

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Odhad počátečních hodnot infiltrace při infiltračních pokusech

The estimation of initial infiltration values during infiltration
experiments

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D.

Diplomant:

Bc. Klára Čeloudová

2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci nazvanou „Odhad počátečních hodnot při infiltračních pokusech“ vypracovala samostatně, pod vedením Ing. Jiřího Pavlásky, Ph.D s pomocí Ing. Lukáše Jašky, Ph.D. Při realizaci diplomové práce jsem použila pouze materiály, které jsem uvedla v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Praze dne

.....

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Jiřímu Pavláskovi, Ph.D a Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při realizaci diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat celé mé rodině za trpělivost a podporu během mého studia.

V Praze dne

.....

Abstrakt

Práce se zabývá terénním měřením infiltrace jednoválcovou metodou na lokalitě Trhových Dušníků, experimentální ploše v Šardicích a stanovení infiltračních vlastností od počátku infiltrace upravenou metodikou. Válec byl zapuštěný pomocí hydraulického systému, což vedlo k menšímu rozrušování půdy, dále byla metodika rozšířena o měření topografie vně válce. Na lokalitě Trhových Dušníků byla provedena tři měření v září 2015, na lokalitě Šardice bylo provedeno 12 měření v termínech konec června 2016 a začátek října 2016. Z terénních měření byly vyhodnoceny infiltrační charakteristiky, jako je kumulativní infiltrace, intenzita infiltrace a referenční hodnoty pro sorptivitu a nasycenou hydraulickou vodivost. Charakteristiky se stanovovaly ve dvou podobách, jedna podoba pro měřenou infiltraci bez zahrnutí počátku, druhá podoba pro infiltraci se zahrnutím počátku. Došlo tak k upřesnění metodiky pro stanovení infiltračních charakteristik se zahrnutím počátku. Měřená data byla dále simulována fyzikálními a empirickými infiltračními rovnicemi Swartzendruber a také dvou a tříparametrickou rovnicí Philipa, Hortona, Mezenceva. Úspěšnost simulací dat byla stanovena kritériem RMSE. Nejlepší shodaměřených a simulovaných dat byla u rovnic Swartzendruber a Mezenceva.

Klíčová slova

Infiltrační válec, intenzita infiltrace, počáteční retence, sorptivita

Abstract

The thesis deals with field measurement using a single ring infiltrometer at the site Trhových Dušníky, experimental plot in Šardice and determining of infiltration properties since the beginning of infiltration by the modified methodology. The ring was embedded using a hydraulic system, which has led to less eroding of soil, after that we also measured topography outside of the ring infiltrometer. There were made three measurements in the location of Trhových Dušníky in September 2015 and at the end of June 2016 and the beginning of October 2016 were performed 12 measurements at the site of Šardice. From field measurements were evaluated infiltration characteristics such as cumulative infiltration, infiltration intensity and a reference value for sorptivity and the saturated hydraulic conductivity. The characteristics were determined in two forms, one form for the measured infiltration excluding the beginning, a second form for infiltration involving the outset. These measurements has helped to refine methodology for determining the infiltration characteristics involving the outset. Measured data were further simulated by physical and empirical infiltration equations of Swartzendruber, and also two and three-parametric equation of Philip, Horton, Mezencev. The success of simulation data was determined by RMSE criterion. The best match of measured and simulated data were at Swartzendrudeba equations and Mezenceva.

Keywords

infiltration roll, the intensity of infiltration, initial retention, sorptivity

1. Úvod.....	9
1.1 Cíl práce.....	9
2. Literární rešerše	10
2.1 Fyzikální vlastnosti půdy	10
2.2 Půdní hydrolimity.....	12
2.3 Půdní potenciál Φ	14
2.4 Hydrofobnost	15
2.5 Půda a pohyb vody v ní	16
2.5.1 Darcyho zákon.....	16
2.5.2 Meze platnosti Darcyho zákona	17
2.5.4 Darcy-Buckinghamova rovnice.....	19
2.5.5 Nenasycená hydraulická vodivost	21
2.5.6 Rovnice kontinuity a Richardsova rovnice	22
2.6 Infiltrace.....	24
2.6.3 Druhy infiltrace	26
2.6.3.1 Stacionární infiltrace	26
2.6.3.2 Nestacionární infiltrace	26
2.6.4 Způsoby měření infiltrace	26
2.6.4.1 Metoda pomocí výtopy – válcová.....	27
2.6.4.2 Podtlakový infiltrometr	28
2.6.4.3 Guelphský permeametr.....	29
2.6.4.4 Simulátor deště	30
2.6.5 Ovlivnění infiltrace.....	30
3. Metody vyhodnocení infiltrace	32
3.1 Fyzikální rovnice.....	32
3.1.1 Green-Ampt 1911	32
3.1.2 J. R. Philip	33
3.2 Empirické rovnice	35

3.2.1 Metoda CN křivek	36
3.4 Vyhodnocení první dávky.....	39
4. Charakteristika místa měření	41
4.1 Trhové Dušníky.....	41
4.1.1 Klimatické podmínky.....	42
4.1.2 Charakteristika prostředí a půdního složení	42
4.1.3 Měření.....	43
4.2 Šardice	44
4.2.1 Klimatické podmínky.....	45
4.2.2 Charakteristika prostředí a půdního složení	47
4.2.3 Měření	49
5. Metodika měření	50
5.1 Příprava měření	50
5.2 Metoda měření	51
5.2.1 Měření infiltrace	51
5.3 Vyhodnocení	53
5.3.1 Vyhodnocení infiltrace.....	53
5.3.2 Vyhodnocení počáteční infiltrace	53
6. Výsledky.....	57
7. Diskuse	64
8. Závěr	66
10. Seznam literárních zdrojů	67
11. Seznam internetových zdrojů.....	69
12. Seznam obrázků, fotografií a tabulek	70
13. Seznam příloh	73

1. Úvod

Půda je jedním z nejcennějších přírodních bohatství. Vytváří a poskytuje prostředí pro život půdních organismů a umožňuje růst rostlinstva. Neméně důležitou vlastností je její funkce jako zásobárny látek, živin a vody. Dále je nezbytnou složkou při tvorbě ekosystémů jelikož zajišťuje koloběh látek.

V dnešní době se více vracíme k řešení půdních vlastností. Jedním ze způsobů jak zjistit vlastnosti půdy, jako jsou sorptivita, nasycená hydraulická vodivost, hodnota kumulativní infiltrace a intenzity infiltrace je použití jednoválcové metody. Pro přesné stanovení hodnot kumulativní infiltrace i intenzity je hodnotit tyto vlastnosti od počátku srážky.

1.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je odhad hodnot počáteční infiltrace na základě provedených infiltračních pokusů. Dílčími cíli je provedení terénního měření upravenou metodikou, vyhodnocení infiltrace bez zahrnutí a se zahrnutím počáteční infiltrace. Z měřených dat se stanoví referenčních hodnoty sorptivity a nasycené hydraulické vodivosti. Vyhodnocení měřené infiltrace empirickými a fyzikálními rovnicemi pak bude porovnáváno s referenčními hodnotami z měřených dat a hodnot odvozených z těchto rovnic.

2. Literární rešerše

2.1 Fyzikální vlastnosti půdy

Fyzikální vlastnosti půdy ovlivňují její úrodnost, náchylnost k erozi či utužování (*Cenia, 2013*).

Mezi základní vlastnosti půdy patří:
struktura půdy, zrnitost, pórovitost, barva, půdní vzduch, půdní vlhkost.

Struktura půdy je dána velikostí a tvarem půdních částic, jinak řečeno obsahuje drobné kamínky, hrudky, prach a volná místa mezi nimi, póry (*Cenia, 2013*).

Dle stupně agregace třídíme půdní strukturu na:

- elementární – sem patří písky, půdní částice nejsou stmeleny v agregáty, za sucha je zemina sypká
- koherentní – půdní částice jsou stmeleny především pomocí jílu a hydroxidů železa
- agregátovou – půdní částice jsou stmelovány pomocí humusových látek, organo-minerálních sloučenin a jílu

Rozlišujeme čtyři třídy půdní struktury v rámci těchto tříd, dále dělíme půdní strukturu na kulovitou, polyedrickou, prismatickou, sloupkovitou a deskovitou (*Šarapatka, 2014*).

Zrnitost někde uváděná jako textura, je dána velikostí elementárních půdních částic. Na hodnocení půdní zrnitosti existuje mnoho klasifikačních řad, ale prakticky všechny se shodují v tom, že částice pod 2 mm tvoří jemnozem půdy, v dalším členění zrnitostních frakcí se však mírně odlišují. Názorná ukázka v tabulce č. 1.

Tab. č. 1: Zrnitostní složení (převzato Šarapatka, 2014)

	BIS	ISSS	USDA	KPP
Jíl	< 0,002	<0,002	<0,002	< 0,001
Prach	<0,06	<0,02	<0,05	<0,05
Písek	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0

BIS – British Standards Institutions

ISSS – International Society of Soil Science

USDA – United States Department of Agriculture

KPP – Komplexní Průzkum Půd – ČR

Jedno z nejstarších třídění frakcí vycházející z práce profesora Kopeckého využívá čtyři stupně:

Jílnaté částice	< 0,01 mm
Prach	0,01 – 0,05 mm
Práškový písek	0,05 – 0,10 mm
Písek	0,10 – 2,00 mm

Třídění dle zrnitostí patří mezi klasifikační systémy půd, dle obsahu jednotlivých frakcí se dále určují půdní druhy na – písčité, hlinitopísčité, písčitolhinité, hlinité, jílovitolhinité, jílovité, jíl.

Pórovitost je vyznačována volnými prostory mezi pevnými půdními částicemi – póry. Těmito póry vniká do půdy vzduch a voda, které dále ovlivňují zvětrávací a půdotvorné procesy. Pórovitost udává Šarapatka (2014) jako poměr objemu pórů k objemu půdy.

$$P = \frac{V_p}{V_s}, \quad 2.1$$

kde je V_p – objem pórů, V_s – celkový objem vzorku.

Většinou se však počítá pomocí objemové (ρ_d) a měrné hmotnosti (ρ_z):

$$P = \frac{\rho_z - \rho_d}{\rho_z} * 100, \quad 2.2$$

tato rovnice vyjadřuje procentuální zastoupení pórů.

Velikost procenta pórovitosti závisí na stupni agregace.

Rozdělení pórů dle Kodešové (2012):

Kapilární póry dělí na, jemné kapilární póry ty jsou schopny dlouhodobě zadržovat vodu a to po počátečním prosycení. Celkový objem pak odpovídá polní kapacitě.

Hrubé kapilární póry se rychle vyprazdňují. Bývají rozděleny náhodně a to především v nestrukturálních půdách.

Makro póry jsou nekapilárními póry, zde nepůsobí kapilární síly. Jedná se především o meziagregátové, pukliny vzniklé činností žížal, kořenů a zpracováním půdy.

Barva je ovlivněna příměsemi barvitých součástí. Sloučeniny Fe (železa) zbarvují půdu dožluta, dohněda či dočervena, sloučeniny Mn (manganu) zbarvují půdu hnědočerně až nafialověle. Dále může půda obsahovat příměsi křemene a jílu, ty nezbarvují nějak určitě, zbarvují jen světlými odstíny.

Po proniknutí vzduchu do půdy se mění jeho složení, například zvýšení obsahu CO₂(oxidu uhličitého), k tomuto zvýšení dochází vlivem dýchání půdních organismů. Provzdušňenost půdy má značný vliv na reakce, které v ní probíhají například mikrobiální rozklad organických zbytků. K samotnému provzdušňování napomáhá i řada živočichů, asi nejznámějším příkladem jsou žížaly.

Půdní vlhkost je závislá na několika faktorech, mezi hlavní patří množství srážek a výška hladiny podzemní vody. Neméně důležitá je vlastnost půdy zadržovat vodu což záleží především na struktuře a textuře (zrnitosti). Množství vody v půdě značně ovlivňuje růst rostlinstva na jejím povrchu.

Půdní vlhkost se stanoví poměrem objemu vody v půdě V_w k objemu půdy V_s .

$$\Theta = \frac{V_w}{V_s}, \quad 2.3$$

tento poměr lze vynásobit 100 a dostat tak procentuální obsah půdní vlhkosti.

Dále lze stanovit hmotnostní vlhkost poměrem hmotnosti půdního vzorku m_w a hmotnosti vysušeného půdního vzorku m_s ,

$$w = \frac{m_w}{m_s}, \quad 2.4$$

i tuto rovnici lze vynásobit 100 a dostat tak procentuální vyjádření.

Pro řadu výpočtů se používá objemové vlhkosti, jak uvádí Kutílek et al. (2004).

2.2 Půdní hydrolimity

Vlhkost půdy se v přírodních podmínkách pohybuje v rozmezí od suché až po mokrou půdu, mezi těmito krajními stavy se vlhkosti plynule mění, a to především v závislosti na evapotranspiraci, srážkách, infiltraci aj. Výsledkem jsou konkrétní

stavy vlhkostí, které se souhrnně nazývají hydrolimity. Pomocí konkrétních hydrolimitů můžeme určit dostupnost vody pro rostliny a pohyblivost vlhkostí v půdě. Hydrolimity nejsou zcela přesně definované, nicméně se praxi běžně používají.

Hydrolimity jsou rozděleny ještě do dvou skupin. První skupina obsahuje základní hydrolimity a druhá skupina obsahuje podmíněné hydrolimity.

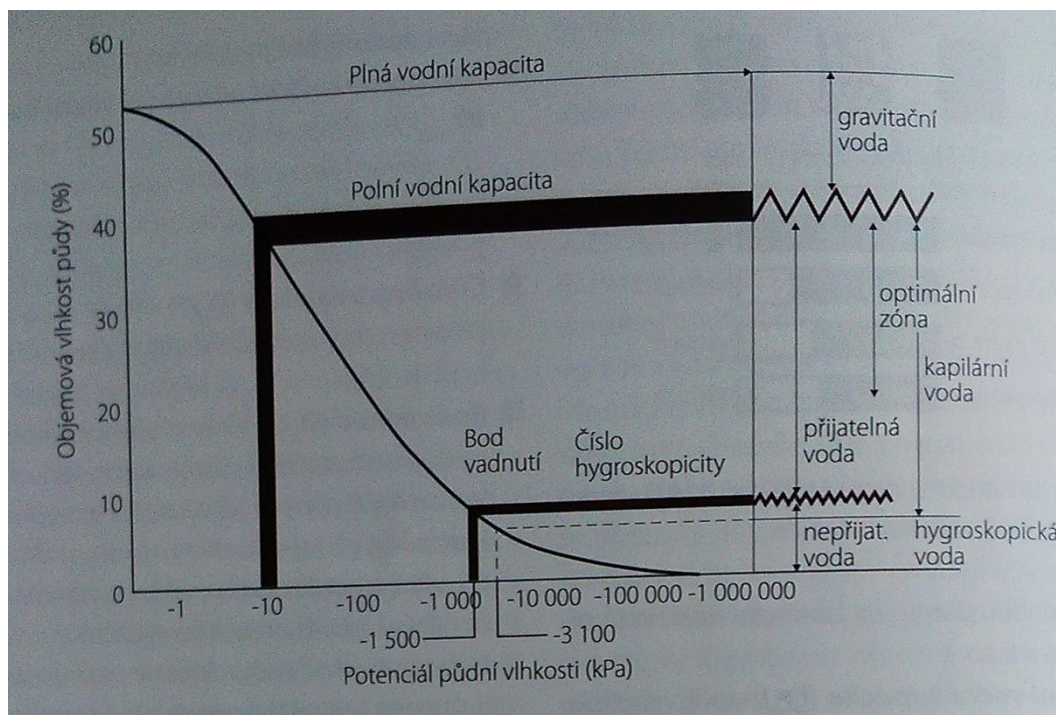
Základní hydrolimity

- adsorpční vodní kapacita Θ_a vyjadřuje maximální množství vody poutané v půdě pouze adsorpčními silami,
- retenční kapacita Θ_{rk} vyjadřuje maximální možné množství vody, které je půda schopna zadržovat vlastními silami po delší časový úsek,
- polní vodní kapacita Θ_{pk} se stanovuje v terénu, nejprve se půda nadměrně zavlaží s výjimkou srážek a poté se nechá přirozeně odvodnit. Po dosažení ustáleného stavu se zjišťuje tato kapacita,
- maximální kapilární kapacita Θ_{mkk} – jedná se v podstatě o polní vodní kapacitu, stanovenou v laboratorních podmínkách,
- plná vodní kapacita Θ_{pvk} vyjadřuje plné nasycení půdy vodou.

Podmíněné hydrolimity

- monomolekulární adsorpční vodní kapacita Θ_{mak} vyjadřuje takovou vlhkost, při které se voda naváže na povrch pevné fáze a tam utvoří obal velikosti jedné molekuly vody,
- bod/číslo hygroskopicity Θ_h stanovuje se při teplotě 20°C a relativní vlhkosti 96–98 %,
- bod vadnutí Θ_v vyjadřuje vlhkost půdy kdy je voda nedostupná pro rostliny a v případě, že se vlhkost sníží, rostliny již vodu nepřijímají,
- bod snížené dostupnosti Θ_{sd} vyjadřuje takovou vlhkost, která omezuje pohyblivost vody v půdě a její dostupnost pro rostliny. Rostliny tudíž musí vynaložit více energie pro její získání. Pokud se tento hydrolimit vyskytuje delší dobu v půdě, dochází k omezení růstu rostlinstva (*Šarapatka, 2014*).

Obr. č. 1: Potenciál půdní vody – hydrolimity (převzato Šarapatka, 2014)



2.3 Půdní potenciál Φ

Aby mohla voda proudit v půdě, z půdy do organismů je zapotřebí určité síly, která by tento koloběh zajistila, rovnovážný stav je dán nulovou silou. To znamená, že potenciály půdní vody jsou si ve všech bodech rovny. V případě ponoření sloupce půdy do vody bude tato voda sloupcem půdy vzlínat. Pak můžeme říct, že hladina vody v nádobě bude mít potenciál roven 0. Voda v určité výšce nad hladinou bude mít zápornou hodnotu energie, která se bude rovnat množství vynaložené práce na vzlínání vody. Čím větší je výška vzlínání v půdním sloupci, tím větší pak bude energie na vynaložení práce pro vytažení a udržení vody ve sloupci.

Energie, kterou v sobě půda poutá vodu, je vztahována na jednotku vody. Dle toho jakou jednotku si zvolíme, určujeme i rozměr daného potenciálu. Taková energie může být vztažena na:

- jednotkovou hmotnost (potenciál) je základním způsobem definicí potenciálu, jednotkou je $J \cdot kg^{-1}$,
- jednotkový objem (tzv. sací tlak), jednotkou je $Pa = N \cdot m^{-2} [ML^{-1}T^2]$,

- jednotkovou tíhu kde vyjádření síly je tíha, kterou působí jakékoli těleso nenulové hmotnosti v gravitačním poli, jednotky jsou délkových rozměrech [L].

Pro měření potenciálu se využívá tenzometr.

Celkový potenciál půdní vody pak můžeme vyjádřit, jako skalární veličinu součtem

$$\Phi = \varphi_g + \varphi_w + \varphi_a + \varphi_o + \varphi_e, \quad 2.5$$

kde je Φ – celkový potenciál půdní vody, φ_g – gravitační potenciál, φ_w – vlhkostní potenciál, φ_a – pneumatický potenciál, φ_o – osmotický potenciál, φ_e – zátěžový potenciál.

Vlhkostní potenciál (φ_w) je závislý na momentálním stavu půdy. Gravitační potenciál (φ_g) vychází z předpokladu, že veškeré procesy v půdě jsou v gravitačním poli. Pokud je tlak vzduchu působící na vodu v půdě jiný, než tlak působící na volnou hladinu uvažujeme pneumatický potenciál (φ_a). V případě rozličných koncentrací látek v půdě je zapotřebí uvést osmotický potenciál (φ_o) a pokud v půdě ještě působí tlak, který může deformovat póry, uvažujeme poslední tzv. zátěžový potenciál (φ_e) (*Šarapatka, 2014*).

2.4 Hydrofobnost

Tento jev se vyskytuje snad u všech druhů půd na nejrůznějších místech, kde se pěstují rostliny. Za příčinu, můžeme považovat vysoký obsah organických látek, které se nacházejí v půdách, kde tyto látky produkují některé druhy hub, mikroorganismů či rozklady kořenových systémů. Organické látky pokrývají především povrch půdních částic nebo agregátů a to způsobuje jejich nesmáčitelnost. V případech, kdy je půda vysušována a opakovaně zvlhčována, prodělá strukturální změny. Tyto změny a usazování prachových částic mohou vytvořit povlak a půda pak velmi obtížně váže a přijímá vodu.

Nejčastěji se s tímto jevem setkáváme u půd písčitých a substrátů, které mají malý měrný povrch a snadno tak dojde k obalení podílu půdních částic. Hydrofobnost se často vyskytuje i na jiných druzích půd, ekonomicky se projevuje tento jev v suchých oblastech. Půda, která vykazuje znaky hydrofobnosti, hůře přijímá vodu, ta je posléze odvedena povrchovým odtokem a vzniku preferenčních

cest. Hydrofobnost se tedy projevuje sníženou retencí vody, sníženou produkcí rostlin a snížením efektivní závlahy.

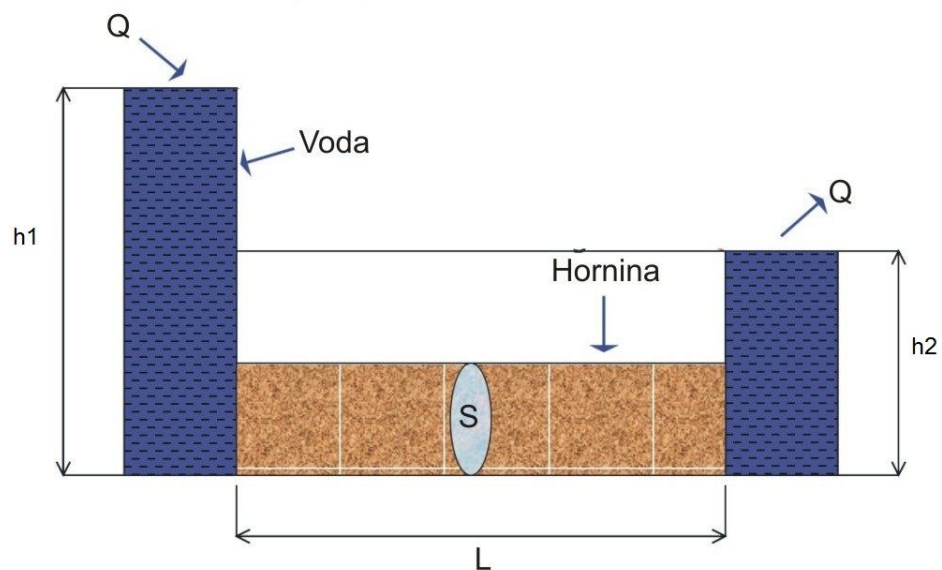
Přítomnost hydrofobní půdy lze rozpoznat tzv. kapkovou zkouškou. Kapková zkouška spočívá v měření času, za který se kapka vody umístěna na suchém povrchu půdy zasákne. Pokud kapka vody potřebuje na vsak do půdy více než pět sekund, je půda považována za hydrofobní, od 5 po 1 minutu je slabě hydrofobní, od 1 minuty po 10 minut je půda silně hydrofobní, od 10 minut po 1 hodinu je půda velmi silně hydrofobní a pokud kapka na vsak potřebuje více než hodinu je půda extrémně hydrofobní. Existují i případy, kdy se kapka dříve vypařila, než zasákla, (Moravio, 2013).

2.5 Půda a pohyb vody v ní

2.5.1 Darcyho zákon

V roce 1856 na základě experimentálního pozorování Henry Darcy publikoval zákon o proudění v porézním prostředí. Darcy uvedl, že průtok při rovnoměrném filtračním proudění v kruhové trubici s příčným průřezem S je k piezometrickému spádu v lineárním vztahu.

