variant K až D3

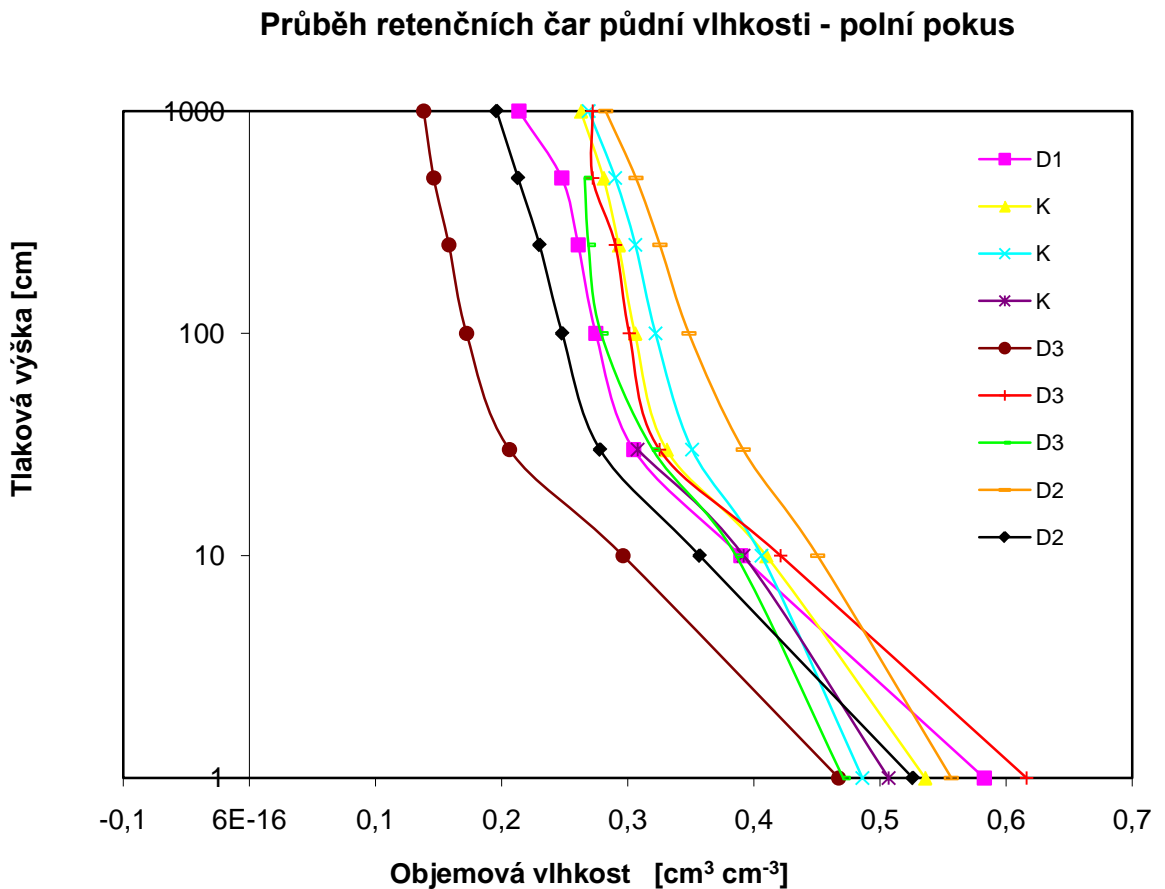
Varianta	Popisné statistiky				
	Průměr	Minimum	Maximum	Rozptyl	Sm.odch.
K	0,048636	0,015506	0,097643	0,001876	0,043309
D1	0,066037	0,022841	0,143707	0,002686	0,051823
D2	0,029954	0,002730	0,059623	0,000418	0,020456
D3	0,071708	0,027537	0,184967	0,003705	0,060868



Obr. 90: Grafické vyjádření popisných statistik polního pokusu variant K až D3

### 5.2.3. Laboratorní stanovení průběhů retenčních čar

Průběh retenčních čar půdní vlhkosti jednotlivých variant maloparcelového polního pokusu znázorňuje obr. 91. Z varianty s největším zastoupením kompostu (D3) a z kontrolní varianty bez kompostu (K) byly průběhy retenčních čar stanoveny ve 3 vzorcích. Z ostatních variant (D1, D2) bylo provedeno stanovení ve 2 vzorcích. Jedno z měření pro variantu D1 není uvedeno, protože pokus byl z technických důvodů předčasně zrušen. Z grafu (obr. 91) je patrné, že se mezi variantami nevyskytují významné rozdíly či souvislosti.