Obr. č. 2: Darcyho pokus (*Geologie*)



$$Q = K_s * S \frac{h_{p1} - h_{p2}}{L}, \quad 2.6$$

kde je K_s – nasycená hydraulická vodivost [L^*T^{-1}], S – plocha průtočného průřezu [L^2], h_{p1} , h_{p2} – piezometrické výšky [L], Q – průtočné množství [L^3*T^{-1}]

Rychlost proudění vyplývá z rovnice 2.6

$$v = K_s \frac{\Delta h}{L}, \quad 2.7$$

kde je v – Darcyovská rychlost [L^*T^{-1}]. Tato rychlost je pouze fiktivní, daný průtok proudí celou plochou průtočného průřezu.

Chceme-li získat skutečnou rychlost proudění v porézním prostředí pak je třeba Darcyovskou rychlost vydělit efektivní pórovitostí (množství pórů v hornině kudy voda skutečně proudí)

$$v_{sk} = \frac{v}{n_{ef}n}, \quad 2.8$$

kde je v_{sk} – střední rychlost vody v pórech [L^*T^{-1}], n_{ef} – efektivní pórovitost, v – Darcyovská rychlost 2.7 [L^*T^{-1}] (*Pech, 2010*).

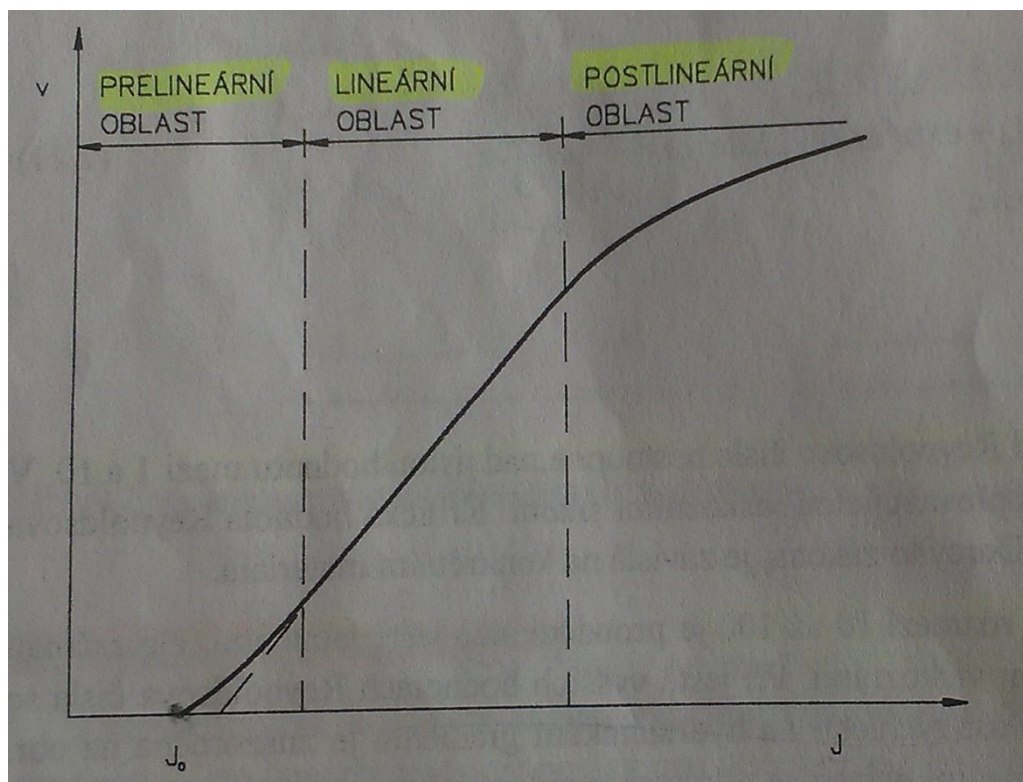
2.5.2 Meze platnosti Darcyho zákona

Jak je patrné ze vztahu, který H. Darcy odvodil, je zde podstatná souvislost mezi rychlostí vody proudící v porézním prostředí a hydraulickým gradientem. Tato souvislost je lineární avšak platí pouze v určitých mezích (*Pech, 2010*).

Laboratorně bylo prokázáno, že je podstatný rozdíl mezi průsakem jemnozrnným materiálem a hrubozrnným materiálem. Při průsaku jemnozrnným materiálem s nízkou propustností existuje limitní hodnota hydraulického gradientu, při které pohyb kapaliny ustává. Naopak při průsaku hrubozrnným materiálem může docházet až k turbulentnímu proudění.

Jak je znázorněno na obrázku č. 3, existují 3 oblasti proudění tzv. prelineární, lineární a postlineární oblast.

Obr. č. 3: Meze platnosti Darcyho zákona (převzato Valentová, 2001)



Prelineární proudění se uvažuje ve velmi jemnozrnných materiálech například jílovitých, kde je voda vázána velmi silnými molekulárními silami. Proudění zde nastává, až po překročení určité minimální hodnoty hydraulického gradientu J_0 . Tato hodnota je pro každý materiál jiná pro prachovité a hlinité materiály je menší než 0.5, pro jílovité zeminy se pohybuje v rozmezí 0.5–1.

Postlineární proudění v této oblasti se začínají výrazně projevovat setrvačné síly. Kritická hodnota je seshora omezována Darcyho zákonem a je závislá na konkrétním materiálu. Darcyho zákon je platný, pokud Re nestoupne nad určitou hodnotu a to v rozmezí 1–10.

Pokud rychlost proudění roste a hodnota Re dosahuje hodnot v rozmezí 10–100, je proudění ještě laminární, ale začínají zde převažovat síly inerciální nad viskózními. Pokud by proudění dosahovalo ještě větších hodnot, proudění se stane turbulentním.

Proudění podzemní vody se většinou děje při takových hodnotách Re kdy je ještě aplikovatelný Darcyho zákon. Kritická hodnota Re nebývá překročena, pokud kapalina proudí v nezpevněných horninách a zrnitých materiálech, ovšem tyto

hodnoty překračuje proudění v krasových oblastech, dolomitech a vulkanických horninách.

Reynoldsovo číslo Re

Jako kritérium pro rozlišení mezi laminárním a turbulentním prouděním se používá Reynoldsovo číslo Re . Toto číslo je bezrozměrné a používá se pro vyjádření poměru mezi inerciálními silami a silami viskózními, které působí na kapalinu.

Kritická hodnota Re pro proudění vody v potrubí je zhruba 2 000. Pro proudění v porézním prostředí je pak Re číslo definováno jako:

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad 2.9$$

kde je v – hustota toku, d – reprezentativní rozměr porézního prostředí a ν – kinematická viskozita kapaliny. Při proudění kapaliny potrubím se jako hodnota d bere průměr potrubí, zjednodušeně řečeno hodnota pro d by měla představovat průměr pórů v porézním prostředí. Vzhledem k tomu, že tato hodnota se velice obtížně stanovuje, v praxi se používá d jako reprezentativní velikost zrna v uvažovaném prostředí. Nejčastěji se používá průměr zrna d_{10} , což je průměr, který znázorňuje 10% zastoupení zrn s menším průměrem. Někteří autoři však doporučují stanovit hodnotu d jako funkci propustnosti materiálu (*Valentová, 2001*).

2.5.4 Darcy-Buckinghamova rovnice

Jednoduchý příklad toku v nenasyčeném prostředí je obdobou Darcyho zákona viz obr. č. 4.

Tento experiment se zakládá na válci obsahujícím půdu s malými otvory v jeho stěnách. Na rozhraní mezi půdou a přírodními trubicemi s vodou je polopropustná membrána (v některých případech se používá jemnozrnný písek). Tyto membrány fungují na principu zabraňujícímu vniknutí vzduchu do přírodních trubic k nádobám s vodou.

Budeme-li udržovat nádoby na stejné úrovni, nastane po čase konstantní stav, voda v půdě bude proudit rovnoměrně a půdní vlhkost θ se nemění. To znamená, že jsme dosáhli stacionárního proudění, pro jeho rychlost můžeme použít rovnici

$$v = \frac{V}{At}, \quad 2.10$$

kde je V – objem proteklé vody za čas t , A – průřezová plocha válečku.

Snížíme-li nádobu na levé straně na úroveň h_1 a nádobu na pravé straně na úroveň h_2 bez přísunu vzduchu, hodnoty se nezmění. V okamžiku, kdy tyto otvory otevřeme, se začne půda odvodňovat obdobným způsobem jako v podtlakovém přístroji na levou či pravou stranu. Při takovémto nastavení nádob zjistíme, že se půda na levé straně odvodnila méně než na pravé straně. Pokud bychom tento jev vykreslili, měl by tvar křivky s předpokladem, že se vlhkost θ na ose x bude měnit lineárně (Kutílek et Nielsen, 1994), (Kutílek et al., 2004).

V tomto prostředí můžeme pozorovat proces proudění, ovšem ztlumený přítomností půdy. To můžeme popsat rovnicí

$$v = K_{us} \frac{\Delta h}{L}, \quad 2.11$$

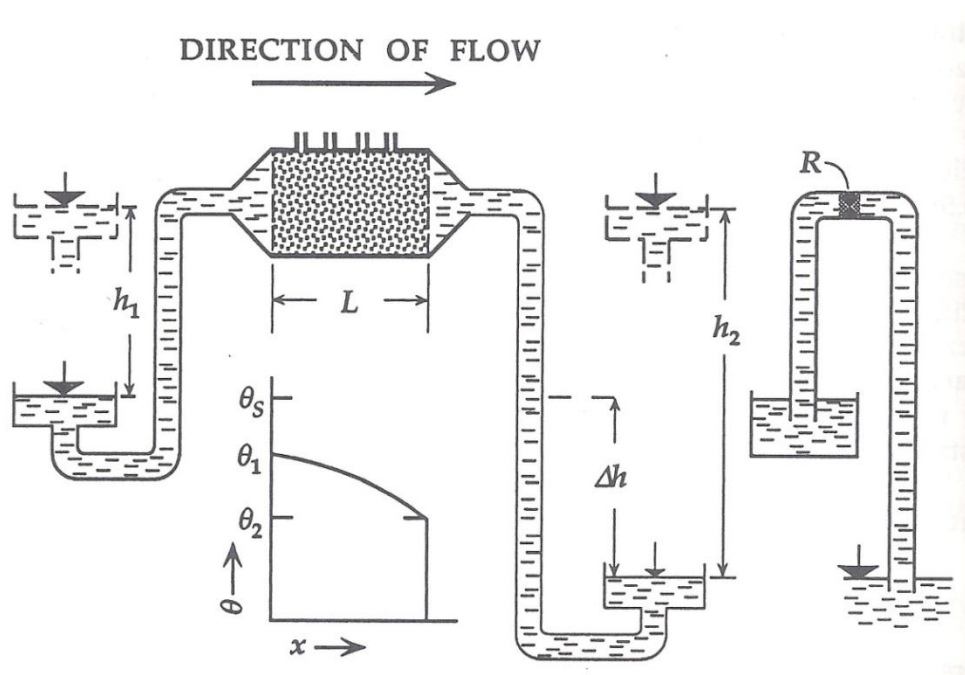
tato rovnice je téměř totožná k rovnici 2.7 s tím rozdílem, že v tomto případě K_{us} značí nenasycenou hydraulickou vodivost [$L.T^{-1}$]. Vzhledem k nenasycenosti půdy voda proudí pouze v pórech naplněných vodou, kde hodnoty pro K_s jsou nižší než hodnoty pro K_s pro stejný typ půdy. V případě kdy hydraulická vodivost závisí na h , používáme:

$$v = -K_{us}(h) \frac{d\phi}{dz}, \quad 2.12$$

pro dvou a třírozměrné dimenze je rovnice ve tvaru:

$$v = -K_{us}(h) \text{grad}\Phi. \quad 2.13$$

Obr. č. 4: Darcy-Buckinghamův pokus (převzato Kutílek et Nielsen, 1994)



Vzhledem k tomu, že se Darcy zabýval prouděním v nenasycené zóně a Buckingham byl první, kdo popsal nenasycené proudění závislé na gradientu potenciálu, jsou rovnice jako 2.12 a 2.13 nazývány Darcy-Buckinghamovy rovnice.

Obecně vzato je rovnice 2.12 dostačující pro řešení hydrologických procesů, jako je odpařování, infiltrace, odvodnění, povrchový průtok atd. (Kutílek et Nielsen, 1994).

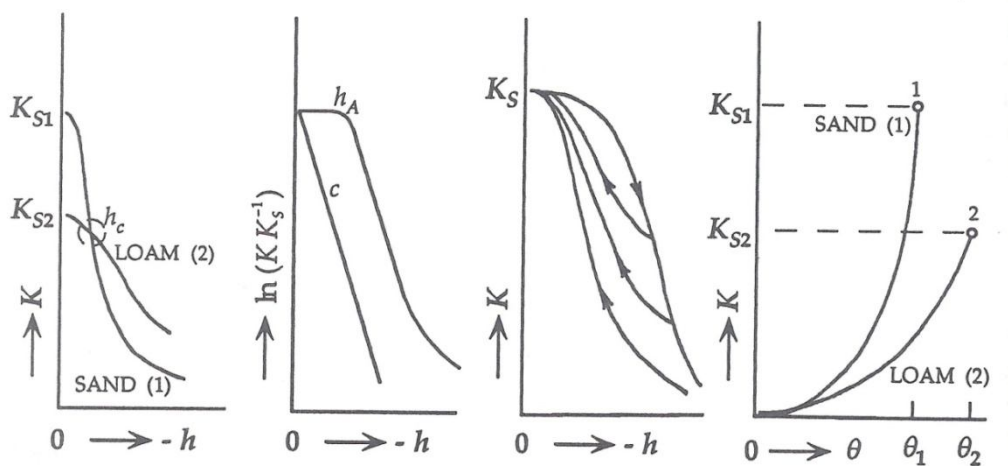
2.5.5 Nenasycená hydraulická vodivost

Nenasycená hydraulická vodivost K_{us} je fyzicky závislá na obsahu vody v půdě θ , protože průtok vody v půdě je možný pouze pomocí pórů naplněných vodou. Zde se silně uplatňuje hystereze, protože vztah $\theta(h)$ je silně hysterezní, tudíž i $K_{us}(h)$ je ovlivněna hysterezí. Tento předpoklad je vyobrazený na obrázku č. 5.

Naopak z filtrační teorie je $K_{us}(\theta)$ jen mírně ovlivněna hysterezí (Obr. č. 5).

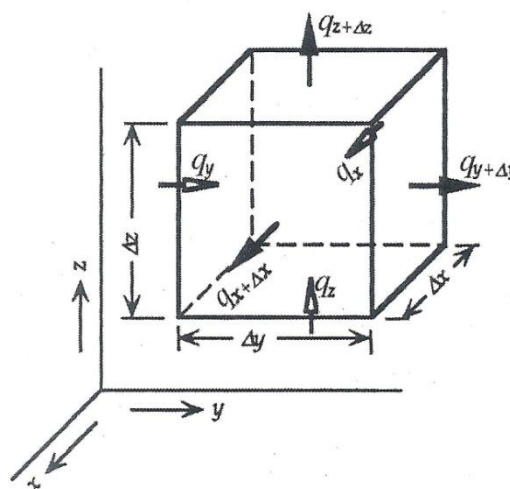
Dále můžeme vidět, že hysterezní chování $K_{us}(h)$ je závislé na hodnotě h , kdy hodnoty K_{us} jsou vyšší pro odvodnění než pro smáčení (Kutílek et Nielsen, 1994).

Obr. č. 5: Průběh křivek dle Darcy-Buckinghama a hystereze (převzato Kutílek et Nielsen, 1994)



2.5.6 Rovnice kontinuity a Richardsova rovnice

Obr. č. 6: Princip rovnice kontinuity (převzato Kodešová, 2012)



Pro řešení rovnoměrného proudění postačuje rovnice 2.13 v přírodě je však takové proudění jen výjimečné, častěji se vyskytuje proudění nerovnoměrné.

V případě nerovnoměrného proudění je zapotřebí uvážit nejen změnu rychlosti proudění, ale také změnu zásoby vody v půdním profilu. Rychlost proudění vody v půdním profilu je popsána Darcy-Buckinghamovou rovnicí. Rovnice je dostačující pro popis nerovnoměrného proudění pouze za předpokladu, že obsah vody v půdě jev čase neměnný. Takovýto případ se také vyskytuje pouze zřídka. Rovnice pro plnění a prázdnění objemu je popsána rovnicí kontinuity.

Pro třírozměrné proudění má rovnice tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \quad 2.14$$

kde je θ – půdní vlhkost, t – čas, x, y, z – osy proudění, q_x, q_y, q_z – hustotní tok na osách.

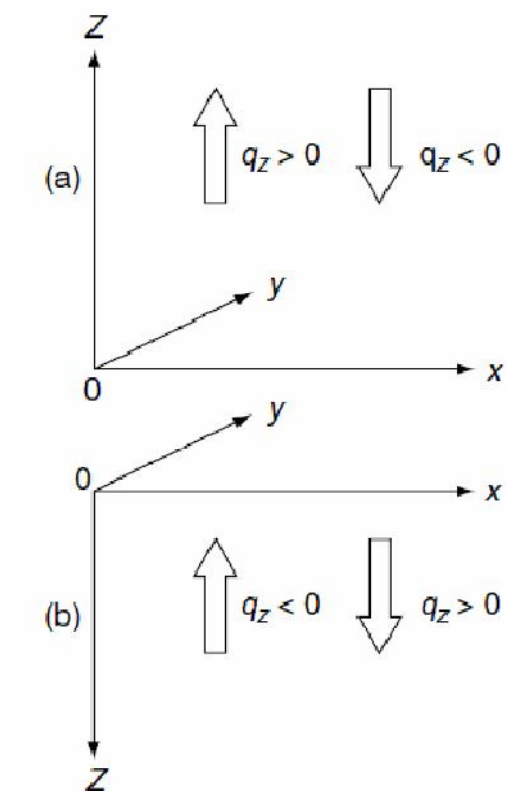
Pokud chceme vyjádřit jednotlivé složky rychlosti proudění, sloučíme rovnici 2.14 s rovnicí 2.11 a dostaneme rovnici ve tvaru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right), \quad 2.15$$

Celkový potenciál v tomto případě lze vyjádřit jako součet gravitačního a vlhkostního potenciálu $\Phi = z + h$, toto tvrzení platí v případě, že zvolíme orientaci osy vzhůru, viz obrázek č. 7(a) pak je rovnice ve tvaru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_z}{\partial z}, \quad 2.16$$

Obr. č. 7: Souřadnicový systém pro proudění (převzato Jačka, 2009)



(a) pravoúhlý souřadnicový systém orientovaný kladně směrem vzhůru,

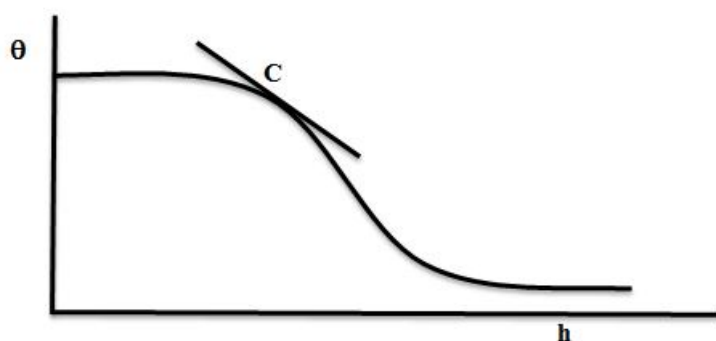
(b) pravoúhlý souřadnicový systém orientovaný kladně směrem dolů, q_z na obrázku se rovná v_z a značí hustotu toku

Tato rovnice se nazývá Richardova. Za předpokladu uvažování závislosti vlhkostního potenciálu h a objemové vlhkosti Θ pak můžeme rovnici 2.16 upravit snížením jedné proměnné a usnadnit si výpočet. Pro jednorozměrný vývoj, míněno zvlhčování či vysušování, lze zapsat:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = C \frac{\partial h}{\partial t}, \quad 2.17$$

kde je C – specifická kapacita [L^{-1}]. V podstatě je to směrnice retenční čáry

Obr. č. 8: Retenční čára pro vyjádření C



Richardova rovnice pro jednorozměrné proudění v kapacitním tvaru

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_z}{\partial z} = C \frac{\partial h}{\partial t} \quad 2.18$$

Dále jde získat rovnici v difúzním tvaru dosazením do 2.16 a 2.17 za předpokladu jednorozměrného proudění a $\mathbf{K}(\Theta)$.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\Theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\Theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad 2.19$$

kde je $D(\Theta)$ – difuzivita půdní vody [L^2T^{-1}].

Vztah mezi difuzivitou, specifickou vodní kapacitou a nenasycenou hydraulickou vodivostí

$$D(\Theta) = K_{us}(\Theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} = \frac{K_{us}(\Theta)}{c} \quad 2.20$$

Proudění je poháněno pouze gradientem potenciálu, při použití rovnice v kapacitním či difúzním tvaru závisí na způsobu řešení (*Kutílek et Nielsen, 1994*), (*Jačka, 2009*).

2.6 Infiltrace

Termín infiltrace se často vysvětluje jako vsakování vody do půd a propustných hornin. Je jednou z nejdůležitějších součástí vzniku podzemní vody, další součásti vzniku podzemní vody ovlivněné člověkem mohou být: kondenzace vodních par v půdě a kondenzace par v magmatu. Způsoby infiltrace se dělí na infiltraci přirozenou a umělou, za přirozenou infiltraci se považují procesy vsakování srážkové vody, z povrchových toků a roztátého sněhu. Umělá infiltrace je definována, jako vsakování vody ve speciálních vsakovacích nádržích kam je voda

přiváděna z toku. Umělá infiltrace se užívána k vytvoření kvalitní podzemní vody z vody povrchové, tento princip je využíván ve vodárně v Káraném.

Dále definici infiltrace popsali:

Horton jako fyzikální proces v půdě zahrnující vsakování vody a absorpci vody, Miyazaki jako vnikání vody do pórů v půdě, Lal et Shukla jako vstup vody do půdní matrice přes rozhraní vzduch-půda (*Pavlásek et Jačka 2014*).

Pohyb srážkové vody zadržené půdním profilem ve srovnání s povrchovým odtokem je velice pomalý. Ke zjištění rychlosti hydraulické vodivosti půdního prostředí se používá metoda infiltrace. Pokud je infiltrace vody do půdy rychlá, pak dochází ke zpomalení koloběhu vody, což je příznivý jev. Pokud je tomu však naopak a dojde ke zrychlení hydrologického cyklu vody při malé infiltraci, je tento zrychlený hydrologický cyklus nežádoucí.

Voda odvedená povrchovým odtokem a infiltrace vody do půdy je závislá na podmínkách panujících v orniční vrstvě, kdy zpracování půdy má významný vliv na hydrofyzikální vlastnosti ornice. Dle *prof. MATULY: The influence of tillage treatments on water in filtration into soil profile. Plant, soil environment, 49, 2003(7), str.298–306* může být příčinou snížené retence vody v půdním profilu ornice a její ulehlost způsobena omezením zpracování půdy a bezorebnou technologií.

V zemědělském odvětví je velice důležité znát faktory, jako je rychlost infiltrace a její ustálená hodnota, aby bylo možné porovnat technologii, hloubku nebo intenzitu zpracování orné půdy (*LCaŘ 9/10, 2007*), (*Hrádek et Kuřík., 2008*).

Kumulativní infiltrace

Kumulativní infiltrace dále označovaná jako I značí celkové množství vody zainfiltrované v čase. Grafem kumulativní infiltrace je funkce rostoucí, kumulativní infiltrace je uváděná v délkových jednotkách [L], nejčastěji se setkáváme s kumulativní infiltrací vyjádřenou v mm.

Intenzita infiltrace

Intenzita infiltrace dále označovaná jako i je diferencí změny I v čase (t)

$i = \frac{dI}{dt}$. Grafem intenzity infiltrace je na rozdíl do I funkce klesající, intenzita infiltrace je uváděná v jednotkách $[L \cdot T^{-1}]$.

2.6.3 Druhy infiltrace

2.6.3.1 Stacionární infiltrace

Stacionární režim proudění nastává v případě homogenní půdy, kdy jsou okrajové podmínky v čase neměnné. Dále při udržování konstantní hladiny podzemní vody a konstantním přítoku vody.

Součástí půdních povrchů může být i méně propustná část půdy s tzv. škraloupem. Škraloup se vyznačuje především sníženou schopností infiltrovat vodu do půdy, důvodem je rozrušení strukturních agregátů na povrchu půdy. Škraloup také může vznikat při umělé infiltraci pozvolným zanášením povrchové vrstvy jemnou suspenzí (kolmatace), kdy vzniká méně propustná vrstva i na relativně homogenní půdě.

2.6.3.2 Nestacionární infiltrace

Za předpokladu, že k povrchu půdy je voda přiváděna takovou rychlostí jako se voda zasakuje, zjišťujeme maximální hodnotu rychlosti infiltrace (v jiném případě také nazývanou vsakovací rychlost). Tento přívod vody si můžeme představit jako závlahu či srážku o měnící se intenzitě nebo jako přívod vody k výtopové zdrži, kde hloubka vody h_0 je o nízké hodnotě a konstantní, prakticky je to 1 cm a teoreticky se $h_0 \rightarrow 0$.

Pokud budeme regulovat postřik dle výše uvedené zásady, rychlost infiltrace se rovná intenzitě postřiku (srážky). Celkové množství vody zasáklé za delší časový interval je pak bráno jako I , ta se vztahuje na celé časové období od začátku samotné infiltrace (Kutílek, 1975).

2.6.4 Způsoby měření infiltrace

Metod pro měření infiltrace je nespočet. V této podkapitole jsou popsány ty nejznámější metody.

2.6.4.1 Metoda pomocí výtopy – válcová

Výtopová metoda se zakládá na principu udržování stálé výtopy o určité výšce mm. Nejpoužívanější jsou tzv. válce kruhového průřezu, z toho dále vznikl název pro jednoválcovou a dvouválcovou metodu, ale není povinností používat pouze válce kruhového průřezu, mohou to být i válce oválného průřezu nebo se mohou použít i „válce“ čtvercového půdorysu.

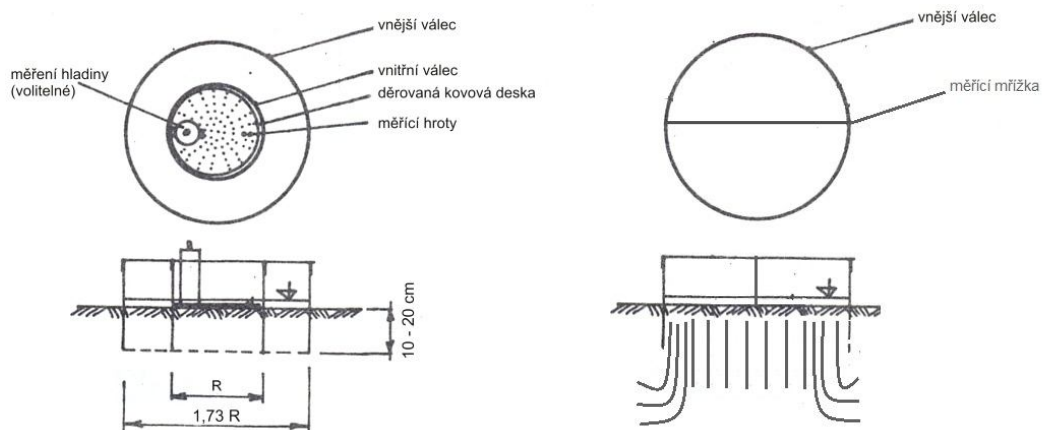
Nyní uvedeme krátký popis nejpoužívanějších válcových metod.

Jednoválcová/dvouválcová

Metoda se zakládá na zanoření válce do půdy v dostatečné hloubce, po volbě vhodné výšky výtopy se následně udržuje, dále musí být zvolen dostatečný časový úsek, po který budeme měřit. Tento časový úsek se volí velice obtížně, neboť nikdy nemůžeme odhadnout, za jakou dobu se i ustálí.

Obdobně tato metoda funguje i jako dvouválcová jediný rozdíl je ten, že místo jednoho válce se umístí dva tak, že okolo vnitřního válce se dá vnější. Někdo jednoválcovou metodu nepovažuje za dostačující a preferuje dvouválcovou. Rozdíly mezi těmito metodami spočívá v údajném vytékání vody pod úroveň zatlučení válce a tím zkreslení měřených hodnot. Reynolds (1990) ve své publikaci tvrdí, že jednoválcová metoda je dostačující.

Obr. č. 9: Schéma dvouválcové metody / schéma jednoválcové metody, upravené (FAPPZ, 2013)



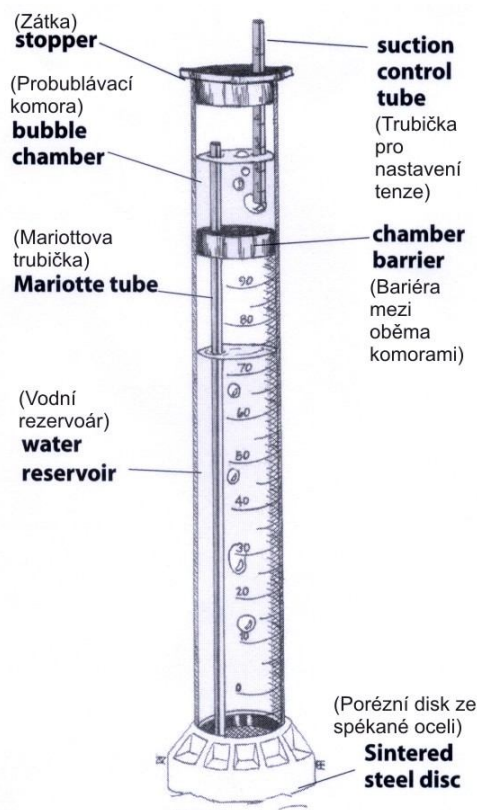
2.6.4.2 Podtlakový infiltrometr

Mezi jednoduché metody patří také podtlaková metoda na měření infiltrace. Infiltrometr funguje na mechanicko-hydraulickém principu a není k tomu potřeba vynaložení žádného zdroje energie, je zapotřebí mít jen přístup k vodě. Toto zařízení vzhledem ke své jednoduchosti nemusí obsluhovat několik pracovníků, na obsluhu postačí 1–2 lidé.

Podtlakový infiltrometr umožňuje s dostatečnou přesností měřit hodnoty pro kumulativní infiltraci. Infiltrometr je vybavený samostatným vodoznakem, který kontroluje konstantní výšku vody a čas jejího dosažení po zahájení měření. Hloubka zanoření infiltrometu bývá obvykle cca 10 cm (FAPPZ, 2013).

Hlavní princip této metody je, že si půda vodu sama nasává z výtopy nad ní v podtlakovém režimu přes porézní desku. Tato deska se nemusí nijak speciálně vnořovat do půdy, může být jen položena na povrchu. Záporný tlak ve válci se pohybuje okolo 2 cm vodního sloupce tlaku.

Obr. č. 10: Schéma podtlakového infiltrometru (FAPPZ, 2013)



2.6.4.3 Guelphský permeametr

Permeametr pracuje na principu Mariottovy lahve. Měření probíhá ve vrtané sondě, sonda má průměr 4–10 cm v hloubce 1 m. Měření se provádí za nepřítomnosti hladiny podzemní vody.

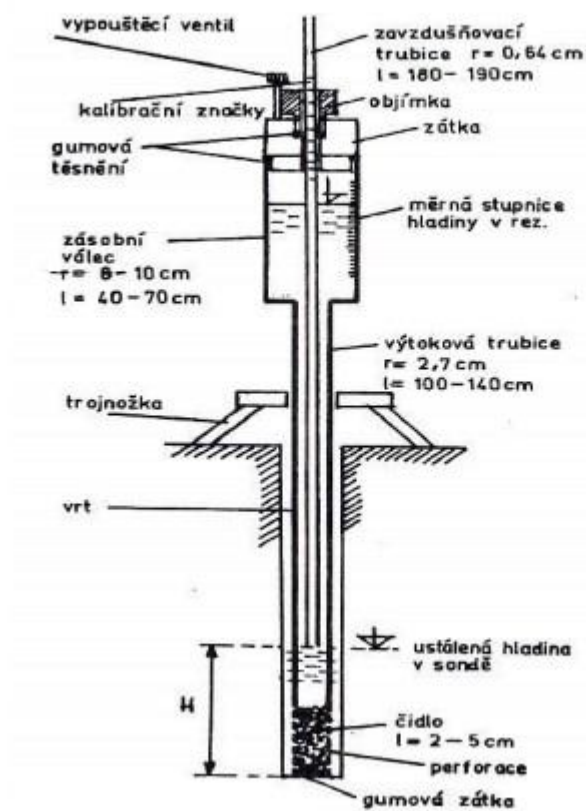
Vzhled:

Vnitřní trubice zajišťuje přívod vzduchu, vnější trubice zajišťuje přívod vody. Horní část slouží pro zásobu vody s odečítací stupnicí. Spodní část trubice je perforována a vyplněna jemným šterkem, který slouží jako retardér přítoku vody. Pro správnou funkci přístroje musíme dosáhnout dostatečného podtlaku v zásobníku.

Měření by mělo probíhat tak dlouho, dokud se nedosáhneme ustálených hodnot.

Guelphský permeametr se používá především pro měření hydraulické vodivosti (*Kutílek et al., 1988*).

Obr. č. 11: Schéma Guelphského permeamtru (*Investice do rozvoje a vzdělávání, 2016*)



2.6.4.4 Simulátor deště

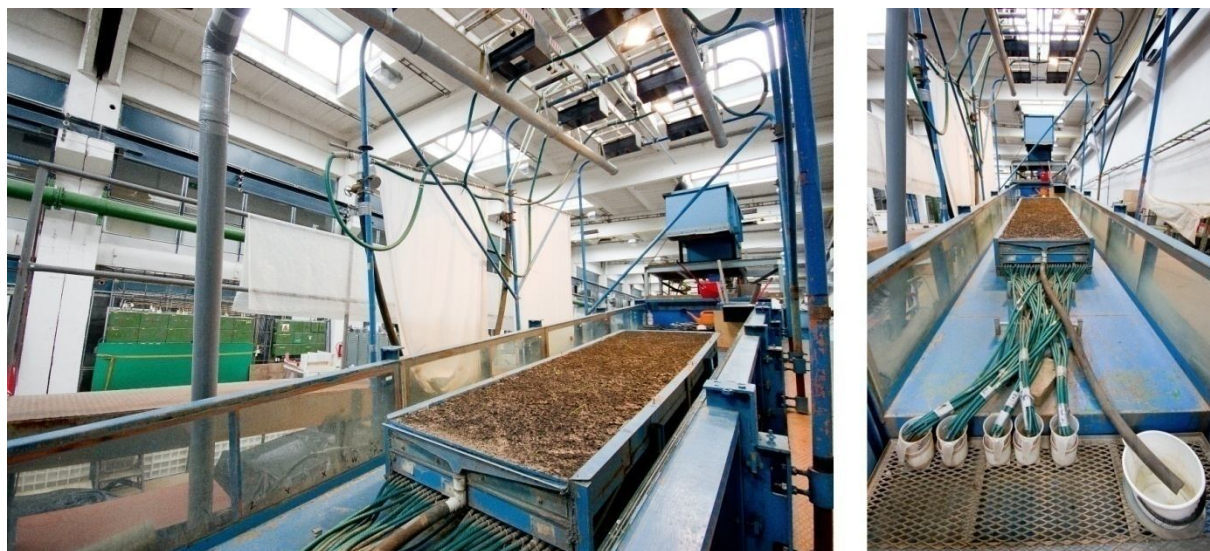
Simulátory jsou z uváděných metod měření infiltrace nejsložitější, je zde zapotřebí největší množství techniky.

Známe 2 typy přístrojů, které mají:

- a) soustavu trysek – výhoda: tvorba kapek různé velikosti, nevýhoda: potřeba přetlaku v systému trysek,
- b) soustavu výtokových trubic – výhoda: spádový rozvod nepotřebuje tlak, nevýhoda: jednotná velikost kapek (*Kutílek et al., 1988*).

Výhoda zadešťovacích simulátorů spočívá ve víceúčelovém využití. Tato metoda se také využívá k měření eroze.

Obr. č. 12: Simulátor deště (ČVUT, 2017)



2.6.5 Ovlivnění infiltrace

Infiltrace, jako většina fyzikálních vlastností, má svá omezení, faktory ovlivňující infiltraci jsou:

- fyzikální vlastnosti a stav půdy – sem patří velikost půdních částic, uspořádání půdních částic a agregátů, stupeň agregace, pórovitost (obsah pórů bývá rozdělen náhodně, některé póry mohou obsahovat uzavřenou vodu či uzavřený půdní vzduch viz níže),

- vegetační kryt půdy – vegetační kryt je důležitou a účinnou ochranou půdního povrchu a to zejména proti destrukci půdního povrchu například dešťovými kapkami,
- velikost a intenzita trvání srážek,
- půdní vlhkost,
- chemické látky obsažené v půdě,
- obsah organických látek – vysoký obsah organických látek může způsobovat hydrofobnost,
- zprarování půdy
- prachové částice (*Matula et al., 1989*).

3. Metody vyhodnocení infiltrace

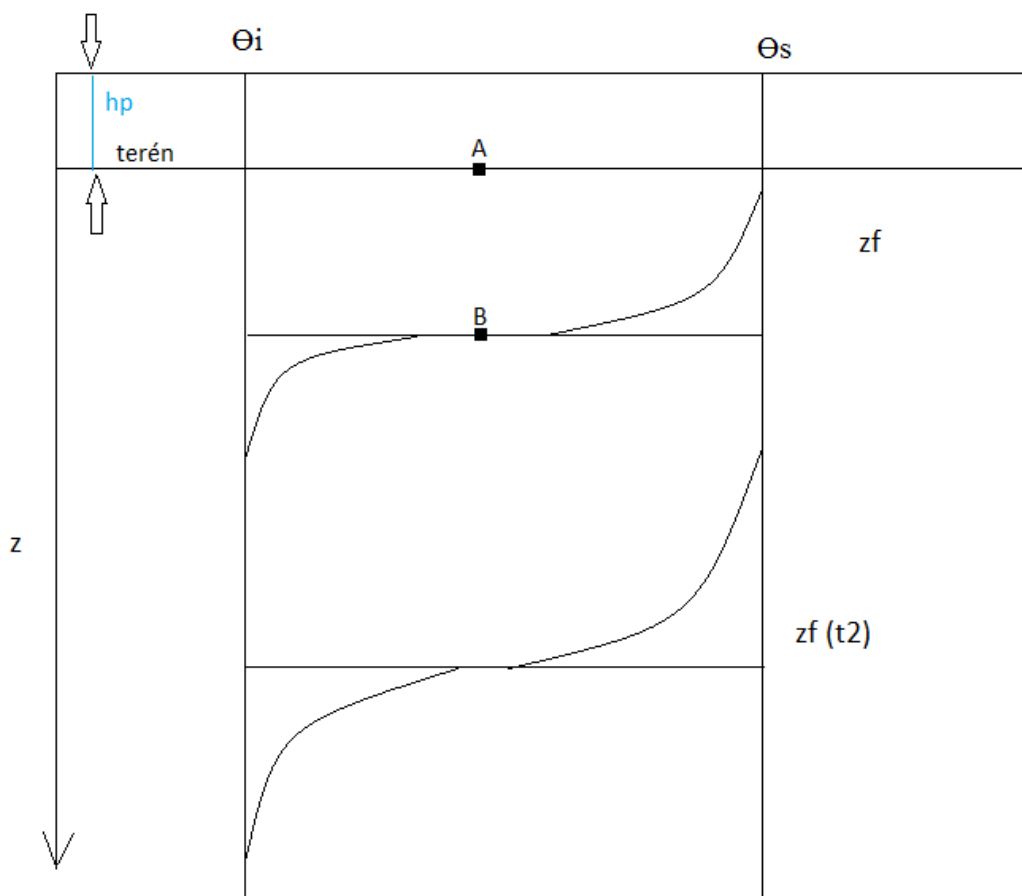
Infiltraci lze vyhodnotit rovnicemi empirickými či fyzikálními.

3.1 Fyzikální rovnice

3.1.1 Green-Ampt 1911

W. H. Green a G. Ampt navrhli zjednodušený přístup i infiltračnímu pokusu. Jako základní předpoklad uvažovali, že voda při infiltraci do půdy postupuje jednotně s rostoucím časem směrem dolů a chová se jako píst.

Obr. č. 13: Schéma principu výpočtu Green-Ampt



kde je Θ_i – počáteční vlhkost, Θ_s – satureovaná vlhkost, z_f – hloubka čela zvlhčení (t_2 – druhý časový údaj), hp – výška výtopy, hf – podtlaková výška na čele zvlhčení

Kumulativní infiltrace I

$$I = (\Theta_s - \Theta_i * z_f) * z_f. \quad 3.1$$

Intenzita infiltrace i

$$i = \frac{dI}{dt} = (\Theta_s - \Theta_i) * \frac{dz_f}{dt}, \quad 3.2$$

$$v = -K_s \frac{\Delta\chi}{\Delta z}, \quad 3.3$$

kde je $\chi a = zf + hp$, $\chi b = -hf$, tato rovnice je upravená Darcyho rovnice.

Rovnici 3.3 lze napsat do podoby

$$v = K_s \frac{zf+hp+hf}{zf}, \quad 3.4$$

$$i = v.$$

Po integraci rovnic dostaneme rovnice pro vyjádření I a i

$$I = [2 * K_s * (h_p + h_f) * (\Theta_s - \Theta_i) * t]^{1/2}, \quad 3.5$$

$$i = \frac{1}{2} [2 * K_s (h_p + h_f) * (\Theta_s - \Theta_i)]^{1/2} * t^{-1/2}. \quad 3.6$$

(Lal et Shukla, 2004), (Hillel, 1998).

3.1.2 J. R. Philip

J. R. Philip (1987) publikoval odvození rovnic v 50. létech minulého století, řešil Richardovy rovnice, konkrétně se zabývá rovnicí 2.19.

Popisuje svá řešení následovně.

Kumulativní infiltrace I :

$$I = \int_{\Theta_i}^{\Theta_s} z \, d\Theta. \quad 3.7$$

Philipovy rovnice byly formulovány analogicky k rovnici sorptivity, pro horizontální infiltraci pak patří rovnice I

$$I = S t^{-1/2} + (A_2 + K_i)t + A_3 t^{3/2} + \dots + A_n t^{n/2}, \quad 3.8$$

kde je S – sorptivita, t – čas [T], A – ustálená infiltrace, n – n -tý člen v pořadí.

Zde si můžeme všimnout, že $K_i t$ vyjadřuje kumulativní průtoky vody kde $dH / dz = -1$ při $\theta = \theta_i$.

Z fyzikálního hlediska může být okrajová podmínka zavedena v případě stálého hustotního toku $i = K(\theta_i)$ pro $z \geq 0$.

Řada nadále konverguje pro krátké a střední doby infiltrace i získaná diferenciací pak vypadá následovně

$$i = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + (A_2 + K_i) + \frac{3}{2} A_3 t^{1/2} + \dots + \frac{n}{2} A_n t^{n/2-1}, \quad 3.9$$

kde je A – ustálená infiltrace, S – sorptivita. V tomto případě je i hodnota během prvního časového intervalu, není konstantou, je funkcí počátečních podmínek při infiltraci.

Pro dlouhé doby infiltrace rovnice 3.12 dále nekonverguje, čelo zvlhčení zůstává neměnné. Čelo zvlhčení se pohybuje směrem dolů rychlostí

$$v = \left(\frac{K_s - K_i}{\theta_s - \theta_i} \right), \quad 3.10$$

zatímco míra infiltrace pro $t \rightarrow \infty$ je $i = K_s$.

Pro běžné výpočty se však využívá tato rovnice jen jako dvouparametrická ve tvaru

$$I = S t^{1/2} + A t, \quad 3.11$$

$$i = \frac{1}{2} S t - 1/2 + A. \quad 3.12$$

Tato rovnice ve zkráceném dvouparametrickém tvaru je jasná a jednoduchá, proto je nejrozšířenější pro výpočet zvláště pak při měření válcovou metodou.

Dále je rozšířená tříparametrická rovnice Kutílka et Krejča (1987). Tato rovnice vznikla z důvodu eliminovat chybu, která vniká při použití dvouparametrické rovnice.

Rovnice ve tvaru

$$I = C_1 t^{1/2} + C_2 t + C_3 t^{3/2}, \quad 3.13$$

$$i = \frac{1}{2} C_1 t - \frac{1}{2} + C_2 + C_3 t^{-1/2}, \quad 3.14$$

kde je C_1 – odhad sorpivity, C_2 – odhad $(A_2 + K_i)$ a C_3 – odhad $(A_3 + 31)$ a 3 je chyba s upravení (oříznutí) parametrů hodnot.

Tyto rovnice vycházejí z aproximativního řešení Philipovy rovnice (ELSEVIER, 2016), (Kutílek et Nielsen, 1994).

Definice fyzikálních rovnic uvádí, že hodnoty vstupující do výpočtu jsou odhadem, následným opakováním výpočtů se hodnoty blíže opravují. Je tedy možné odhadnout parametry, které do rovnice nevstupují. Například pro výpočet Philipových rovnic lze odhadnout hydraulickou vodivost. Z dvouparametrické rovnice lze tuto hodnotu vyjádřit jako $\frac{2}{3} * A$, z tříparametrické rovnice lze hydraulickou vodivost odhadnout jako $(3C_1 * C_3) * C_2$ (Kutílek et Nielsen 1994).

Mezi další fyzikální rovnice patří rovnice Swartzendubera, vycházející z Philipovy tříparametrické rovnice.

$$\text{Swartzendruber} \quad I = \frac{S}{A_0} [1 - \exp(-A_0 t^{1/2})] + K_s t, \quad 3.15$$

(Kutílek et Nielsen, 1994).

Sorptivita

Z fyzikálního hlediska můžeme sorptivitu $S [L.T^{-1/2}]$ popsat jako množství vody v délkových jednotkách zainfiltrované za časovou jednotku, nejčastěji se používá jako délková jednotka cm za čas 1 minuty, tedy $cm.min^{-1/2}$ (Hrádek et Kuřík., 2008).

3.2 Empirické rovnice

Empirické rovnice jsou založeny na základě pozorovaných parametrů na rozdíl od fyzikálně založených rovnic, které pouze tyto parametry odhadují. Rovnice vycházejí buď z analogie s těmito parametry, nebo z tvarů křivek, které je charakterizují.

$$\text{Kostiakov – hyperbola} \quad i = Ct^{-n}, \quad 3.16$$

$$\text{Mezencev} \quad i = C_2 + C_3 + t^{-3}, \quad 3.17$$

$$\text{Horton – exponenciála} \quad i = C_4 + C_5 * \exp(-\gamma * t) \quad 3.18$$

Jak uvádí Kutílek et. Nielsen (1994), je možné z empirických rovnic vyjádřit hodnotu hydraulické vodivosti, a to pro Hortona jako hodnotu C_4 , Mezenceva jako hodnotu C_2 .

3.2.1 Metoda CN křivek

Metoda CN křivek neboli Curve Numbers Method, byla vyvinuta v USA službou pro ochranu půd (US SCS) a byla publikována několika publikacemi například US SCS roku 1972.