Obr. 91: Průběh retenčních čar půdní vlhkosti variant K, D1, D2, D3

## 6. Závěr

Výsledky studií zaměřených na toto téma nejsou jednoznačné, což již bylo diskutováno v úvodu a potvrdila to i tato práce. Při nádobových pokusech byl vliv přídavku kompostu na hydraulické vlastnosti půdy prokázán např. Zeytinem and Baranem (2003) či Aggelidisem and Londrou (2000), na druhou stranu Kahle and Belau (1998) u svého krátkodobého pokusu významný vliv nepozorovali. V polních pokusech vliv kompostu potvrdili např. Suzuki and Noble (2007), ale např. Evanylo and Sharony (2002) a Glab et al. (2009) několikaleté aplikaci kompostu žádné zlepšení hydraulických vlastností půdy. V této práci se objevil určitý trend snižování  $K$  ( $h=-2$ ) s přibývajícím množstvím kompostu u terénního měření (maloparcelového polního pokusu) přístrojem MDI, ale k vytvoření přesvědčivých závěrů je nutné provést další studie. Při stanovení průběhů retenčních čar v našich pokusech neměl aplikovaný kompost statisticky prokazatelný vliv. Zdánlivě se retenční schopnost půdy s přídavkem kompostu zvýšila, avšak vliv jednotlivých podílů nebyl exaktně prokázán. V nádobovém pokusu to může být dáno tím, že kompost byl v malém zastoupení (tab. 9) a měření bylo provedeno bezprostředně po připravení směsi. Půda ještě nebyla konsolidována a nebyla vytvořena půdní struktura. V případě maloparcelového polního pokusu výsledky mimo jiné ukázaly i fakt, že umělé udržování půdy (s aplikovaným kompostem) bez porostu není vhodné, protože kompostu není umožněno se do půdy významněji integrovat (např. prokořeněním rostlin atp.).

Poznatky a data získané v této práci byly a budou dále využity v projektu NAZV č. QH 81200 „Optimalizace vodního režimu v krajině a zvýšení retenční schopnosti krajiny uplatněním kompostů z biologicky rozložitelných odpadů na orné půdě i trvalých travních porostech“ řešeného ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky, v. v. i. v Praze.

## **7. Seznam literatury**

- Aggelides, S. M., Londra, P. A. 2000. Effects of compost produced from ton wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Technology*. 71:253-259.
- Al-Widyan, M. I.; Al-Abed, N.; AL-Jalil, H. 2005. Effect of Composted Olive Cake on Soil physical Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, p. 1199 – 1212.
- Amoozegar, A. 2002. Models for Field Determination of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of North Carolina Proceedings*, Vol. XLV, 11 p.
- Badalíková B., Hrubý J. 2008. Infiltrace vody do půdy vypovídá o stavu půdního prostředí. In CD: Využití zemědělské techniky pro trvale udržitelný rozvoj. MZLU, ZF Lednice, VÚZT v.v.i. Praha, s. 25 – 30, ISBN 978–80–7375–177–7.
- Bresson, L. M., Koch, C., Le Bissonnais, Y., Barriuso, E., Lecomte, V. 2001. Soil Surface Structure Stabilization by Municipal Waste Compost Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, p. 1804–1811.
- Brooks, R. H., Corey, A., T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper 3*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Curtis, M. J.; Claassen, V. P. 2007. Using Compost to Increase Infiltration and Improve the Revegetation of a Decomposed Granite Roadcut. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, February, Vol. 133, No. 2, p. 215 – 218.
- ČSN 46 5302. Značení charakteru půd zpracovávaných mechanizačními prostředky. Praha, Český normalizační institut, 1981, 20 s.
- Darcy, H. 1856. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* ("The Public Fountains of the Town of Dijon"), Dalmont, Paris.
- Dane, J. H., Topp, G. C. 2002. *Method of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.

Daniels, J. L., Hourani, M. S., Harper, L. S. 2009. Organo-silane chemistry: A water repellent technology for coal ash and soils. World of Coal Ash Conference, May 4-7, Lexington, KY, USA, <http://www.flyash.info/>

Decagon Devices. 2007. Inc: Mini Disk Infiltrrometer. Version 6, 2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163, 23 p.

Elrick, D. E., Reynolds, W. D., Tan, K. A. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monitoring Review*. 9: p. 184-193.

Epstein, E. 1997. *The Science of Composting*. Technomic Publishing Co INC, Pennsylvania, 487 p., ISBN 1-56676-478-5.

Evanylo, G.; Sherony, C. 2002. Agronomical and environmental effects of compost use for sustainable vegetable production. *Composting and Compost Utilization, Int. Symposium 6. – 8. 5.*, Columbus, Ohio, USA.

Gardner, W. H. 1986. Water content, In A. Klute (Ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd Edition*, Agron.Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.

Glab, T., Zaleski, T., Erhart, E., Hartl, W. 2009. Effect of biowaste compost and nitrogen fertilization on water properties of Mollic-gleyic Fluvisol, *Int. Agrophysics*, 23:123-128.

Gunnarsdotter, R. 2001. Emission of Amonia, Nitrous Oxide and Methane during composting of Organic Household Waste. Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

Hladík, J. 2009. Půda je nenahraditelná jako výrobní prostředek, ale i jako přírodní fenomén. Sborník konference BRO „Trvale udržitelný systém nakládání s bioodpady, kvalita vstupu a výstupu“, Náměšť nad Oslavou, ZERA, ISBN 978-80-87226-03-2.

Kahle, P., Belau, L. 1998. Modellversuche zur Prüfung der Verwertungsmöglichkeiten von Bioabfallkompost in der Landwirtschaft. *Agrobiological Research* 51, p. 193 – 200 Modul 1: Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Studie im Auftrag des BUWAL, 2003.

- Kalina, M. 2004. Kompostování a péče o půdu. Grada Publishing, a. s., Praha, 116 s., ISBN 80-247-0907-4.
- Kodešová, R. 2005. Modelování v pedologii. Skriptum, Česká zemědělská univerzita v Praze, ISBN 80-213-1347-1, 150 s.
- Kodešová, R. 2007. Charakteristiky pórového systému v půdních hydraulických funkcích. Projekt GA103/05/2143, (doba trvání 2005-2007, GA0/GA).
- Kodešová, R., Pavlů, L., Kodeš, V., Žigová, A., Nikodem, A. 2007. Impact of spruce forest and grass vegetation cover on soil micromorphology and hydraulic properties of organic matter horizon. *Biologia*, 62(5), p. 565-568.
- Kollárová, M. 2007. Výzkum vybraných podmínek přeměny zbytkové biomasy procesem řízeného mikrobiálního kompostování. Disertační práce, MZLU, Brno, ZF Lednice.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R. 1994. Soil Hydrology. Catena-Verlag, Cremlingen-Destedt, 288 p., ISBN 3-923381-26-3.
- Lawrence, E. J., Hornberger, M. G. 2007. Soil moisture variability across climates zones. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L20402, 5 p., doi: 10.1029/2007GL031382.
- Lewis, S. A., Wu, Q. J., Robichaud, R. P. 2006. Assessing burn severity and comparing soil water repellency, Hayman Fire, Colorado. *Hydrological Processes* 20, p. 1 - 16.
- Lhotský, J. a kol. 1994. Kultivace a rekultivace půd. VÚMOP, v. v. i., 198 s.
- Lichner, L., Orfénius, T., Nováková, K., Šír, M., Tesař, M. 2007a. The impact of Vegetation on Hydraulic Conductivity of Sandy soil. *Soil and Water Res.* 2, p. 59 – 66.
- Lichner, L., Hallet, P. D., Feeney, S. D., Dugova, O., Šír, M., Tesař, M. 2007b. Field measurement of soil water repellency and its impact on water flow under different vegetation. *Biologia*, Bratislava, Section Botany 62/5, p. 537 – 541, DOI: 10.2478/s11756-007-0106-4.



Maluem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3), p. 513-522.

Minasny, B. 2000. Efficient Methods for Prediction Soil Hydraulic Properties. Ph.D. Thesis, Departement of Agricultural Chemistry and Soil Science, The University of Sydney, p. 47 – 156.

Murray, C., Ward, A., Wilson, J. 2003. Influence of Clastic Dikes on Vertical Migration of Contaminants in the Vadose Zone at Hanford. Final Report, Pacific Northwest National Laboratory, U. S. Department of Energy, p. 10-11, DE-AC06-76RL01830

Ouattaraa, K., Outtaraa, B., Nybergh, G., Sédogoa, M. P., Malmerb, A. 2007. Ploughing frequency and compost application effects on soil infiltrability in a cotton–maize (*Gossypium hirsutum*–*Zea mays* L.) rotation system on a Ferric Luvisol and a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil & Tillage Research*, vol. 95, iss. 1-2, p. 288-297.

Özenç, D. B.; Özenç, N. 2008. Short-Term Effects of Hazelnut Husk Compost And Organic Amendment Applications On Clay Loam Soil. *Compost Science & Utilization* Vol. 16, No. 3, p. 192 – 199.