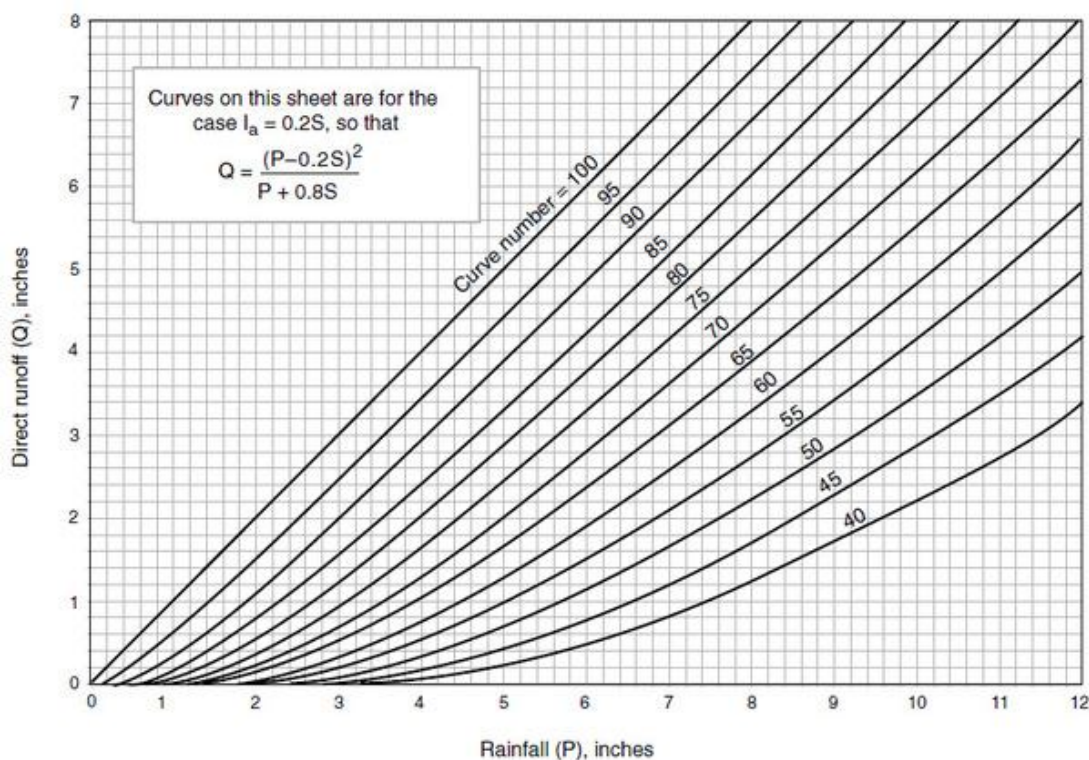
Tato metoda umožňuje odvození objemu tzv. přímého odtoku a kulminačního průtoku na povodích využívaných v zemědělství a lesnictví, ale i na urbanizovaných povodích, avšak pouze do velikosti plochy povodí zhruba 5km^2 .

Pojem přímý odtok vyznačuje odtok jak povrchový tak odtok z prosakující gravitační vody, která však nedosáhne na hladinu podzemní vody.

Tento objem je vyjádřen vztahem daným výškou odtoku H_0 a výškou výpočtového deště H_d za pomoci čísel odtokových křivek CN , a to 20 až 100, viz Obr. č. 14.

Metoda CN vychází z empirických měření srážek a odtoku, kdy byly pozorované pouze hodnoty srážek a odtoku nikoliv infiltrace, ale kombinací dvou rovnic 3.19 a 3.20. Dají se odhadovat i hodnoty pro kumulativní infiltrace, výšku přímého odtoku a další.

Obr. č. 14: Nomogram pro odvození CN (Patel, 2016)



Metoda CN vychází z předpokladu:

a)

$$H_d = R_1 + R_a + H_0, \quad 3.19$$

b)

$$\frac{H_0}{H_d - R_1} = \frac{R_a}{R_d}, \quad 3.20$$

kde je H_0 – výška přímého odtoku, H_d – výška výpočtového deště, R_d – potenciální retence povodí, R_1 – retence povodí v bezodtokové fázi, R_a – aktuální retence povodí.

Retence povodí

Retence je schopnost zadržovat krátkodobě i dlouhodobě vodu v povodí. R_a představuje akumulaci vody v porchových mikrodepresích, vodu zadržanou intercepcí a vodu infiltrovanou do půdy. R_1 (počáteční ztráta) se nejčastěji využívá pro modely jako hodnoty.

Tento odhad byl velice náročný, SCS poskytla empirický vztah, který vychází z předpokladu, že R_1 byla funkcí maximální možné retence S (Hrádek et Kuřík, 2008).

$$I_a = 0,2 * S \quad 3.21$$

Maximální možná retence S se vztahuje k bezrozměrným parametrům CN křivky v rozsahu $0 \leq CN \leq 100$.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10, \quad 3.22$$

(Patel, 2016).

Potencionální retence povodí představuje maximální retenci vody v povodí. Jako H_d je možné použít 1denní výška deště $H_{1d,N}$ příslušné doby opakování N (periodicity).

Metoda CN zohledňuje závislosti retence povodí na:

- například infiltrační schopnosti (hydrologické vlastnosti půd),
- počátečním stavu půdy v souvislosti s jejím nasycením,
- druhu zemědělských plodin, druh porostu, charakter zastavěných a zpevněných ploch a způsobu obdělávání půdy,
- ovlivnění infiltrace vegetačním pokryvem (hydrologické podmínky).

Odhad infiltrace se dá spočítat pomocí úpravy rovnic 2.19 a 2.20

$$Ra = \frac{Rd(Hd-R1)}{Hd-R1+Rd}. \quad 3.23$$

Podklady k výpočtu:

Pro určení hodnoty CN je nutné znát:

- hydrologickou skupinu půd (A, B, C nebo D), tuto hodnotu lze stanovit na základě infiltračních charakteristik půd nebo kódu BPEJ (pouze v ČR a SR),
- způsob obdělávání pozemku a charakter vegetačního pokryvu,
- předchozí nasycenost povodí odhadnutou pomocí PVP.

Z hodnoty CN lze výpočtem stanovit maximální retenci povodí a popř. i retenci v bezodtoké fázi.

Následně lze dle vzorců na základě znalosti výšky výpočtového deště (např. $H_{1d,N}$) učit výšku odtoku nebo výšku kumulativní infiltrace.

Odhad infiltrace I a výšky odtoku, může být stanoven až po naplnění R_1 . Dle metody CN křivek také I nemůže překročit hodnotu maximální retence povodí.

Počáteční stav nasycenosti půdy

Hodnoty počátečních stavů nasycenosti půdy ovlivňují potenciální retenci a s tím související odvození čísla CN křivek. Počáteční stav je charakterizován 3 skupinami tzv. předchozích vláhových podmínek (PVP). Tento údaj se stanoví dle úhrnu dešťů během předchozích 5 dnů.

Tab. č. 2: Tabulka pro stanovení PVP (převzato Hrádek et Kuřík, 2008)

<i>Skupina PVP</i>	<i>Celkový úhrn předchozích srážek v [mm] za 5 dnů v období</i>	
	<i>Mimo vegetačním</i>	<i>Vegetačním</i>
<i>I</i>	< 13	< 36
<i>II</i>	13–18	36–53
<i>III</i>	> 28	> 53

Charakteristiky PVP

PVP I – nízká nasycenost aktivní zóny půdy v povodí,

PVP II – průměrná nasycenost aktivní zóny půdy v povodí, pro tuto skupinu se uvádějí CN čísla,

PVP III – vysoká nasycenost aktivní zóny půdy v povodí.

Pro výpočet objemu odtoku pro návrhové účely se doporučuje použít hodnoty CN PVP II. Hodnoty pro PVP I a PVP III je však možno odvodit z hodnoty PVP II. Nomogram, dle kterého lze hodnoty PVP odvodit uvádí Janeček (1998) (Hrádek et Kuřík, 2008).

3.4 Vyhodnocení první dávky

Jak uvádí Kutílek et al. (1988) je stanovení odhadu tzv. první dávky poměrně složité a můžeme se domnívat, že je také až nemožné.

Složitost při vyhodnocování spočívá ve dvou chybách vyplývajících ze snahy o výpočet tzv. první dávky.

První chyba je v tom, že při počáteční fázi vyhodnocení infiltrace definujeme průběh infiltrace tím, že hodnoty upravujeme tak aby je bylo možno použít pro vyhodnocování známými rovnicemi. Pokud si vybereme jeden typ rovnice

a upravíme podle toho data, pak bychom při změně rovnice museli znovu vypočítat odhad první dávky. Z hodnoty nezávislé tímto způsobem učiníme hodnotu závislou na danou vyhodnocovací rovnici.

Druhá chyba spočívá ve výběru rozsahu hodnot pro odhad první dávky. Dá se použít ještě jedna možnost, ale použití této metody je méně vhodné. Metoda spočívá v tom, že bereme první dávku úvahu jako samostatnou hodnotu a uvažujeme ji jako další parametr do infiltračních rovnic. Složitostí může být stanovení omezení hodnot pro tuto metodu, nestanovíme-li omezující hodnoty, mohli bychom dostat při výpočtu i záporné hodnoty.

Pro výpočty velikosti první dávky lze vhodně použít extrapoláční metodu rychlosti počátku. Postup spočívá ve stanovení střední rychlosti infiltrace v_j pro naměřené pole hodnot t_j

$$v_j(t_j) = \frac{I_{j+1} - I_{j-1}}{t_{j+1} - t_{j-1}}, \quad j=2, \dots, n-1 \quad 3.24$$

a konečnou hodnotu infiltrační rychlosti v rozsahu naměřených hodnot je možno vynechat či vypočítat jako

$$v_n(t_n) = \frac{I_n - I_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}. \quad 3.25$$

Takto transformované hodnoty vhodnou rovnicí extrapolujeme k počátku. Vzhledem k jednoduchosti a jednoznačné fyzikální podstatě lze pro výpočet využít rovnici 3.14.

Dále bychom postupovali zderivováním součtu čtverců odchylek pro tento vztah a dostali bychom soustavu 2 rovnic pro 2 neznámé. Vyřešením rovnic dostaneme způsob jak vyjádřit jednotlivé parametry. Tyto parametry dále použijeme k extrapolaci pole hodnot v_j směrem k počátku a stanovení odhadu velikosti první dávky.

Pole hodnot se dále opravuje a získáme tak základní soubor hodnot pro stanovení I , kterou dále můžeme vyhodnotit vhodným postupem.

Při běžném měření infiltrace, ať už měříme v laboratoři nebo v terénu, nemáme možnosti stanovení hodnot limitního času či jiných údajů, které by byly vodítky, jak dlouho měřit, zaznamenávat a nakonec vyhodnotit.

4. Charakteristika místa měření

Měření probíhala na dvou lokalitách. Jedna lokalita se nachází ve Středočeském kraji a jedná se o nivní oblast s vegetačním pokryvem, zde probíhalo měření na podzim roku 2015. Druhá lokalita leží v Jihomoravském kraji, jde o nezatravněnou oranou plochu, zde probíhala měření začátkem léta a na podzim roku 2016.

4.1 Trhové Dušníky

Trhové Dušníky se nacházejí ve Středočeském kraji, okrese Příbram, asi 4 km severně od města Příbram.

Na této lokalitě leží měřicí stanice ve vlastnictví České Zemědělské Univerzity v blízkosti říčky Litavky.

Zde probíhalo měření jedné série dále zvané jako první série měření.

Obr. č. 15: Situační zařazení lokality Trhové Dušníky (Seznam, 2016)



4.1.1 Klimatické podmínky

Roční průměrná teplota se pohybuje mezi 6–7°C, roční úhrn srážek je 500–550 mm/rok, souhrnně řečeno je to klimaticky mírně teplá oblast, dle Quittovy klasifikace (Tolasz *et al.*, 2007).

Rok 2015 patřil mezi teplejší až extrémně teplé, extrémní teploty se projevovaly především během měsíců července a srpna.

Klimatické podmínky před měřením:

Léto/podzim 2015

V období zhruba od června do srpna/začátku září 2015 panovaly s mírnými výkyvy poměrně tropické teploty jak přes den, tak i v noci, kdy nedocházelo ke kondenzaci vodních par vzduchu (padání rosy). Ke kondenzaci vodních par v tomto období docházelo velice zřídka. Dalo by se tedy říci, že i za nocí panovaly poměrně teplé a suché klimatické podmínky.

Toto počasí vedlo ke spoustě problémů, například v oblastech vodního hospodářství a ekologie nejen spojených s vodními živočichy. V případech podobných klimatických podmínek často dochází k vysušení půd na takovou hranici, že se při případných deštích půda stává hydrofobní – její schopnost infiltrovat vodu je minimální až nulová.

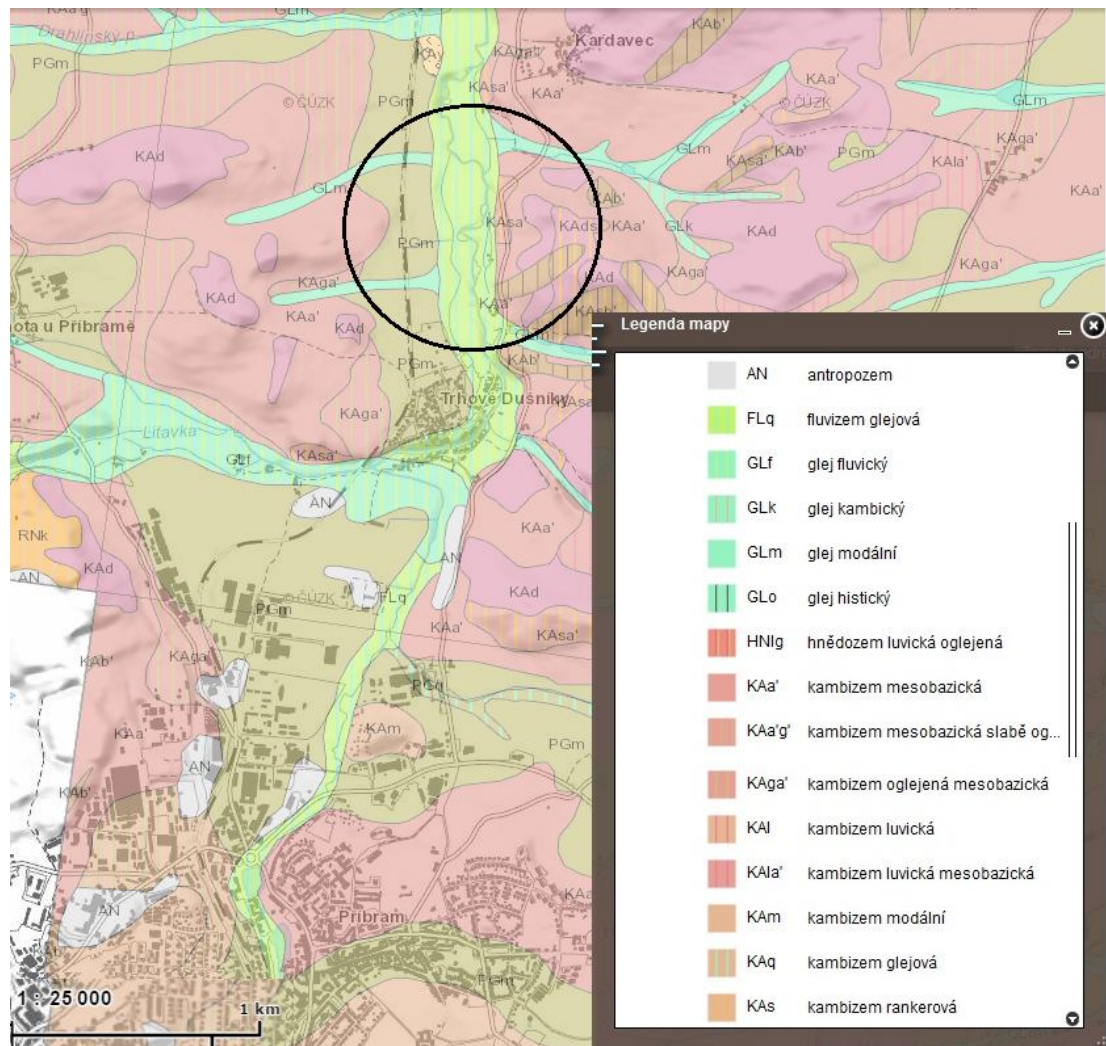
Počasí v den měření

Během převládalo slunečné počasí, místy se objevoval mírný vítr. V průběhu dne se počasí změnilo na zatažené bez srážek. Vítr neměl vliv na měření.

4.1.2 Charakteristika prostředí a půdního složení

Dle zakreslení pedologické mapy (obr. č. 16) vidíme, že lokalita se nachází na podloží pseudoglejglajovém. Je to nívná, relativně rovinná oblast porostlá převážně travinami a rostlinami snášejícími půdní vlhkost o vyšší úrovni.

Obr. č. 16: Pedologická mapa lokality (Česká geologická služba, 2012)



4.1.3 Měření

Měření první série probíhalo v termínu 8.9.2015. Obrázek č. 17 znázorňuje konkrétní místa kolem stanice, kde měření probíhalo.

Obr. č. 17: Letecká mapa oblasti měření Trhové Dušníky (*Seznam, 2016*)

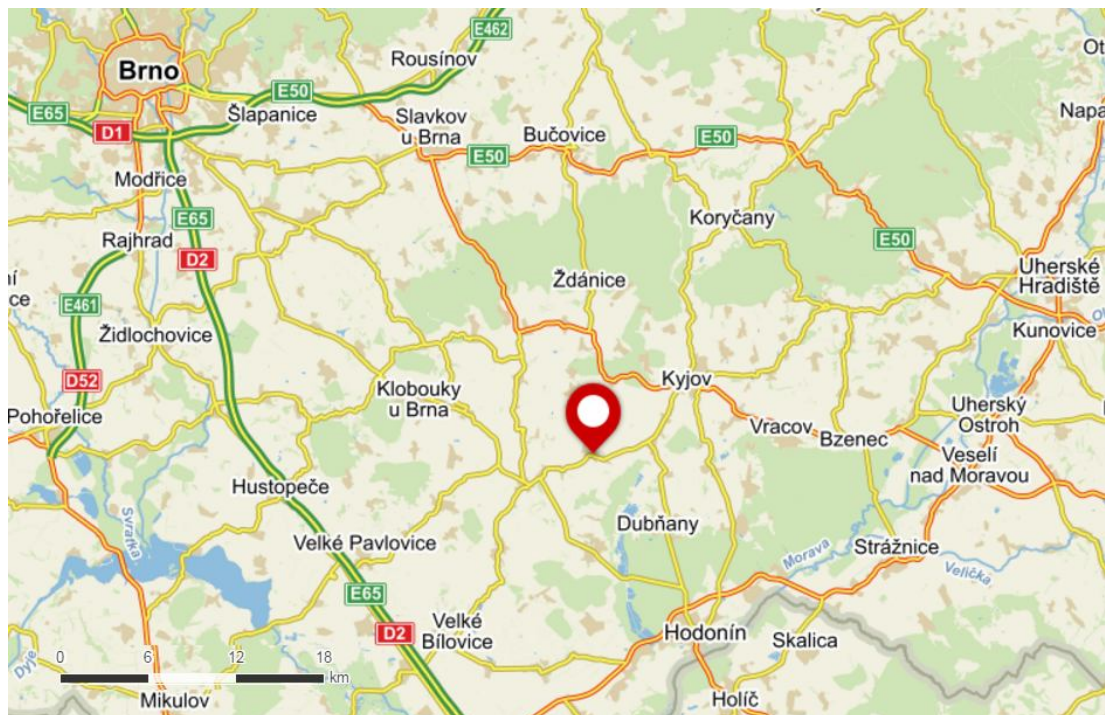


4.2 Šardice

Obec Šardice se nachází v Jihomoravském kraji jihozápadně od Kyjova, okres Hodonín.

Zde probíhala měření dvou sérií dále zvaných jako druhá a třetí série měření.

Obr. č. 18: Situační zařazení lokality Šardice (Seznam, 2016)



4.2.1 Klimatické podmínky

Roční průměrná teplota se pohybuje mezi 9–10°C, úhrn srážek je 500–550 mm/rok, souhrnně řečeno je to klimaticky teplejší oblast, dle Quittovy klasifikace (Tolasz *et al.*, 2007).

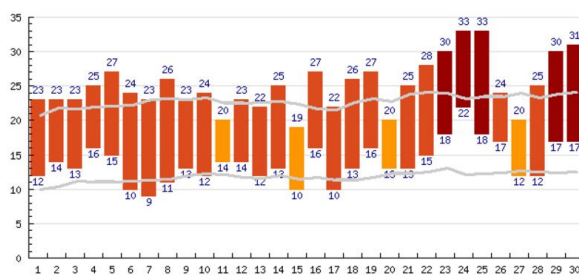
Rok 2016 byl klimaticky rozkolísaný, v létě panovaly až tropické hodnoty a zima byla chladná.

Klimatické podmínky před měřením:

Léto 2016 – červen

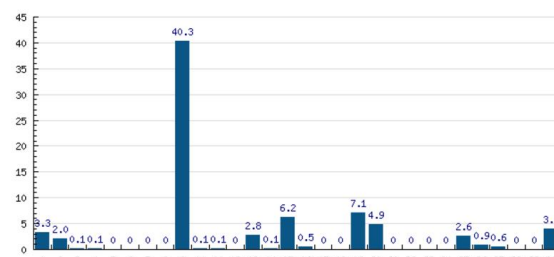
V tomto období panovaly extrémní teploty a minimální srážky obdobně jako v loňském roce. Úhrny teplot a srážek během měsíce června jsou vyobrazeny na obrázku č. 19 a č. 20, data jsou brána z meteorologické stanice v Brně.

Obr. č. 19: Teplotní souhrn měsíce června 2016 (*InMeteo, 2015*)



Graf zobrazuje nejvyšší a nejnižší denní teploty v průběhu měsíce, šedou čarou jsou znázorněny dlouhodobé průměry pro daný den.

Obr. č. 20: Srážkový souhrn měsíce června 2016 (*InMeteo, 2015*)

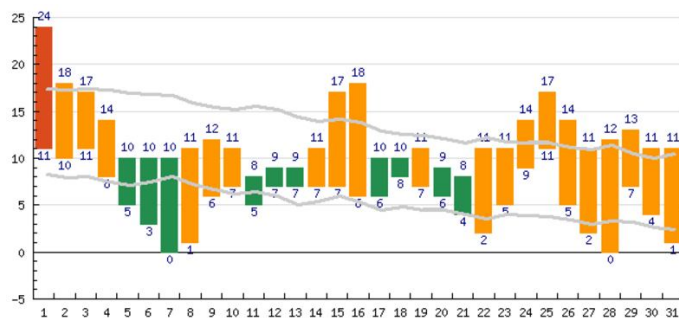


Graf zobrazuje denní srážkové úhrny v průběhu měsíce.

Podzim

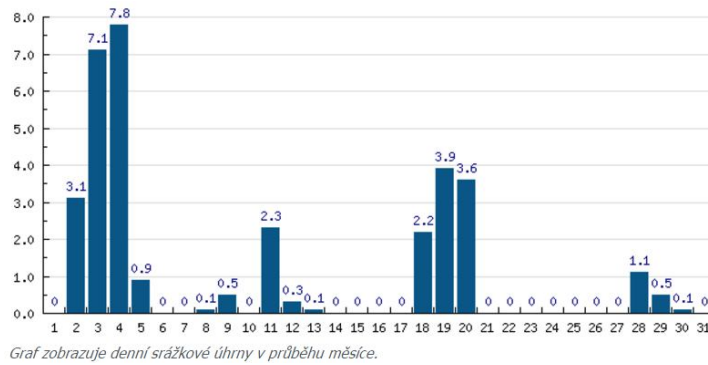
Měsíc říjen 2016 byl již poněkud chladnějším obdobím (obr. č. 21) a mírně větrným. Srážky nebyly nijak výrazné, jak je patrné z obrázku č. 22.

Obr. č. 21: Teplotní souhrn měsíce října 2016 (*InMeteo, 2015*)



Graf zobrazuje nejvyšší a nejnižší denní teploty v průběhu měsíce, šedou čarou jsou znázorněny dlouhodobé průměry pro daný den.

Obr. č. 22: Srážkový souhrn měsíce října 2016 (*InMeteo, 2015*)



Počasí v den měření – druhá série

V den měření bylo jasno a váł mírný vítr, který v průběhu dne lehce zesílil. Tento vítr měl negativní vliv na měření.

Počasí v den měření – třetí série

První den: zataženo mírný vítr, tento vítr neměl vliv na měření.

Druhý den: zataženo mírný vítr, tento vítr neměl vliv na měření.

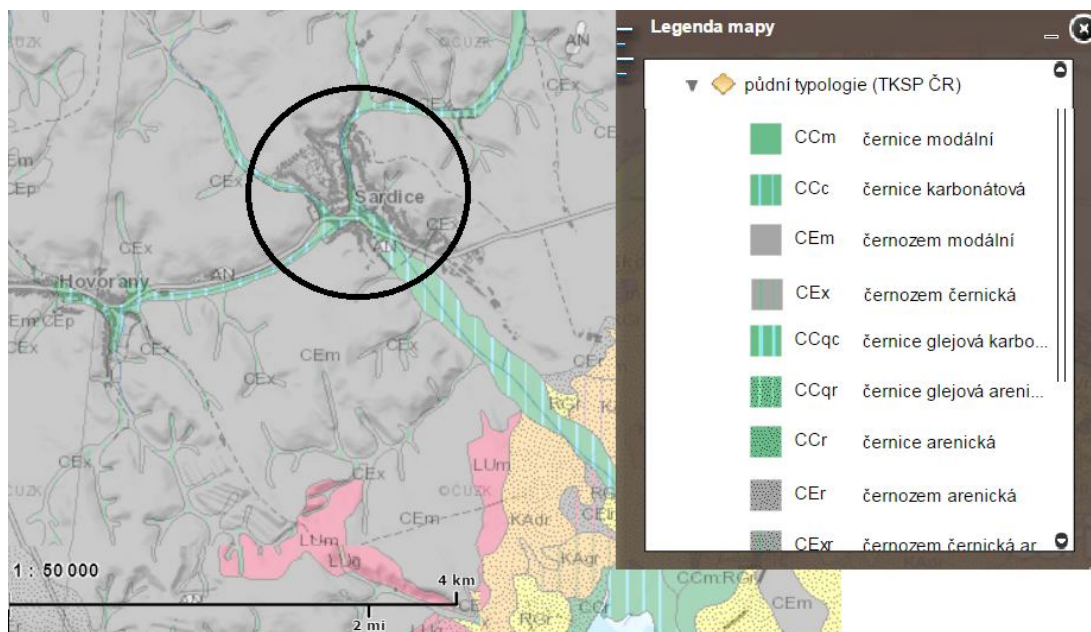
Třetí den: zataženo se silnějším větrem, který během dne mírně zesílil, tento vítr měl negativní vliv na měření. Snaha o vytváření větrolamu neměla 100% úspěch.

4.2.2 Charakteristika prostředí a půdního složení

Mezi polnostmi se nachází experimentální plocha. Tato zvrásněná plocha je rozdělena do 4 bloků různých technik obdělávání půdy: diskování, kypření, pluhu a bez orby. Z pedologické mapy (obr. č. 23) je patrné, že zde jsou černozemě, pod těmito černozeměmi se nalézají spraše.

Z důvodu eroze a obdělávání polností je černozem na některých místech téměř nezatelná až žádná, při obdělávání se spraše dostávají více na povrch, ten je pak viditelně světlejší.

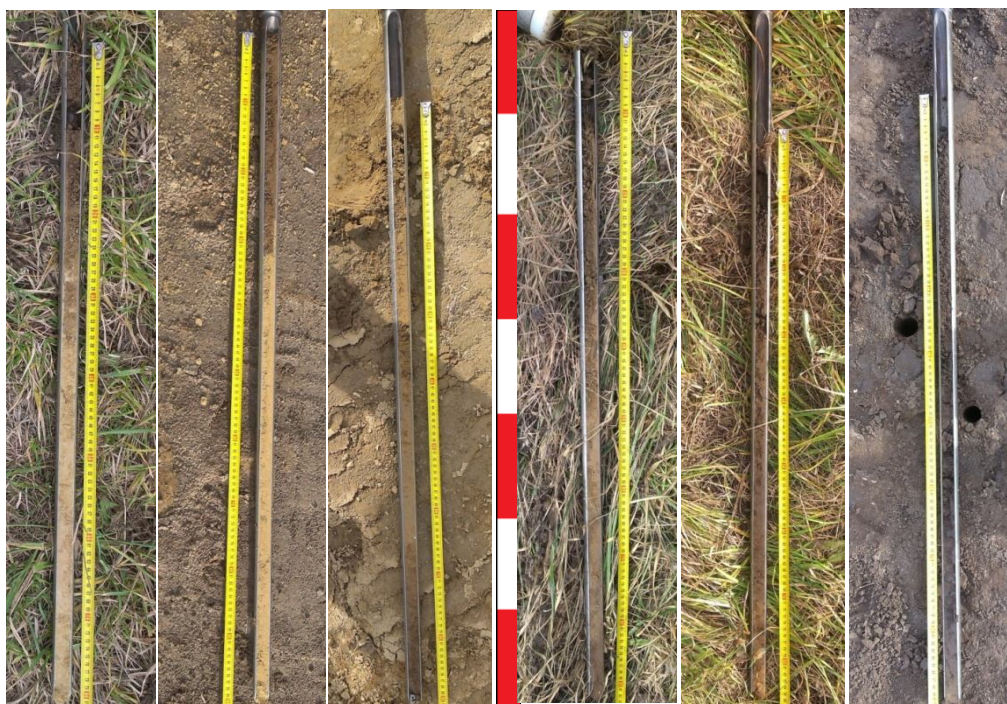
Obr. č. 23: Pedologická mapa oblasti Šardice (Česká geologická služba, 2012)



Sondýrky

Sondýrky odebrané na částech plochy, kde měření probíhala, konkrétněji zobrazují složení půdy mocnost půdního horizontu.

Foto č. 1: Sondýrky odebrané z částí orané pluhem a úhoru



Měření č. 4 úhor

Měření č. 7 pluh

Měření č. 8 pluh

Měření č. 11 úhor

Měření č. 12 úhor

Měření č. 13 pluh

4.2.3 Měření

Druhá série měření probíhala v termínu 30.6.2016, třetí série měření probíhala v termínu 12.–14.10.2016.

Obrázek č. 24 konkrétně zobrazuje místa, kde infiltrační pokusy probíhaly.

Obr. č. 24: Letecká mapa oblasti měření Šardice (Seznam, 2016)



5. Metodika měření

5.1 Příprava měření

Příprava měření spočívá na vytváření a shromažďování pomůcek standardních i nových.

Standardní pomůcky:

Válec o průměru 30 a 32 cm, měřicí mřížka, 2x kbelík + 1 kalibrovaný kbelík (barely na vodu v případě nepřítomnosti toku), vodováha, zápisníky, stopky, váha, kříž, kalibrované nádoby různých objemů na dolévání vody, nůžky, řezáky, metr/pásmo.

Nové pomůcky:

Sít' bodů 3cm x 3cm (v našem případě tuto síť zajistila plexisklová deska), tyčka s měřidlem, konstrukce na zatlačení válce do půdy, hydraulický zvedák.

Foto č. 2: Mřížka pro měření topografie vně válce



5.2 Metoda měření

Metod měření infiltrace je více, viz kapitola 2.6.4. Pro náš pokus byla vybrána jednoválcová metoda s inovativním nápadem zanoření válce do půdy pomocí hydraulického zvedáku a konstrukce s myšlenkou plynulejšího a rovnoměrnějšího zanořování válce, další inovace spočívala v měření topografie uvnitř válce pomocí plexisklové desky a pomůcky na měření hloubky.

Jednoválcová metoda spočívá především na následujících krocích:

- na základě znalosti plochy válce a dolévané vody v časovém kroku během zasakování vypočteme $I a i$,
- na základě vytvořené plexisklové desky se změří výška reliéfu terénu před měřením a po měření,
- změří se výška vody ve válci,
- na základě jednoduchých výpočtu se vyčíslí výška vody ve válci v mm.

5.2.1 Měření infiltrace

Měření infiltrace spočívá v následujících krocích. Výběr místa měření, následné položení válce na půdu a obřezání drnu okolo válce. V dostatečné vzdálenosti od válce se nainstaluje konstrukce pro následné zanořování. Dále se na válec položí kříž, za pomoci konstrukce a hydraulického zvedáku se rovnoměrným způsobem válec zanoří do půdy. Po zanoření válce se v případě vegetačního pokryvu půdy uvnitř válce vegetace vystříhá, změří, zaznamená se hloubka zanoření, převýšení a topografie uvnitř válce. Ještě před instalací měřicí mřížky se připraví kalibrovaný kbelík s vodou a kalibrované nádoby na dolévání vody. Zapotřebí je mít také dostatečnou zásobu vody, která se nabere do nekalibrovaných kbelíků případně barelů. Po tomto kroku se nainstaluje měřicí mřížka a může se započít s infiltračním pokusem. Po ustálení infiltračního času, můžeme přistoupit k závěrečným měřením, jako jsou výška výtopy ve válci měřená metrem (h_2) a výška od hladiny vody ve válci k hornímu okraji (h_1). Po skončení měření se měří topografie ve válci, tento krok je již poslední a tudíž měření končí. Tento postup se volil zejména kvůli rozporům o rozrušování půdy při ranách, jimiž se válec zanořuje do půdy, a to

zejména pokud je v místě měření vegetační pokryv, který je sice narušen obřezáním válece, ale toto obřezávání je spíše jen povrchové, než aby umožnilo řádné obřezání drnu až do hloubky, kam bychom zanořili válec. Při použití druhé metody se válec do země zatlačuje rovnoměrně a nedochází k nárazům.

Tento způsob zanoření válece byl použit pouze na lokalitě Trhových Dušníků na experimentální ploše v Šardicích podmínky neumožnili pevné zapuštění vrutů do půdy.

Foto č. 3: Zanořený válec s vystříhaným porostem



Foto č. 4: Válec s měřicí mřížkou



Foto č. 5: Konstrukce na zanoření válce do půdy



5.3 Vyhodnocení

5.3.1 Vyhodnocení infiltrace

Vyhodnocení lze provádět v programu Excel. Abychom mohli začít vyhodnocovat, musíme naměřené časy převést do vhodné formy, ve většině případů se počítá v sekundách. Nyní už můžeme přistoupit k vyhodnocování I a i . I se vyhodnocuje od času, kdy se hladina ve válci ustálí. Dále se načítají i odečítací hroty, pomocí výšky dolítí se načítají následující časové úseky, i se následně stanoví z poměru rozdílů I a času (t).

Po výpočtech se vynesou grafy pro I a i pro znázornění měřených hodnot.

5.3.2 Vyhodnocení počáteční infiltrace

Vyhodnocování počáteční infiltrace spočívá jen v několika málo odlišnostech od způsobu popsaného v kapitole 5.3.1. Rozdíl je v tom, že I se vyhodnocuje již od počátku lití vody do válce. Abychom mohli vyhodnotit I_p a i_p (tedy hodnoty počáteční kumulativní a intenzity infiltrace) potřebujeme znát teoretickou výšku dolité vody, průměrnou výšku výtopy na nejnižší hrot, výšku výtopy při prvním odečtu počáteční množství infiltrované vody stanovíme na základě předchozích hodnot. Po určení hodnoty pro počátečního množství infiltrované vody probíhají

výpočty stejným způsobem jako při vyhodnocování infiltrace bez počáteční infiltrace.

Teoretická výška dolité vody se stanovila z podílu počátečního množství dolité vody a plochy válce.

Průměrná výška výtopy na nejnižší hrot byla stanovena rozdílem průměrné hodnoty pro topografii terénu z mřížky a vzdálenosti ustálené hladiny při měření od horního okraje válce.

Výška výtopy při prvním odečtu byla stanovena součtem průměrné výšky výtopy na nejnižší hrot a vzdálenost tohoto hrotu a prvního odečteného hrotu.

Počáteční množství infiltrované vody se stanovilo jako rozdíl teoretické výšky dolité vody a výšky výtopy při prvním odečtu.

Dále po vynesení grafů byla provedena kontrola homogenity zaznamenaných dat. V případě, kdy byl zaznamenan výrazný rozdíl po sobě následujících hodnot, přistoupilo se k vyhlazení toho časového úseku pomocí algebrace (součtů) množství dolité vody. Jedna z nejčastějších úprav spočívala v modifikaci počátku pokusu, kdy odečítání hrotů nebylo zachyceno zcela přesně. Chyby mohly nastat rychlou počáteční infiltrací, nestihnutím intervalu odtržení hrotu a lehkým prodlením mezi signálem na změření času a zmáčknutím stopek.

Abychom měli přehled o hodnotách infiltrace v čase rovném jedné minutě, hodnoty infiltrace byly pro tento čas lineárně interpolovány z měřených hodnot.

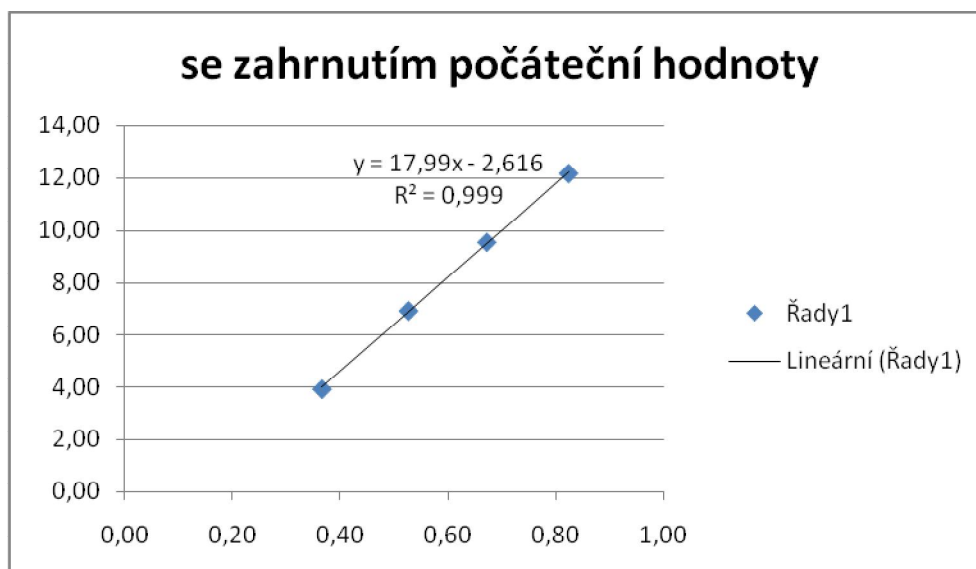
Další krok spočívá ve stanovení hodnoty referenční sorptivity S_{ref} z měřených dat dle vzorce:

$$S_{ref} = \frac{Sh}{(1+s_n h)^{1/2}}, \quad 5.1$$

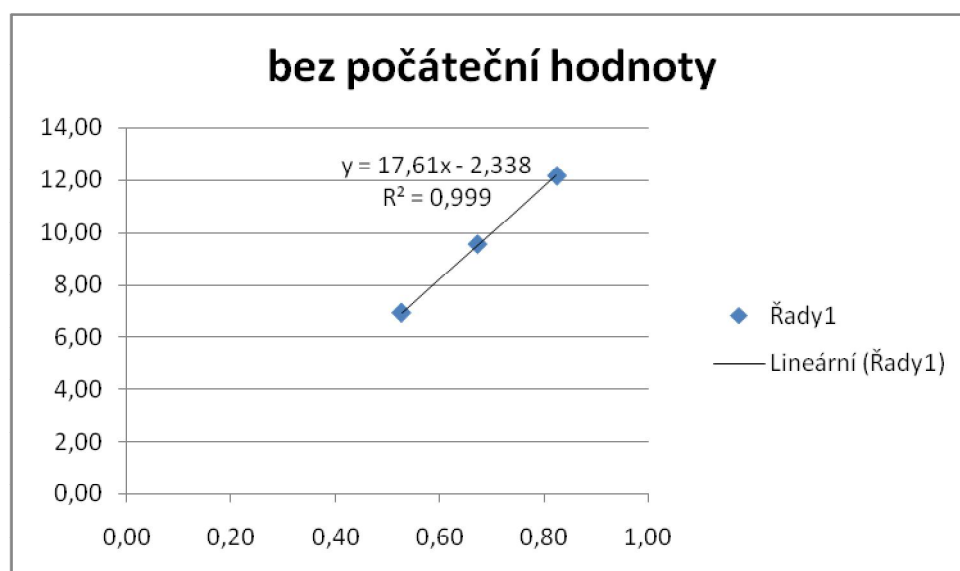
kde je Sh – sklon regresní křivky, s_n – sorpční číslo (stanovená konstanta pro strukturální půdy 0,12), h je výška výtopy ve válci[cm] (*ELSEVIER, 2016*).

Abychom mohli využít tento výpočet, potřebujeme nejprve znát hodnotu regresní křivky stanovené z grafu vynesáním I proti odmocnině času t , graf a křivku lineární regrese vykreslíme jen pro prvních 4 – 6 hodnot. Příklad stanovení hodnoty sklonu regresní přímky pro časovou řadu se zahrnutím počáteční infiltrace je uveden na obr. č. 25. Na obr. č. 26 je uveden příklad stanovení sklonu regresní přímky pro časovou řadu bez zahrnutí počáteční infiltrace.

Obr. č. 25: Graf pro odečtení hodnoty z regresní křivky pro celou řadu hodnot, měření 14



Obr. č. 26: Graf pro odečtení hodnoty z regresní křivky pro řadu hodnot bez 1. hodnoty, měření 14



Při výpočtu byly použity dvě hodnoty pro výšku výtopy ve válci. Jeden výpočet je pro $h1$ = průměrné výšce výtopy na nejnižší hrot a pro $h2$ = průměrné výšce výtopy měřené metrem. Hodnota sorptivity je závislá na časovém měřítku. Referenční sorptivita byla stanovena jak pro časovou řadu v sekundách tak v minutách.

Tento výpočet je důležitou součástí vyhodnocení neboť hodnoty S_{ref} jsou asi nejpřesnějším vyhodnocením sorptivity, pro výpočet jsou stanovené 3 měřené konstanty, zatímco v infiltračních rovnicích Hortona, Mezenceva a dalších je hodnota sorptivity odhadována interpolací měřených hodnot.

Dílčím výpočtem při stanovování hodnot infiltrace je hydraulická vodivost, v tomto případě nasycená hydraulická vodivost referenční K_{sref} (*Reynolds et Elrik, 1990*). Tento výpočet není pro práci zásadní, ale je standardním výpočtem,

$$K_{sref} = \frac{ic}{h/(Ck1*dz + Ck2*ri) + 1*[sn(Ck1*dz + Ck2*ri)]+1}, \quad 5.2$$

kde je ic – průměrná hodnota intenzity infiltrace z posledních 3 měření [cm/s], h – výška výtopy[cm], $Ck1$ a $Ck2$ jsou empirické konstanty $0,316\pi$ a $0,184\pi$, dz – hloubka zanoření válce[cm], ri – poloměr válce ve kterém probíhá pokus[cm], sn – sorpční číslo. Jednotky K_{sref} jsou $m.s^{-1}$ (*Reynolds et Elrik, 1990*).

Vypočtená a vyhlazená data se dále upravila do podoby vhodné pro simulaci v programu R infiltračními rovnicemi. Do programovacího skriptu se vkládaly hodnoty pro čas[s] a kumulativní infiltraci [mm] a byly vyhodnoceny parametry infiltračních rovnic Hortona, Mezenceva, Swartzendubera, dvouparametrická a tříparametrická Philipova rovnice. Parametry rovnic byly stanoveny pomocí funkce DEoptim (optimalizace na základě diferenciální evoluce). Jako objektivního kritéria bylo použito odmocniny střední kvadratické chyby. Z odvozených parametrů infiltračních rovnic byly stanoveny hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (K_s) a u fyzikálně založených rovnic také sorptivita (S). Hodnoty K_s a S byly odvozeny na základě průměrů interpolací, viz kapitola 5.3.2 pro minimální a maximální hodnoty.

Programovací skript byl zapůjčen od Ing. Lukáše Jačky.

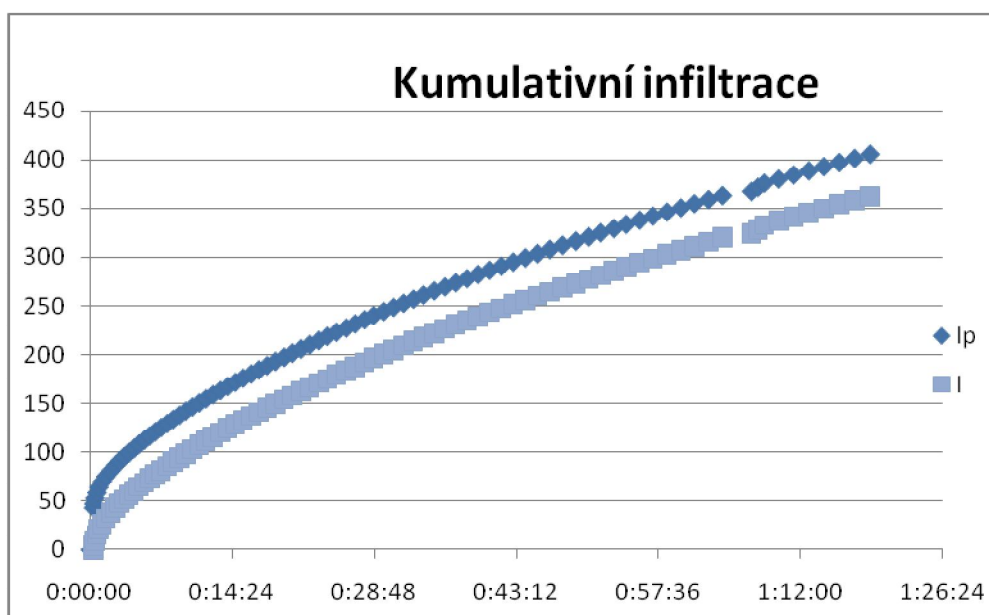
6. Výsledky

Měření probíhalo ve třech sériích, první série obsahuje 3 měření, druhá série 4 měření a třetí série 8 měření. Celkem tedy bylo provedeno 15 infiltračních pokusů. Každý pokus trval zhruba hodinu. Fotodokumentace k infiltračním pokusům je přiložena v příloze obrázků č. 36, fotografie od čísla 6–15.

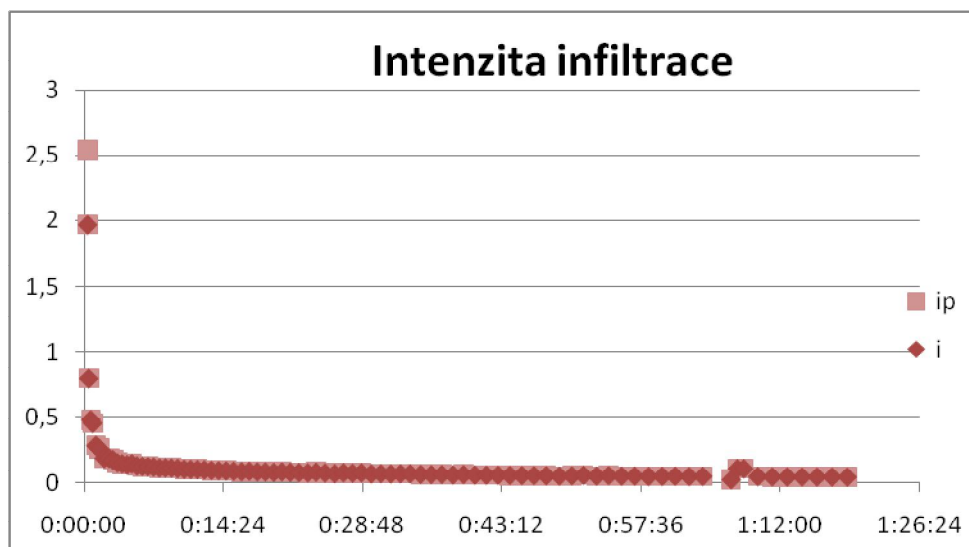
Bylo vyhodnocováno 13 infiltračních pokusů. Důvod pro vyřazení 2 měření je popsána v kapitole 7. V prvním kroku se vyhodnocuje infiltrace I a i a vynesení grafu pro tyto hodnoty, v dalším kroku se vyhodnocovala počáteční infiltrace I_p a i_p a následným vynesení grafu.

Vyhlazené grafy v porovnání I , I_p a i, i_p jsou znázorněny na obrázcích č. 27 a č. 28.

Obr. č. 27: Kumulativní infiltrace I a I_p , měření 2



Obr. č. 28: Intenzita infiltrace i a i_p , měření 2



V tabulce č. 3 jsou zobrazeny celkové hodnoty I a I_p v mm a $i = i_p$ v mm/s dle měření pro konečný čas s.

Tab. č. 3: Hodnoty celkové kumulativní infiltrace [mm] a intenzity infiltrace [mm/s] pro konečný čas

č. měř	I	I_p	$i = i_p$	Čas
1	929,22	971,09	0,22	1:05:58,90
2	361,92	405,43	0,04	1:18:59,50
3	733,75	749,54	0,18	52:27,0
5	43,53	60,12	0,004	56:04,2
6	80,59	84,11	0,012	50:56,1
7	72,13	78,08	0,017	51:21,2
9	41,69	48,22	0,005	56:49,0
10	159,73	174,08	0,032	55:48,7
11	187,21	191,14	0,033	53:52,7
12	265,72	278,1	0,056	51:12,8
13	56,32	58	0,007	52:35,8
14	59,5	58,42	0,008	0:52:00
15	118,88	129,87	0,013	52:05,0

Tabulka č. 4 zobrazuje hodnoty počáteční infiltrace a rychlosti infiltrace v prvním časovém kroku I_p a i_p .