Philip, J.R. 1968. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosci.* 5: 215-305.

Pini, R., Sparvoli, E., Scatena, M., Pucci, A., D'Acqui, L. P. 2010. Compost incorporation, soil aggregates and organic C sequestration in two different Tuscan soils. *Geophysical Research Abstracts* 12: EGU2010-8184-2, EGU General Assembly.

Plíva, P., Jelínek, A. 1996. Technické prostředky používané při finalizaci v kompostovacích linkách. Kompostování, moderní zpracování rostlinných zbytků. Sborník referátů ze semináře pořádaného Ústavem zemědělské techniky Zahradnické fakulty MZLU v Brně, VÚZT Praha, Mze a Vinopol Velké bílovice s.r.o. Velké Bílovice, s. 39 – 51.

Plíva, P., Altmann, V., Jelínek, A., Kollárová, M., Stolařová, M. 2005. Technika pro kompostování v pásových hromadách. VÚZT, v. v. i., Praha, 72 s., ISBN 80-86884-02-3.

Plíva, P., Bannout J., Habart, J., Jelínek, A., Kollárová, M., Roy, A., Tomanová, D. 2006. Zakládání, průběh a řízení kompostovacího procesu. VÚZT, v. v. i., Praha, 65 s., ISBN 80-86884-011-2.

Plíva, P., Altmann, V., Habart, J., Jelínek, A., Kollárová, M., Marešová, K., Mimra, M., Váňa, J., Vostoupal, B. 2009. Kompostování v pásových hromadách na volné ploše. Profi Press, s. r. o., Praha, 136 s., ISBN 978-80-86726-32-8.

Rajeswari, M.; Maruthi, G. R., Ranghaswami, M. V., Mistra, P. K. 2007. Screening of Soil Amendments for Efficient Water-Holding Capacity Based on a Rainfall-Infiltration Model in a Vertisol. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, p. 468 – 474.

Rajkai, K., Kabos, S., van Genuchten, M., Th. 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. Soil and Tillage Research 79, p. 145-152.

Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1, p. 318-333.

Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Ashmun, L. E. 2008. New Procedure for Sampling Infiltration to Assess Post-fire Soil Water Repellency. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 14 p., RMRS-RN-33.

Soilmoisture Equipment Corp. 2008. Products, Operating instructions. Santa Barbara, CA 805-964-3525, dostupné z [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com).

Stoffela, P. J., Kahn, B. A. 2001. Compost Utilization in Horticulture cropping system. Lewis Publisher, USA.

Stratton, M., Barker, V. A., Rechcigl, J., E. 1995. Soil Amendments and environmental duality. Chapter 7 – Compost p. 250 - 309, Lewis Publisher USA, ISBN 0-87371-859-3.

Suzuki, S., Noble, A. D. 2007. Improvement in Water-Holding Capacity and Structural Stability of a Sandy Soil in Northeast Thailand. *Arid Land Research and Management* 21, p. 37 – 49.

Šindelář, R., Kroulík, M., Kovaříček, P., Hůla, J. 2008. Měření infiltrace vody do půdy pomocí kruhového infiltrometru Mini Disk. *Agritech* 3, 9 s.

Valla, M., Kozák, J., Němeček, J., Matula, S., Borůvka, L., Drábek, O. 2004. Pedologické praktikum. Skriptum, Česká zemědělská univerzita v Praze, 151 s., ISBN 80-2130914-8.

Van Genuchten, M., Th., Wierenga, P., T. 1976. Mass transfer studies in sorbit porous media: I. Analytical Solutions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, p. 473-480.

Váňa, J. 1997. Výroba a využití kompostů v zemědělství. Institut výchovy a vzdělávání Mze ČR v Praze, 38 s., ISBN 80-7105-144-6.

Weindorf, D. C.; Zartman, R. E.; Allen, B. L. 2006. Effect of Compost on Soil Properties in Dallas, Texas. *Compost Science & Utilization*, Vol. 14, No. 1, p. 59 – 67.

Zemánek, P. 2000. Využití technických prostředků při kompostování zbytkové biomasy. MZLU, Brno, ZF Lednice, Ústav zahradnické techniky, Lednice.

Zeytin, S.; Baran, A. 2003. Influences of Composted Hazelnut Husk on some Physical Properties of Soils. *Bioresource Technology* 88 (3), p. 241 – 244.

Zhang, R. 1997. Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1024-1030.

#### Software

StatSoft, Inc. 2009. STATISTICA [data analysis software system], version 9.0. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).