Tab. č. 4: Počáteční infiltrace a rychlost pro tuto infiltraci v prvním časovém kroku

č. měř.	I_p	i_p	Čas
1	41,51	3,13	0:00:09,30
2	43,51	2,55	0:00:17,09
3	15,79	2,3	0:00:06,88
5	16,6	4,5	0:00:05,30
6	3,52	0,34	0:00:10,28
7	5,96	0,7	0:00:08,52
9	6,53	0,52	0:00:12,49
10	14,35	1,22	0:00:11,72
11	3,94	0,52	0:00:07,54
12	12,38	1,59	0:00:07,79
13	1,68	0,19	0:00:08,81
14	3,93	0,49	0:00:08,07
15	10,98	1,26	0:00:08,71

Tabulka č. 5 obsahuje hodnoty S_{ref} stanovené z měřených dat infiltrace a počáteční infiltrace společně s hodnotou kumulativní infiltrace v jedné minutě. Pod tabulkou jsou uvedeny průměry těchto hodnot pro přehled velikosti rozdílů.

Tab. č. 5: Hodnoty S_{ref} stanovené z měřených dat a hodnoty kumulativní infiltrace v jedné minutě

č. měř.	Referenční sorptivita se zahrnutím počátku	Referenční sorptivita bez zahrnutí počátku	Kumulativní infiltrace pro jednu minutu	Referenční sorptivita se zahrnutím počátku – rozdíl	Referenční sorptivita bez zahrnutí počátku – rozdíl
1	22,1800	21,2400	57,2150	-35,0350	-35,9750
2	42,7993	38,9527	67,1518	-24,3525	-28,1991
3	35,4959	31,0343	45,7455	-10,2496	-14,7111
5	7,6802	7,3575	26,4348	-18,7546	-19,0772
6	10,6446	10,6997	10,4034	0,2412	0,2963
7	9,1504	9,6450	11,6959	-2,5456	-2,0509
9	13,7168	13,4808	14,9556	-1,2388	-1,4747
10	50,9361	46,6114	45,5390	5,3971	1,0725
11	18,4932	15,9863	16,8460	1,6472	-0,8597
12	23,7830	22,9052	29,7451	-5,9621	-6,8399
13	8,3067	8,0721	7,2918	1,0149	0,7804
14	16,0395	15,7002	17,9042	-1,8647	-2,2040
15	69,3747	70,1758	50,2378	19,1369	19,9381
průměr	25,2769	23,9893	30,8589	-5,5820	-6,8696

Tabulka č. 6 zobrazuje hodnoty pro K_{sref} stanovené z měřených dat pro výšky $h1$ a $h2$ v $m.s^{-1}$.

Tab. č. 6: Hodnoty pro K_{sref} stanovené z měřených dat [$m.s^{-1}$]

č. měř.	$K_{ser} h1$	$K_{sref} h2$
1	5,5E-05	5,5E-05
2	1,1E-05	1,1E-05
3	4,6E-05	4,6E-05
5	1,2E-06	1,2E-06
6	3,6E-06	3,6E-06
7	3,9E-06	3,9E-06
9	1,4E-06	1,4E-06
10	7,9E-06	7,9E-06
11	8,5E-06	8,5E-06
12	1,4E-05	1,4E-05
13	2,7E-06	2,7E-06
14	2,3E-06	2,3E-06
15	4,7E-06	4,6E-06

Vyhlazené hodnoty s výjimkou posledních 3 hodnot (tyto hodnoty nepovažujeme za dostatečně vypovídající z důvodu udržování hladiny pouze pro měření výtopy ve válci) se naformátovaly do podoby vhodné k výpočtu v programu R.

Následná simulace probíhala v programu R za pomoci skriptu vytvořeného pro infiltrační rovnice Hortona, Kostakova, Swartzendruber, Philipa.

Tabulky č. 7 a č. 8 zobrazují hodnoty S_{ref} stanovené výpočtem popsaným v kapitole 5.3.2 a hodnoty S stanovené infiltračními rovnicemi.

Tab. č. 7: Hodnoty S_{ref} z měřených dat v sekundách

č. měř	od začátku řady	bez počátku řady
	Srefl	Srefl
1	2,8655	2,7370
2	5,5246	5,0448
3	4,5904	4,0055
5	0,9901	0,9543
6	1,3670	1,3773
7	1,1731	1,2474
9	1,7747	1,7397
10	6,5791	6,0298
11	2,3902	2,0636
12	3,0748	2,9595
13	1,0701	1,0430
14	2,0685	2,0238
15	8,9569	9,0570

Tab. č. 8: Hodnoty S vypočtené z infiltračních rovnic v sekundách

č.měř.	Horton	Horton	Mezenecv	Mezenecv	Philip2P	Philip2P	Philip3P	Philip3P	SW	SW I _p
		I _p		I _p		I _p		I _p		
1	0,2624	5,4670	0,3596	3,7587	1,1281	3,3057	1,1281	3,8334	1,1281	5,0492
2	0,3941	1,0015	1,3219	5,2243	3,7102	5,7293	3,7102	5,8469	3,7102	8,2738
3	0,4286	0,5215	1,0222	1,8082	4,2213	5,0912	4,2213	5,0912	4,2213	5,0911
5	0,2128	1,0994	1,0852	2,4271	0,9080	1,3715	0,9147	1,3782	1,7590	5,7085
6	0,1265	0,1523	0,7237	0,8938	1,4278	1,5088	1,4570	1,5380	1,4803	1,6857
7	0,0858	0,1791	0,3709	0,9293	0,8710	1,2478	0,8710	1,2822	0,8710	1,6048
9	0,1999	0,3933	0,8027	1,2860	0,7575	0,9209	0,7701	0,9335	1,5276	2,5676
10	1,2404	1,5683	2,3487	3,2441	2,3711	2,8620	2,4330	2,9333	5,4336	7,7668
11	0,1971	0,2252	0,8280	0,9644	2,2743	2,4903	2,2743	2,4903	2,2743	2,4903
12	0,2667	0,3866	0,9969	1,8040	2,9515	3,7290	2,9515	3,7290	2,9515	3,7290
13	0,1031	0,1213	0,4615	0,5559	0,8541	0,9516	0,8947	0,9664	0,9240	1,0845
14	0,3763	0,4581	1,1504	1,3900	0,9911	1,0895	1,0109	1,1094	2,4128	2,9597
15	1,5075	1,6816	3,0746	3,6755	2,1369	2,3879	2,1852	2,4362	8,0830	9,2119

Tabulka č. 9 zobrazuje K_s vypočtené infiltračními rovnicemi Hortona, Mezenceva, Swartzenndruber, Philipa.

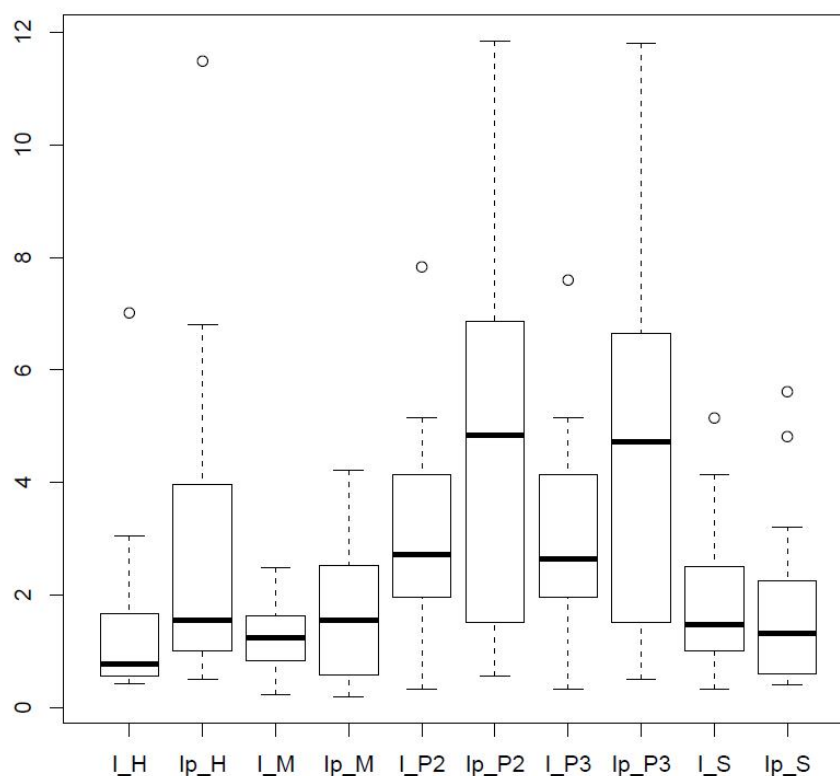
Tab. č. 9: Hodnoty K_s vypočtené z infiltračních rovnic m^*s^{-1}

	Horton	Horton Ip	Mezencev	Mezencev Ip	Philip2P	Philip2P Ip	Philip3P	Philip3P Ip	SW	SWIp
1	1,3E-04	2,3E-04	2,2E-04	2,3E-04	9,5E-06	2,2E-04	1,5E-04	1,3E-04	2,2E-04	2,3E-04
2	6,3E-05	6,6E-05	2,4E-05	5,3E-05	1,2E-06	3,4E-05	1,6E-05	1,5E-06	2,4E-05	4,2E-08
3	2,0E-04	2,0E-04	1,6E-04	1,5E-04	5,1E-06	9,8E-05	1,1E-04	1,0E-04	1,6E-04	1,5E-04
5	6,0E-06	8,4E-06	3,9E-07	5,4E-06	8,3E-08	8,3E-08	1,1E-07	1,1E-07	1,7E-08	2,0E-08
6	1,6E-05	1,6E-05	6,7E-07	6,7E-07	3,3E-07	3,3E-07	4,4E-07	4,4E-07	2,1E-08	2,1E-08
7	1,8E-05	1,9E-05	7,8E-06	1,6E-05	4,4E-06	1,0E-05	5,2E-06	1,6E-06	7,8E-06	1,2E-05
9	7,3E-06	7,6E-06	5,1E-06	5,8E-06	1,5E-07	1,5E-07	2,0E-07	2,0E-07	1,5E-08	1,7E-08
10	3,7E-05	3,7E-05	3,5E-05	3,5E-05	2,7E-05	2,5E-05	3,4E-06	1,1E-06	2,4E-05	3,0E-08
11	4,3E-05	4,4E-05	1,9E-05	1,6E-05	8,9E-07	8,9E-07	1,3E-05	1,1E-05	1,9E-05	1,6E-05
12	6,6E-05	6,9E-05	3,5E-05	2,3E-05	1,4E-06	2,0E-05	2,3E-05	1,6E-05	3,5E-05	2,4E-05
13	1,4E-05	1,4E-05	8,9E-06	9,7E-06	3,7E-06	3,9E-06	1,7E-06	7,6E-07	9,7E-06	7,2E-06
14	1,1E-05	1,1E-05	9,3E-06	9,3E-06	3,0E-06	2,2E-06	3,1E-07	3,1E-07	1,7E-08	1,8E-08
15	2,3E-05	2,3E-05	2,2E-05	2,1E-05	1,3E-05	1,0E-05	7,2E-07	7,2E-07	2,6E-08	2,7E-08

Zohledníme-li simulace v obdobných programech musíme brát v úvahu chyby vznikající touto simulací. Pro názornost se z hodnot pro RMSE vytvoří BoxPloty, na kterých je názorně vidět velikost chyb a to, jak se mezi sebou liší hodnoty pro infiltrační hodnot počáteční infiltrační. Hodnoty RMSE byly stanovovány pro měřená a simulovaná data.

Vyhodnocení infiltrační znázorňuje grafy s indexem I a vyhodnocení počáteční infiltrační znázorňuje graf s indexem Ip. Rovnice jsou seřazeny v pořadí Horton, Mezencev, dvouparametrický Philip, tříparametrický Philip, Swartzendruber.

Obr. č. 29: Boxploty hodnot RMSE pro infiltrační rovnice



Střední hodnoty RMSE

V tabulce č.9 můžeme vidět střední hodnoty pro RMSE. Je patrné, že rozdíl mezi hodnotou pro vyhodnocení infiltrace a vyhodnocením počáteční infiltrace se pohybuje okolo hodnoty 1–2[mm] s výjimkou vyhodnocovací rovnice dle Swartzendruber a Mezenceva, zde je rozdíl mnohem menší. Velikost tohoto rozdílu ukazuje na schopnost daných rovnic simulovat počáteční infiltraci.

Hodnota pro celkovou I se pohybuje v rozmezí od 40 mm do 970 mm.

Tab. č. 10: Přehled středních hodnot RMSE[mm]

Vyhodnocovací rovnice	Infiltrace bez zahrnutí počáteční infiltrace	Infiltrace se zahrnutím počáteční infiltrace
Horton	0,77	1,55
Mezencev	1,24	1,55
Philip 2P	2,73	4,85
Philip 3P	2,64	4,72
Swartzendruber	1,47	1,31

7. Diskuse

Z patnácti provedených infiltračních pokusů bylo vyhodnocení počáteční infiltrace použito 13 pokusů. Z celé sady infiltračních pokusů byla vyřazena měření č. 4 a č. 8.

Měření č. 4 bylo vyřazeno, protože z vyhodnocených dat nebylo možné stanovit velikost počáteční infiltrace. Při vyhodnocení dat byla počáteční infiltrace vyhodnocena jako nulová, což znamená, že použitou metodikou jsme nebyli schopni tuto dávku měřit a následně kvantifikovat. Důvodem nulové hodnoty bylo pravděpodobně značné zhutnění půdy v místě pokusu. Ta byla zhutněna častými pojezdy přes tuto část, což se projevuje na vsaku vody do půdy. Z toho to důvodu je taková půda pro naši experimentální metodu nevhodná.

Měření č. 8 bylo vyřazeno z důvodu nevytopení celé plochy válce a následným snížením hodnoty pro počáteční množství vody za první časovou jednotku při vyhodnocování. Důvodem nevytopení celé plochy válce byl mírný svah v kombinaci se snahou o udržení co nejnižší výtopy v průběhu pokusu.

Hodnoty pro tato měření nebyly reprezentativní, zvláště u vyhodnocování infiltračními rovnicemi. V tomto případě hodnoty spíše zkreslovaly výsledky.

Celkové časy trvání pokusů se pohybovaly v rozmezí od 50 minut do 1 hodiny 18 minut. Měřené hodnoty celkové kumulativní infiltrace se pohybovaly v rozmezí od 40 mm po 970 mm za infiltrační pokus. Hodnoty pro ustálenou rychlost infiltrace se pohybovaly v rozmezí 0,004 mm/s až 0,22 mm/s. Rozkolísanost těchto hodnot mohla být zapříčiněna preferenčními cestami v půdě (makropóry), rozrušením půdy zapříčiněnou zanořováním válce, méně propustnými vrstvami a vysokou heterogenitou půdního profilu. Rozkolísanost těchto hodnot však nevykazuje velké rozkolísání, jako ukazuje rozkolísanost hodnot, které publikoval Jačka (2009). Důvodem menšího rozkolísání hodnot je použití inovativní metody na zanoření válce, které vytváří menší preferenční cesty u stěn válce.

Na lokalitě Trhové Dušnice byly hodnoty pro kumulativní infiltraci vyšší než na experimentální ploše Šardice. Hodnoty kumulativní infiltrace se od sebe liší také na experimentální ploše Šardice, kdy k těmto rozdílům dochází na každé části plochy s jiným typem orby.

Jak uvádí Kutílek et al. (1988), stanovení tzv. první dávky je velice obtížné. Za pomoci upravené metodiky uvedené v kapitole 5.2.1 bylo možné stanovení

počáteční infiltrace z pokusu. Hodnoty počáteční infiltrace se pohybovaly v rozmezí od 1,26 mm po 43,51 mm za časový úsek od 5 po 17 sekund. Rychlosti infiltrace pro počáteční infiltraci se pohybovala od 0,34 mm/s po 4,50.

Pokud budeme brát průměrnou hodnotu celkové kumulativní infiltrace ze všech provedených pokusů a stejně tak průměrnou hodnotu počáteční infiltrace (kdy tyto hodnoty jsou: průměrná hodnota kumulativní infiltrace je 252,8 mm a průměrná hodnota počáteční infiltrace je 13,9 mm), pak hodnota počáteční infiltrace je zhruba osmnáctinou celkové kumulativní infiltrace. Průměrná hodnota rychlosti počáteční infiltrace je 0,03krát větší než průměrná hodnota celkové ustálené rychlosti na konci pokusu.

Porovnáním hodnot S_{ref} s kumulativní infiltrací v jedné minutě usuzujeme, že výpočty sorptivity z přímo měřených dat jsou dostačující. Z průměrů hodnot je patrné, že hodnoty sorptivity bez zahrnutí počáteční infiltrace a hodnoty počáteční infiltrace nemají mezi sebou velký rozdíl. Průměr hodnot kumulativní infiltrace pro jednu minutu také není příliš vzdálená od hodnot S_{ref} .

Zajímavostí této práce je, že pro vyhodnocení počáteční infiltrace infiltračními rovnicemi, ať už se jednalo o rovnice empirické, nebo fyzikální, je vhodná pouze jediná z těchto rovnic, a to fyzikální rovnice Swartzendrubera. Tato rovnice rovněž zvýšila přesnost proložených dat při zahrnutí počáteční infiltrace.

8. Závěr

V termínech 8.9.2015, 30.6.2016, 12.–14.10.2016 byla provedena infiltrační měření jednoválcovou metodou s inovativními prvky. Celkem bylo vyhodnoceno 13 infiltračních pokusů, s přihlédnutím k experimentální povaze práce považujeme počet infiltračních pokusů za dostatečný.

Metodika měření infiltrace válcovou metodou byla upravena o kroky, které se dosud nebraly v úvahu, jako je jiný princip zanoření válce do půdy a měření topografie uvnitř válce.

Odhad hodnot počáteční infiltrace byl úspěšný. Rozdíly mezi hodnotami infiltrace a počáteční infiltrace se liší, kdy jsou hodnoty vyšší pro počáteční infiltraci. Největší kumulativní infiltrace byla naměřena na lokalitě Trhových Dušníků. Zde se kumulativní infiltrace pohybuje v rozmezí od 970 do 250 mm, ustálené rychlosti infiltrace se pohybují v rozmezí 0,22 mm/s až 0,04 mm/s. Na experimentální ploše Šardice hodnoty kumulativní infiltrace dosahují rozmezí od 280 po 40 mm a ustálené rychlosti infiltrace rozmezí 0,056 mm/s až 0,004 mm/s. Hodnoty počáteční infiltrace v prvním časovém kroku se pohybují v rozmezí od 43,51 mm po 1,26 mm a počáteční rychlosti infiltrace rozmezí 4,50 až 0,34 mm/s v časovém rozmezí 17 až 5 sekund. Nejvyšší hodnoty byly opět na lokalitě Trhových Dušníků kde se hodnoty počáteční infiltrace pohybují od 43,51 po 15,79 mm a ustálené rychlosti infiltrace 3,13 až 2,3 mm/s v časovém rozmezí 6 až 17 sekund. Na experimentální ploše Šardice tyto hodnoty dosahují rozmezí pro počáteční infiltraci od 16,6 mm po 1,68 mm a ustálené rychlosti infiltrace 1,9 až 0,19 mm/s v časovém rozmezí 5 až 12 sekund. Na této lokalitě jsou také rozdíly infiltračních hodnot mezi různými způsoby orby.

Vyhodnocená data kumulativní infiltrace a počáteční infiltrace simulovaná v programu R vykazují vhodnost empirických a fyzikálních infiltračních rovnic pro stanovení infiltračních charakteristik. Při porovnání hodnot S vypočtených z infiltračních rovnic a S_{ref} vypočtených z měřených dat vykazuje největší shodu u rovnice Swartzendruba v některých případech i Philipovy rovnice.

Schopnost teoretických rovnic simulovat měřená data byla stanovena na základě objektivního kritéria RMSE. Chyba v simulaci dat je nejmenší u rovnice pro Swartzendruba a také u rovnice Mezenceva.

10. Seznam literárních zdrojů

Hillel D., 1998: Introduction to environmental soil physics. Academic Press, San Diego USA.

Hrádek F. et Kuřík P., 2008: Hydrologie. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Jačka L., 2009: Stanovení vybraných hydropedologických charakteristik na povodí Modrava 2, diplomová práce.

Janeček M., 1998: Použití metody CN k navrhování protierozních opatření. Sb.konf. Ochrana půdy před erozí. České Budějovice s. 1–21.

Kodešová R., 2012: Modelování v pedologii, Česká zemědělská univerzita.

Kutílek M., Veselá J., Alexandrová J.: Vodní hospodářství 9/1988 – řada A Poznámky k vyhodnocování infiltračních testů, Fakulta stavební ČVUT, katedra hydromeliorací – Praha.

Kutílek M., 1975: Aplikovaná hydropedologie, vydavatelství ČVUT.

Kutílek M., 1978: Vodohospodářská pedologie, SNTL/ALFA, vydavatel'stvo technickej a ekonomickej literatúry, n. p. Bratislava.

Kutílek M. et Nielsen D. R., 1994: Soil hydrology, Catena Verlag, Cremlingen – Destedt, Germany.

Kutílek M., Kuráž V., Císlarová M., 2004: Hydropedologie 10. České vysoké učení technické v Praze, vydavatelství ČVUT.

Lal R. et Shukla M. K., 2004: Principles of soil physics, Marcel Dekker, Inc., New York.

LCaŘ (listy cukrovarnické a řepařské), září/říjen 2007: Vliv způsobu zpracování půdy na rychlost infiltrace vody do půdy, str. 272–275.

Matula S., Semotán J., Veselá J., 1989: Hydropedologie – praktikum. Editační středisko ČVUT.

Pavlásek J. et Jačka L., 2014: Hydropedologie. Studijní text ČZU.

Pech P., 2010: Speciální příklady hydrauliky podzemních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G.Masaryka, v.v.i., v edici Práce a studie jako sešit 201.

Philip J. R., 1987: The Infiltration Join Problem. *Water resources research*, vol. 23, no. 12, pages 2239–2245.

Reynolds W. D. et Elrick D. E. (korespondenční autor), 1990: Poned Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow.

Šarapatka B., 2014: *Pedologie a ochrana půdy*. Vydala Univerzita Palackého v Olomouci.

Tolasz R. et al., 2007: *Atlas podnebí Česka*, Praha.

Valentová J., 2001: *Hydraulika podzemní vody*, ČVUT.

11. Seznam internetových zdrojů

Cenia, ESF©: [online], 2013, [cit. 11-10-2016]. Dostupný na:
http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=zakladni_fyzikalni_vlastnosti_pudy&site=puda;
<http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=uvod&site=puda>.

Česká geologická služba: Půdní mapa 1: 50 000, [online], 2012 [cit.25-10-2017].
Dostupný na:
<http://mapy.geology.cz/pudy/>.

ČVUT – Fakulta stavební: [online], 2017 [cit. 29-11-2016]. Dostupný na:
<http://storm.fsv.cvut.cz/o-nas/vybaveni/destove-simulatory/laboratorni-destovy-simulator/>.

ELSEVIER: [online], 2016 Jačka L., Pavlásek J., Pech P., Kuráž V., 2016: Geoderma, Contents lists available at ScienceDirect. [cit. 04-07-2016]. Dostupný na:
www.elsevier.com/locate/geoderma.

FAPPZ ČZU: [online], 2013 [cit. 29-11-2016]. Dostupný na:
<http://hydropedologie.agrobiologie.cz/tlakovy.html>.

Geologie: [online] [cit. 05-01-2017]. Dostupný na:
http://geologie.vsb.cz/Geologie/KAPITOLY/10_z%C3%A1klady_hydro/10_z%C3%A1klady_hydrgeologie.htm.

InMeteo, s. r. o.: [online], 2015 [cit. 25-10-2016]. Dostupný na:
<http://www.in-pocasi.cz/archiv/>.

Investice do rozvoje vzdělávání: [online] [cit. 29-11-2016]. Dostupný na:
http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5054&typ=html.

MORAVIO, Profil Press s. r. o.: [online], 2013 [cit. 05-12-2016]. Dostupný na:
<http://zahradaweb.cz/problematika-hydrofobnich-pud-a-suche-skvrnitosti-travniku/>.

Patel: [online], 2016 [cit. 05-12-2015]. Dostupný na:
<http://www.professorpatel.com/curve-number-introduction.html>.

Seznam a. s.© OpenStreetMap:[online], 2016 [cit. 10-03-2017]. Dostupný na:
<https://mapy.cz/zakladni?x=14.3238777&y=50.0330471&z=11>.

12. Seznam obrázků, fotografií a tabulek

Obr. č. 1: Potenciál půdní vody – hydrolimity (převzato Šarapatka, 2014).....	14
Obr. č. 2: Darcyho pokus (Geologie)	16
Obr. č. 3: Meze platnosti Darcyho zákona (převzato Valentová, 2001).....	18
Obr. č. 4: Darcy-Buckinghamův pokus (převzato Kutílek et Nielsen, 1994)	20
Obr. č. 5: Průběh křivek dle Darcy-Buckinghama a hystereze (převzato Kutílek et Nielsen, 1994)	21
Obr. č. 6: Princip rovnice kontinuity (převzato Kodešová, 2012).....	22
Obr. č. 7: Souřadnicový systém pro proudění (převzato Jačka, 2009)	23
Obr. č. 8: Retenční čára pro vyjádření C	24
Obr. č. 9: Schéma dvouválcové metody / schéma jednoválcové metody, upravené.....	27
Obr. č. 10: Schéma podtlakového infiltrometru (FAPPZ, 2013)	28
Obr. č. 11: Schéma Guelphského permeamtru (Investice do rozvoje a vzdělávání, 2016)...	29
Obr. č. 12: Simulátor deště (ČVUT, 2017)	30
Obr. č. 13: Schéma principu výpočtu Green-Ampt.....	32
Obr. č. 14: Nomogram pro odvození CN (Patel, 2016)	37
Obr. č. 15: Situační zařazení lokality Trhové Dušníky (Seznam, 2016).....	41
Obr. č. 16: Pedologická mapa lokality (Česká geologická služba, 2012)	43
Obr. č. 17: Letecká mapa oblasti měření Trhové Dušníky (Seznam, 2016)	44
Obr. č. 18: Situační zařazení lokality Šardice (Seznam, 2016)	45
Obr. č. 19: Teplotní souhrn měsíce června 2016 (InMeteo, 2015).....	46
Obr. č. 20: Srážkový souhrn měsíce června 2016 (InMeteo, 2015)	46
Obr. č. 21: Teplotní souhrn měsíce října 2016 (InMeteo, 2015).....	46
Obr. č. 22: Srážkový souhrn měsíce října 2016 (InMeteo, 2015)	47
Obr. č. 23: Pedologická mapa oblasti Šardice (Česká geologická služba, 2012)	48
Obr. č. 24: Letecká mapa oblasti měření Šardice (Seznam, 2016).....	49
Obr. č. 25: Graf pro odečtení hodnoty z regresní křivky pro celou řadu hodnot, měření 14..	55
Obr. č. 26: Graf pro odečtení hodnoty z regresní křivky pro řadu hodnot bez 1. hodnoty, měření 14.....	55
Obr. č. 27: Kumulativní infiltrace I a I_p , měření 2	57
Obr. č. 28: Intenzita infiltrace i a i_p , měření 2.....	58
Obr. č. 29: Boxploty hodnot RMSE pro infiltrační rovnice	63
Obr. č. 30: Infiltrační zápisník.....	74
Obr. č. 31: Kumulativní infiltrace měření 1 Obr. č. 32: Intenzita infiltrace měření 1	75

Obr. č. 33: Kumulativní infiltrace měření 3	Obr. č. 34: Intenzita infiltrace měření 375
Obr. č. 35: Kumulativní infiltrace měření 5	Obr. č. 36: Intenzita infiltrace měření 575
Obr. č. 37: Kumulativní infiltrace měření 6	Obr. č. 38: Intenzita infiltrace měření 676
Obr. č. 39: Kumulativní infiltrace měření 7	Obr. č. 40: Intenzita infiltrace měření 776
Obr. č. 41: Kumulativní infiltrace měření 9	Obr. č. 42: Intenzita infiltrace měření 976
Obr. č. 43: Kumulativní infiltrace měření 10	Obr. č. 44: Intenzita infiltrace měření 1077
Obr. č. 45: Kumulativní infiltrace měření 11	Obr. č. 46: Intenzita infiltrace měření 1177
Obr. č. 47: Kumulativní infiltrace měření 12	Obr. č. 48: Intenzita infiltrace měření 1277
Obr. č. 49: Kumulativní infiltrace měření 13	Obr. č. 50: Intenzita infiltrace měření 1378
Obr. č. 51: Kumulativní infiltrace měření 14	Obr. č. 52: Intenzita infiltrace měření 1478
Obr. č. 53: Kumulativní infiltrace měření 15	Obr. č. 54: Intenzita infiltrace měření 1578
Foto č. 1: Sondýrky odebrané z částí orané pluhem a úhoru	48
Foto č. 2: Mřížka pro měření topografie vně válce	50
Foto č. 3: Zanořený válec s vystříhaným porostem	52
Foto č. 4: Válec s měřicí mřížkou	52
Foto č. 5: Konstrukce na zanoření válce do půdy	53
Foto č. 6: Rozložené pomůcky na měření infiltrace.....	79
Foto č. 7: Detail pomůcek připravených k měření infiltrace	79
Foto č. 8: Infiltrační válec po konci měření s dosakující vodou	80
Foto č. 9: Pohled na experimentální plochu Šardic před orbou	80
Foto č. 10: Pohled na experimentální plochu Šardic po orbě z druhého kopce	81
Foto č. 11: Měření 5 způsob orby: diskování(poslední diskování proběhlo 29.6.2016 foto z 30.6.2016).....	81
Foto č. 12: Měření 6 –způsob orby: kypření.....	82
Foto č. 13: Měření 6 – pohled do válce po infiltračním pokusu (je zde vidět, jak zareagovala půda, jak do půdy zapadala/propadala se tyčka na měření topografie).....	82
Foto č. 14: Měření 7 –připraveno k měření způsob orby: pluh.....	83
Foto č. 15: Měření 12 – pohled na půdu po infiltračním pokusu (s infiltračním válci byla vytažena i půda vně)	83

Tab. č. 1: Zrnitostní složení (převzato Šarapatka, 2014)	11
Tab. č. 2: Tabulka pro stanovení PVP (převzato Hrádek et Kuřík, 2008).....	39
Tab. č. 3: Hodnoty celkové kumulativní infiltrace [mm] a intenzity infiltrace [mm/s] pro konečný čas	58
Tab. č. 4: Počáteční infiltrace a rychlost pro tuto infiltraci v prvním časovém kroku	59
Tab. č. 5: Hodnoty S_{ref} stanovené z měřených dat a hodnoty kumulativní infiltrace v jedné minutě.....	59
Tab. č. 6: Hodnoty pro K_{sref} stanovené z měřených dat [m.s ⁻¹].....	60
Tab. č. 7: Hodnoty S_{ref} z měřených dat v sekundách.....	61
Tab. č. 8: Hodnoty S vypočtené z infiltračních rovnic v sekundách.....	61
Tab. č. 9: Hodnoty K_s vypočtené z infiltračních rovnic m*s-1	62
Tab. č. 10: Přehled středních hodnot RMSE [mm]	63

13. Seznam příloh

Příloha 1 Infiltrační deník.....	74
Příloha 2 Grafy vyhodnocené infiltrace I , I_p a i, i_p	75
Příloha 3 Fotodokumentace.....	79
Příloha 4 CD obsahující infiltrační zápisníky a měřená data.....	konec dokumentu

Příloha 1 Infiltrační deník

Obr. č. 30: Infiltrační zápisník

První stránka nejlepšího formátu pro záznamy měření infiltrace vřesovou metodou																											
Akec:																											
Základní údaje o místě měření		Nákres:																									
Číslo měření: 3	Lokality:																										
Měří:	Popis místa měření:																										
Počasi:	Vegetační pokryv:																										
Půdní profil (půdní typ):																											
popis sondy:																											
Poznámky:																											
Doplňující měření																											
Teplota vzduchu: 13°C		Počáteční vlhkost půdy:																									
Teplota vody: 14°C		Konečná vlhkost půdy:																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>Odebrané vzorky:</th> <th>číslo</th> <th>Hloubka</th> <th>poloha</th> <th>hmotnost</th> <th>vláha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>				Odebrané vzorky:	číslo	Hloubka	poloha	hmotnost	vláha																		
Odebrané vzorky:	číslo	Hloubka	poloha	hmotnost	vláha																						
Další měření (půdní potenciál, ulehlost půdy atd.):																											
Vytiskněte na Filpově Hutě v únoru roku 2008																											

Druhá stránka nejlepšího formátu pro záznamy měření infiltrace vřesovou metodou																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Údaje o průběhu měření infiltrace																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Datum: 19.10.2016		čas počátku měření: 10:55	čas konce měření: 16:45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Metoda měření: <input checked="" type="checkbox"/> jednoválcová <input type="checkbox"/> dvouválcová																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Průměr vnitřního válce: 50 mm			vnějšího válce: 100 mm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Hloubka zatlučení vnitřního válce: 1,3/0,9/0,6/1,0/0,7/0,4/0,3/0,2/0,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Počáteční množství dolité vody: 2,1/1,8/1,6/1,4/1,2/1,0/0,8/0,7/0,6/0,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Výška vody infiltrovaná během prvního časového úseku od počátku výtoky: 2,1/1,8/1,6/1,4/1,2/1,0/0,8/0,7/0,6/0,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Průměrná výška výtoky během měření: 1,8/1,5/1,3/1,1/0,9/0,8/0,7/0,6/0,5/0,4/0,3/0,2/0,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Dolované množství: 1,8/1,5/1,3/1,1/0,9/0,8/0,7/0,6/0,5/0,4/0,3/0,2/0,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Časové záznamy																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>čas</th> <th>výška výtoky [cm]</th> <th>čas</th> <th>výška výtoky [cm]</th> <th>čas</th> <th>výška výtoky [cm]</th> <th>čas</th> <th>výška výtoky [cm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0:00</td><td>0,00</td><td>0:05</td><td>0,02</td><td>0:10</td><td>0,04</td><td>0:15</td><td>0,07</td></tr> <tr><td>0:20</td><td>0,10</td><td>0:25</td><td>0,18</td><td>0:30</td><td>0,27</td><td>0:35</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>0:40</td><td>0,47</td><td>0:45</td><td>0,79</td><td>0:50</td><td>1,16</td><td>0:55</td><td>1,62</td></tr> <tr><td>1:00</td><td>1,80</td><td>1:05</td><td>2,10</td><td>1:10</td><td>2,40</td><td>1:15</td><td>2,70</td></tr> <tr><td>1:20</td><td>2,80</td><td>1:25</td><td>3,15</td><td>1:30</td><td>3,45</td><td>1:35</td><td>3,75</td></tr> <tr><td>1:40</td><td>3,80</td><td>1:45</td><td>4,05</td><td>1:50</td><td>4,35</td><td>1:55</td><td>4,65</td></tr> <tr><td>2:00</td><td>4,70</td><td>2:05</td><td>5,10</td><td>2:10</td><td>5,40</td><td>2:15</td><td>5,70</td></tr> <tr><td>2:20</td><td>6,40</td><td>2:25</td><td>6,75</td><td>2:30</td><td>7,10</td><td>2:35</td><td>7,45</td></tr> <tr><td>2:40</td><td>7,40</td><td>2:45</td><td>7,80</td><td>2:50</td><td>8,10</td><td>2:55</td><td>8,40</td></tr> <tr><td>3:00</td><td>8,40</td><td>3:05</td><td>8,80</td><td>3:10</td><td>9,30</td><td>3:15</td><td>9,60</td></tr> <tr><td>3:20</td><td>9,40</td><td>3:25</td><td>9,90</td><td>3:30</td><td>10,20</td><td>3:35</td><td>10,50</td></tr> <tr><td>3:40</td><td>10,40</td><td>3:45</td><td>10,80</td><td>3:50</td><td>11,40</td><td>3:55</td><td>11,70</td></tr> <tr><td>4:00</td><td>11,40</td><td>4:05</td><td>11,70</td><td>4:10</td><td>12,00</td><td>4:15</td><td>12,30</td></tr> <tr><td>4:20</td><td>12,00</td><td>4:25</td><td>12,30</td><td>4:30</td><td>12,60</td><td>4:35</td><td>12,90</td></tr> <tr><td>4:40</td><td>12,60</td><td>4:45</td><td>12,90</td><td>4:50</td><td>13,20</td><td>4:55</td><td>13,50</td></tr> <tr><td>5:00</td><td>13,20</td><td>5:05</td><td>13,50</td><td>5:10</td><td>13,80</td><td>5:15</td><td>14,10</td></tr> <tr><td>5:20</td><td>13,80</td><td>5:25</td><td>14,10</td><td>5:30</td><td>14,40</td><td>5:35</td><td>14,70</td></tr> <tr><td>5:40</td><td>14,40</td><td>5:45</td><td>14,70</td><td>5:50</td><td>15,00</td><td>5:55</td><td>15,30</td></tr> <tr><td>6:00</td><td>15,00</td><td>6:05</td><td>15,30</td><td>6:10</td><td>15,60</td><td>6:15</td><td>15,90</td></tr> <tr><td>6:20</td><td>15,60</td><td>6:25</td><td>15,90</td><td>6:30</td><td>16,20</td><td>6:35</td><td>16,50</td></tr> <tr><td>6:40</td><td>16,20</td><td>6:45</td><td>16,50</td><td>6:50</td><td>16,80</td><td>6:55</td><td>17,10</td></tr> <tr><td>7:00</td><td>16,80</td><td>7:05</td><td>17,10</td><td>7:10</td><td>17,40</td><td>7:15</td><td>17,70</td></tr> <tr><td>7:20</td><td>17,40</td><td>7:25</td><td>17,70</td><td>7:30</td><td>18,00</td><td>7:35</td><td>18,30</td></tr> <tr><td>7:40</td><td>18,00</td><td>7:45</td><td>18,30</td><td>7:50</td><td>18,60</td><td>7:55</td><td>18,90</td></tr> <tr><td>8:00</td><td>18,60</td><td>8:05</td><td>18,90</td><td>8:10</td><td>19,20</td><td>8:15</td><td>19,50</td></tr> <tr><td>8:20</td><td>19,20</td><td>8:25</td><td>19,50</td><td>8:30</td><td>19,80</td><td>8:35</td><td>20,10</td></tr> <tr><td>8:40</td><td>19,80</td><td>8:45</td><td>20,10</td><td>8:50</td><td>20,40</td><td>8:55</td><td>20,70</td></tr> <tr><td>9:00</td><td>20,40</td><td>9:05</td><td>20,70</td><td>9:10</td><td>21,00</td><td>9:15</td><td>21,30</td></tr> <tr><td>9:20</td><td>21,00</td><td>9:25</td><td>21,30</td><td>9:30</td><td>21,60</td><td>9:35</td><td>21,90</td></tr> <tr><td>9:40</td><td>21,60</td><td>9:45</td><td>21,90</td><td>9:50</td><td>22,20</td><td>9:55</td><td>22,50</td></tr> <tr><td>10:00</td><td>22,20</td><td>10:05</td><td>22,50</td><td>10:10</td><td>22,80</td><td>10:15</td><td>23,10</td></tr> <tr><td>10:20</td><td>22,80</td><td>10:25</td><td>23,10</td><td>10:30</td><td>23,40</td><td>10:35</td><td>23,70</td></tr> <tr><td>10:40</td><td>23,40</td><td>10:45</td><td>23,70</td><td>10:50</td><td>24,00</td><td>10:55</td><td>24,30</td></tr> <tr><td>11:00</td><td>24,00</td><td>11:05</td><td>24,30</td><td>11:10</td><td>24,60</td><td>11:15</td><td>24,90</td></tr> <tr><td>11:20</td><td>24,60</td><td>11:25</td><td>24,90</td><td>11:30</td><td>25,20</td><td>11:35</td><td>25,50</td></tr> <tr><td>11:40</td><td>25,20</td><td>11:45</td><td>25,50</td><td>11:50</td><td>25,80</td><td>11:55</td><td>26,10</td></tr> <tr><td>12:00</td><td>25,80</td><td>12:05</td><td>26,10</td><td>12:10</td><td>26,40</td><td>12:15</td><td>26,70</td></tr> <tr><td>12:20</td><td>26,40</td><td>12:25</td><td>26,70</td><td>12:30</td><td>27,00</td><td>12:35</td><td>27,30</td></tr> <tr><td>12:40</td><td>27,00</td><td>12:45</td><td>27,30</td><td>12:50</td><td>27,60</td><td>12:55</td><td>27,90</td></tr> <tr><td>13:00</td><td>27,60</td><td>13:05</td><td>27,90</td><td>13:10</td><td>28,20</td><td>13:15</td><td>28,50</td></tr> <tr><td>13:20</td><td>28,20</td><td>13:25</td><td>28,50</td><td>13:30</td><td>28,80</td><td>13:35</td><td>29,10</td></tr> <tr><td>13:40</td><td>28,80</td><td>13:45</td><td>29,10</td><td>13:50</td><td>29,40</td><td>13:55</td><td>29,70</td></tr> <tr><td>14:00</td><td>29,40</td><td>14:05</td><td>29,70</td><td>14:10</td><td>30,00</td><td>14:15</td><td>30,30</td></tr> <tr><td>14:20</td><td>30,00</td><td>14:25</td><td>30,30</td><td>14:30</td><td>30,60</td><td>14:35</td><td>30,90</td></tr> <tr><td>14:40</td><td>30,60</td><td>14:45</td><td>30,90</td><td>14:50</td><td>31,20</td><td>14:55</td><td>31,50</td></tr> <tr><td>15:00</td><td>31,20</td><td>15:05</td><td>31,50</td><td>15:10</td><td>31,80</td><td>15:15</td><td>32,10</td></tr> <tr><td>15:20</td><td>31,80</td><td>15:25</td><td>32,10</td><td>15:30</td><td>32,40</td><td>15:35</td><td>32,70</td></tr> <tr><td>15:40</td><td>32,40</td><td>15:45</td><td>32,70</td><td>15:50</td><td>33,00</td><td>15:55</td><td>33,30</td></tr> <tr><td>16:00</td><td>33,00</td><td>16:05</td><td>33,30</td><td>16:10</td><td>33,60</td><td>16:15</td><td>33,90</td></tr> </tbody> </table>							čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]	0:00	0,00	0:05	0,02	0:10	0,04	0:15	0,07	0:20	0,10	0:25	0,18	0:30	0,27	0:35	0,37	0:40	0,47	0:45	0,79	0:50	1,16	0:55	1,62	1:00	1,80	1:05	2,10	1:10	2,40	1:15	2,70	1:20	2,80	1:25	3,15	1:30	3,45	1:35	3,75	1:40	3,80	1:45	4,05	1:50	4,35	1:55	4,65	2:00	4,70	2:05	5,10	2:10	5,40	2:15	5,70	2:20	6,40	2:25	6,75	2:30	7,10	2:35	7,45	2:40	7,40	2:45	7,80	2:50	8,10	2:55	8,40	3:00	8,40	3:05	8,80	3:10	9,30	3:15	9,60	3:20	9,40	3:25	9,90	3:30	10,20	3:35	10,50	3:40	10,40	3:45	10,80	3:50	11,40	3:55	11,70	4:00	11,40	4:05	11,70	4:10	12,00	4:15	12,30	4:20	12,00	4:25	12,30	4:30	12,60	4:35	12,90	4:40	12,60	4:45	12,90	4:50	13,20	4:55	13,50	5:00	13,20	5:05	13,50	5:10	13,80	5:15	14,10	5:20	13,80	5:25	14,10	5:30	14,40	5:35	14,70	5:40	14,40	5:45	14,70	5:50	15,00	5:55	15,30	6:00	15,00	6:05	15,30	6:10	15,60	6:15	15,90	6:20	15,60	6:25	15,90	6:30	16,20	6:35	16,50	6:40	16,20	6:45	16,50	6:50	16,80	6:55	17,10	7:00	16,80	7:05	17,10	7:10	17,40	7:15	17,70	7:20	17,40	7:25	17,70	7:30	18,00	7:35	18,30	7:40	18,00	7:45	18,30	7:50	18,60	7:55	18,90	8:00	18,60	8:05	18,90	8:10	19,20	8:15	19,50	8:20	19,20	8:25	19,50	8:30	19,80	8:35	20,10	8:40	19,80	8:45	20,10	8:50	20,40	8:55	20,70	9:00	20,40	9:05	20,70	9:10	21,00	9:15	21,30	9:20	21,00	9:25	21,30	9:30	21,60	9:35	21,90	9:40	21,60	9:45	21,90	9:50	22,20	9:55	22,50	10:00	22,20	10:05	22,50	10:10	22,80	10:15	23,10	10:20	22,80	10:25	23,10	10:30	23,40	10:35	23,70	10:40	23,40	10:45	23,70	10:50	24,00	10:55	24,30	11:00	24,00	11:05	24,30	11:10	24,60	11:15	24,90	11:20	24,60	11:25	24,90	11:30	25,20	11:35	25,50	11:40	25,20	11:45	25,50	11:50	25,80	11:55	26,10	12:00	25,80	12:05	26,10	12:10	26,40	12:15	26,70	12:20	26,40	12:25	26,70	12:30	27,00	12:35	27,30	12:40	27,00	12:45	27,30	12:50	27,60	12:55	27,90	13:00	27,60	13:05	27,90	13:10	28,20	13:15	28,50	13:20	28,20	13:25	28,50	13:30	28,80	13:35	29,10	13:40	28,80	13:45	29,10	13:50	29,40	13:55	29,70	14:00	29,40	14:05	29,70	14:10	30,00	14:15	30,30	14:20	30,00	14:25	30,30	14:30	30,60	14:35	30,90	14:40	30,60	14:45	30,90	14:50	31,20	14:55	31,50	15:00	31,20	15:05	31,50	15:10	31,80	15:15	32,10	15:20	31,80	15:25	32,10	15:30	32,40	15:35	32,70	15:40	32,40	15:45	32,70	15:50	33,00	15:55	33,30	16:00	33,00	16:05	33,30	16:10	33,60	16:15	33,90
čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]	čas	výška výtoky [cm]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
0:00	0,00	0:05	0,02	0:10	0,04	0:15	0,07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
0:20	0,10	0:25	0,18	0:30	0,27	0:35	0,37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
0:40	0,47	0:45	0,79	0:50	1,16	0:55	1,62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1:00	1,80	1:05	2,10	1:10	2,40	1:15	2,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1:20	2,80	1:25	3,15	1:30	3,45	1:35	3,75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1:40	3,80	1:45	4,05	1:50	4,35	1:55	4,65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
2:00	4,70	2:05	5,10	2:10	5,40	2:15	5,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
2:20	6,40	2:25	6,75	2:30	7,10	2:35	7,45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
2:40	7,40	2:45	7,80	2:50	8,10	2:55	8,40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
3:00	8,40	3:05	8,80	3:10	9,30	3:15	9,60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
3:20	9,40	3:25	9,90	3:30	10,20	3:35	10,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
3:40	10,40	3:45	10,80	3:50	11,40	3:55	11,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
4:00	11,40	4:05	11,70	4:10	12,00	4:15	12,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
4:20	12,00	4:25	12,30	4:30	12,60	4:35	12,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
4:40	12,60	4:45	12,90	4:50	13,20	4:55	13,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
5:00	13,20	5:05	13,50	5:10	13,80	5:15	14,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
5:20	13,80	5:25	14,10	5:30	14,40	5:35	14,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
5:40	14,40	5:45	14,70	5:50	15,00	5:55	15,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
6:00	15,00	6:05	15,30	6:10	15,60	6:15	15,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
6:20	15,60	6:25	15,90	6:30	16,20	6:35	16,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
6:40	16,20	6:45	16,50	6:50	16,80	6:55	17,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
7:00	16,80	7:05	17,10	7:10	17,40	7:15	17,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
7:20	17,40	7:25	17,70	7:30	18,00	7:35	18,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
7:40	18,00	7:45	18,30	7:50	18,60	7:55	18,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
8:00	18,60	8:05	18,90	8:10	19,20	8:15	19,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
8:20	19,20	8:25	19,50	8:30	19,80	8:35	20,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
8:40	19,80	8:45	20,10	8:50	20,40	8:55	20,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
9:00	20,40	9:05	20,70	9:10	21,00	9:15	21,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
9:20	21,00	9:25	21,30	9:30	21,60	9:35	21,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
9:40	21,60	9:45	21,90	9:50	22,20	9:55	22,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
10:00	22,20	10:05	22,50	10:10	22,80	10:15	23,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
10:20	22,80	10:25	23,10	10:30	23,40	10:35	23,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
10:40	23,40	10:45	23,70	10:50	24,00	10:55	24,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
11:00	24,00	11:05	24,30	11:10	24,60	11:15	24,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
11:20	24,60	11:25	24,90	11:30	25,20	11:35	25,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
11:40	25,20	11:45	25,50	11:50	25,80	11:55	26,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
12:00	25,80	12:05	26,10	12:10	26,40	12:15	26,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
12:20	26,40	12:25	26,70	12:30	27,00	12:35	27,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
12:40	27,00	12:45	27,30	12:50	27,60	12:55	27,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
13:00	27,60	13:05	27,90	13:10	28,20	13:15	28,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
13:20	28,20	13:25	28,50	13:30	28,80	13:35	29,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
13:40	28,80	13:45	29,10	13:50	29,40	13:55	29,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
14:00	29,40	14:05	29,70	14:10	30,00	14:15	30,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
14:20	30,00	14:25	30,30	14:30	30,60	14:35	30,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
14:40	30,60	14:45	30,90	14:50	31,20	14:55	31,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
15:00	31,20	15:05	31,50	15:10	31,80	15:15	32,10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
15:20	31,80	15:25	32,10	15:30	32,40	15:35	32,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
15:40	32,40	15:45	32,70	15:50	33,00	15:55	33,30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
16:00	33,00	16:05	33,30	16:10	33,60	16:15	33,90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Poznámky k měření: 1,8 - první kíl, 1,8 - 2,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Vytiskněte na Filpově Hutě v únoru roku 2008																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

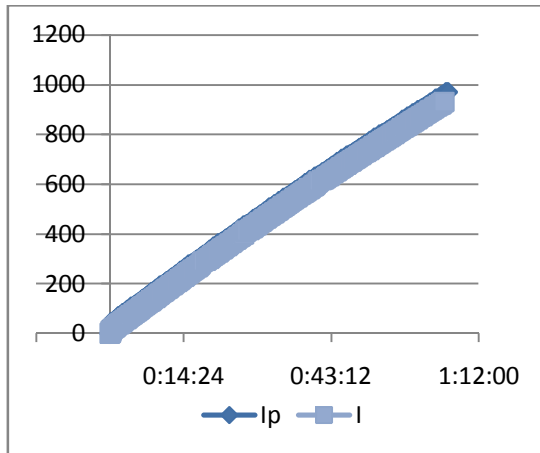
Průměr > 10 mm

×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2
8,4	8,6	8,3	8,7	8,6	8,6	8,8	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2

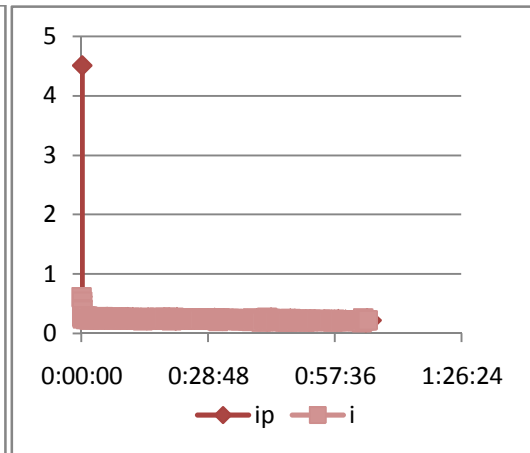
978 g/cm³ 3,1 cm

Příloha 2 Grafy vyhodnocené infiltrace I, I_p a i, i_p

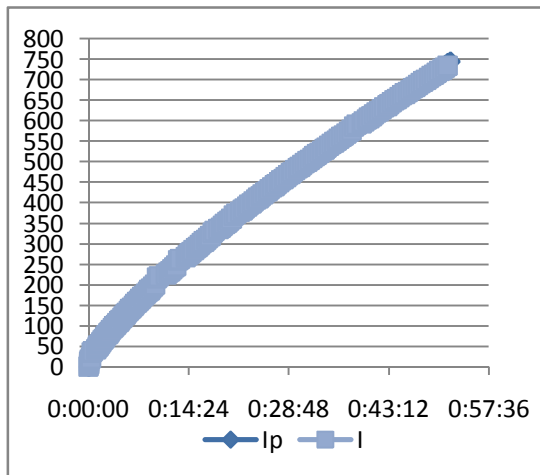
Obr. č. 31: Kumulativní infiltrace měření 1



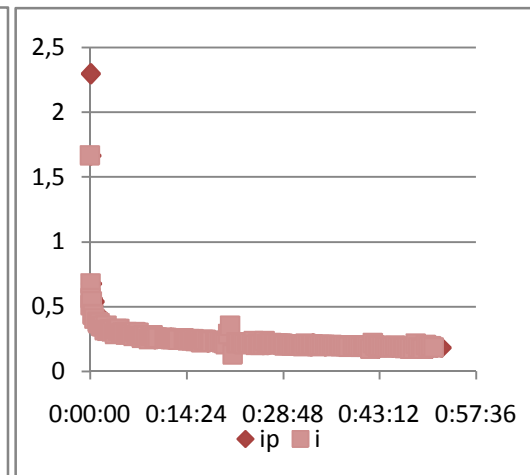
Obr. č. 32: Intenzita infiltrace měření 1



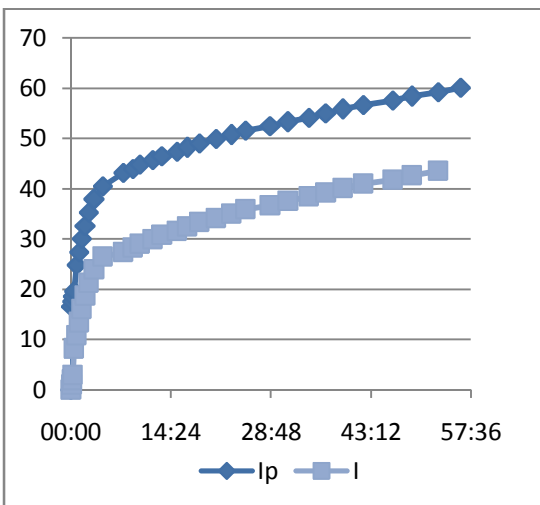
Obr. č. 33: Kumulativní infiltrace měření 3



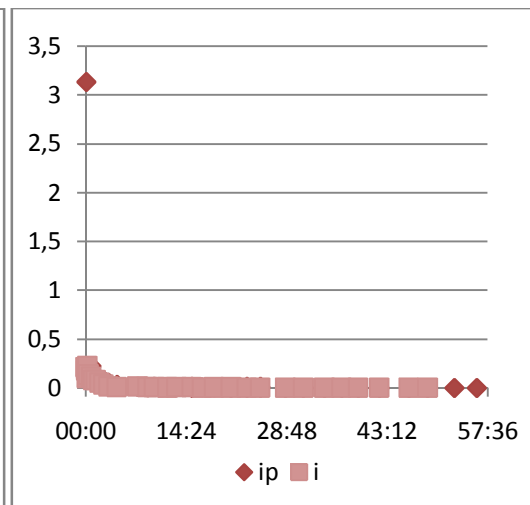
Obr. č. 34: Intenzita infiltrace měření 3



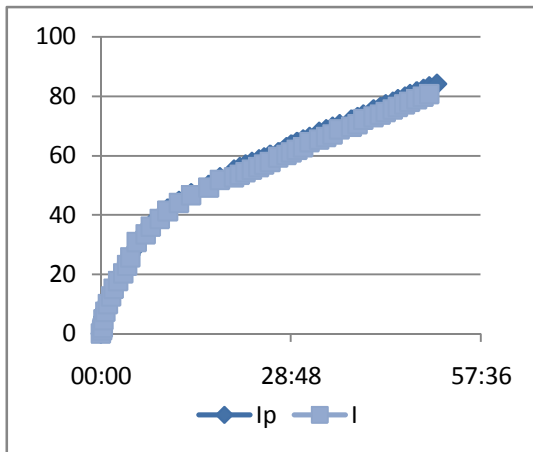
Obr. č. 35: Kumulativní infiltrace měření 5



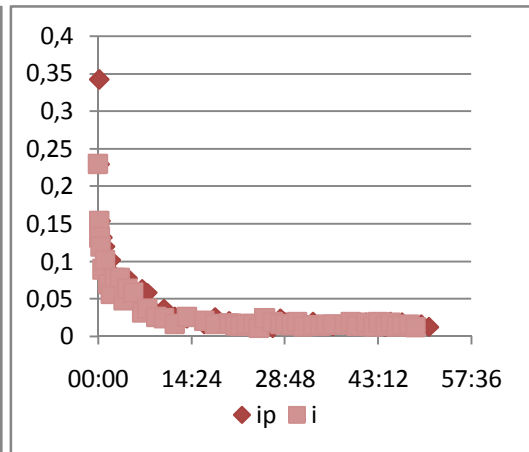
Obr. č. 36: Intenzita infiltrace měření 5



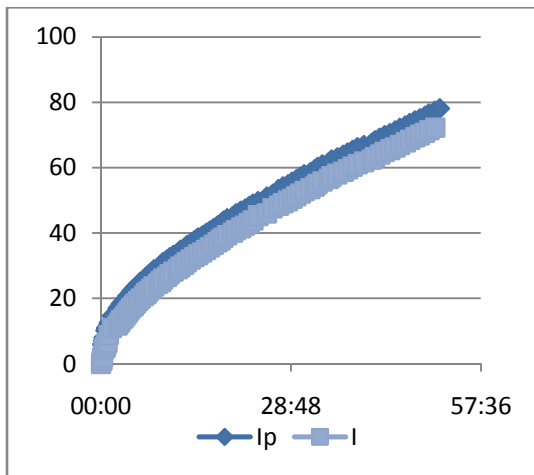
Obr. č. 37: Kumulativní infiltrace měření 6



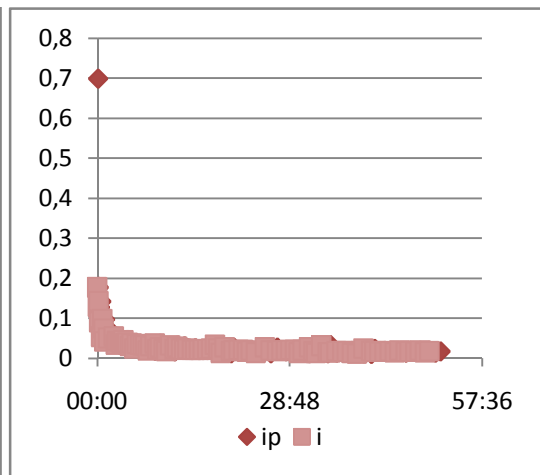
Obr. č. 38: Intenzita infiltrace měření 6



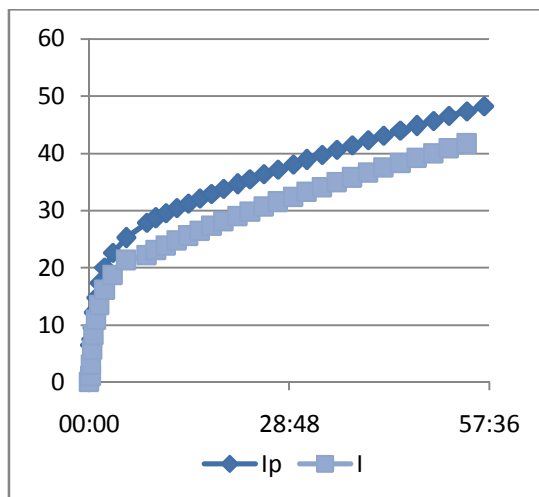
Obr. č. 39: Kumulativní infiltrace měření 7



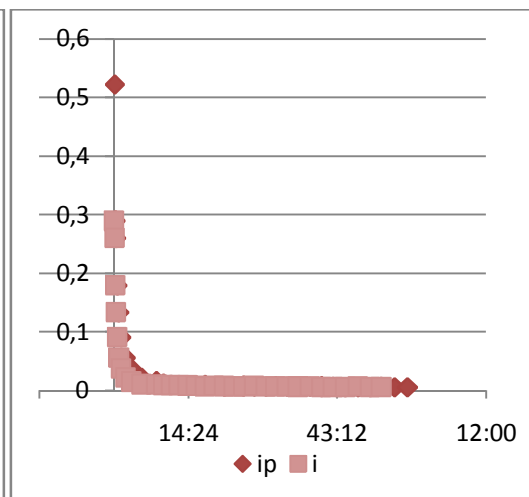
Obr. č. 40: Intenzita infiltrace měření 7



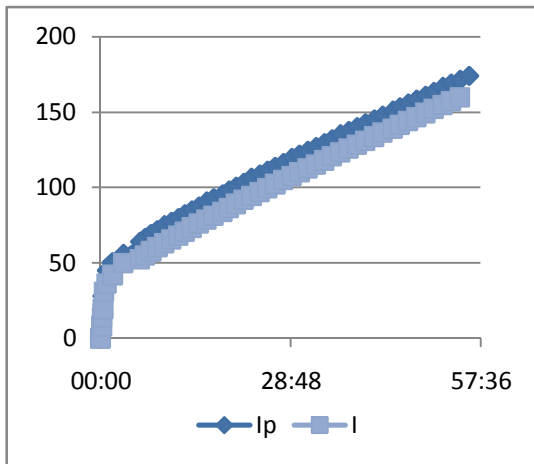
Obr. č. 41: Kumulativní infiltrace měření 9



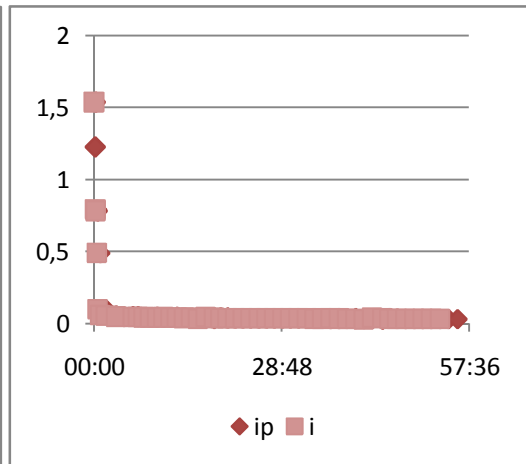
Obr. č. 42: Intenzita infiltrace měření 9



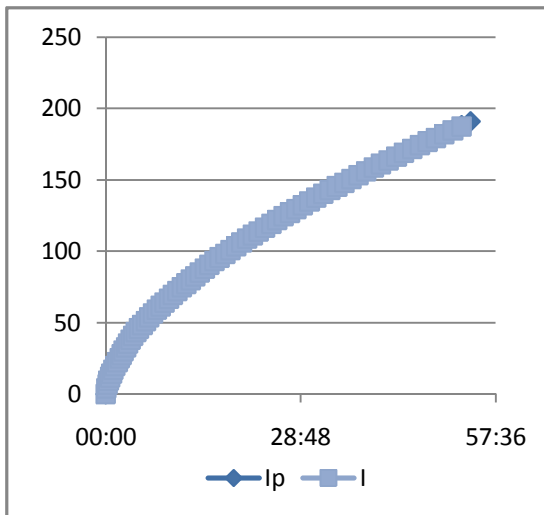
Obr. č. 43: Kumulativní infiltrace měření 10



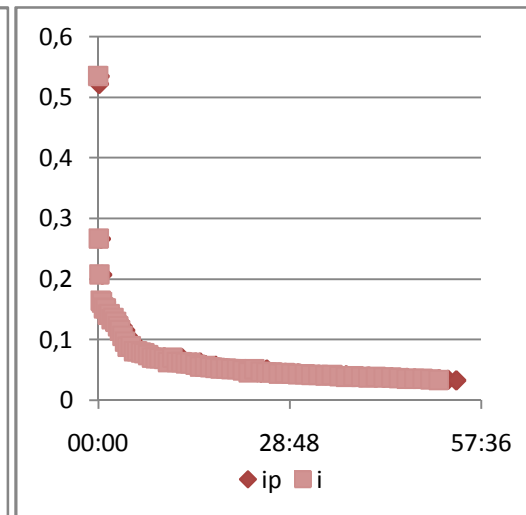
Obr. č. 44: Intenzita infiltrace měření 10



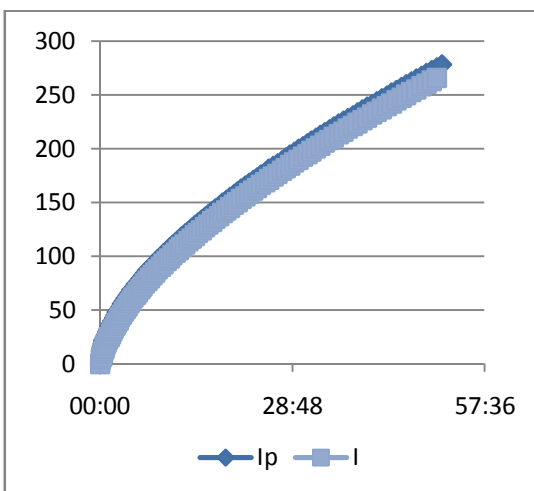
Obr. č. 45: Kumulativní infiltrace měření 11



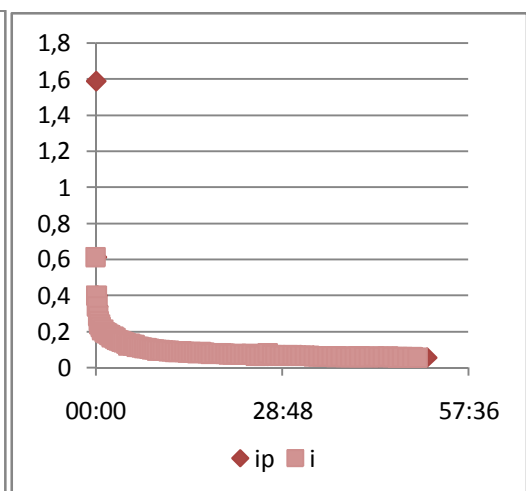
Obr. č. 46: Intenzita infiltrace měření 11



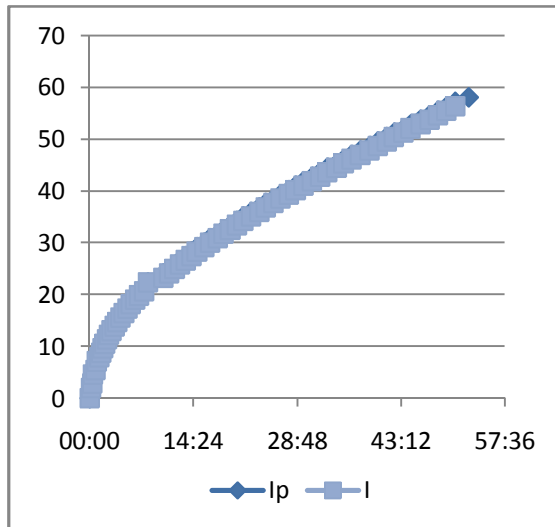
Obr. č. 47: Kumulativní infiltrace měření 12



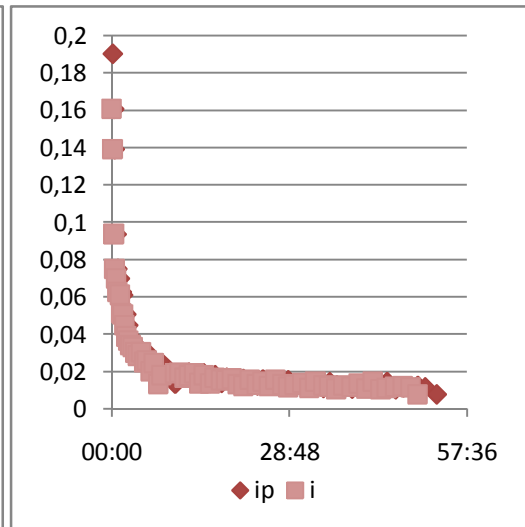
Obr. č. 48: Intenzita infiltrace měření 12



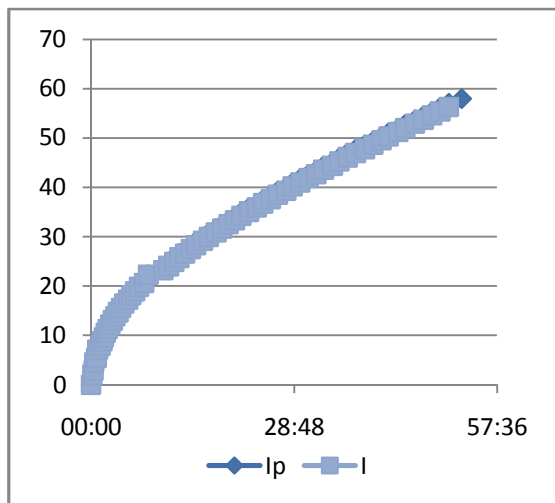
Obr. č. 49: Kumulativní infiltrace měření 13



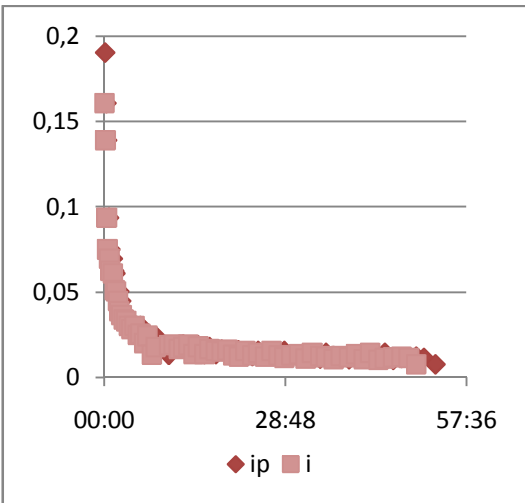
Obr. č. 50: Intenzita infiltrace měření 13



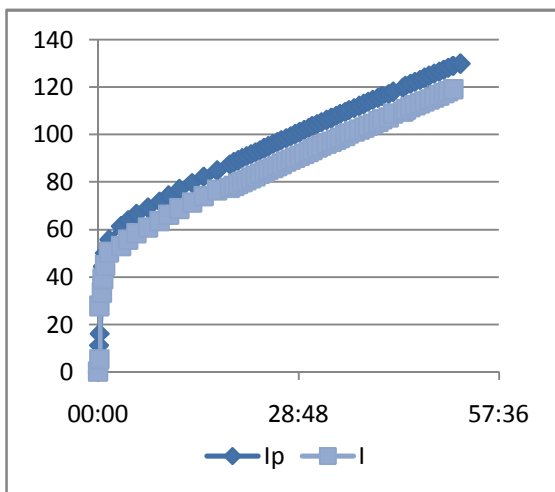
Obr. č. 51: Kumulativní infiltrace měření 14



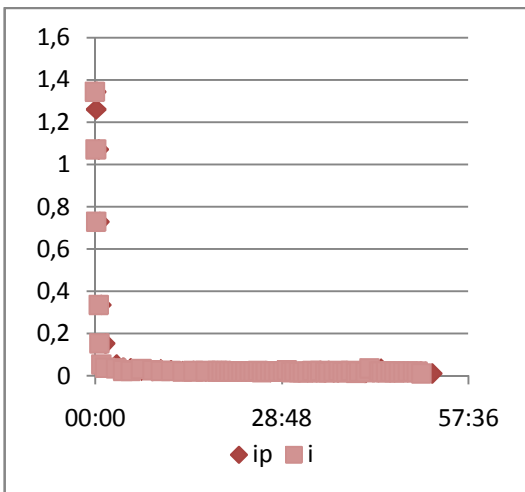
Obr. č. 52: Intenzita infiltrace měření 14



Obr. č. 53: Kumulativní infiltrace měření 15



Obr. č. 54: Intenzita infiltrace měření 15



Příloha 3 Fotodokumentace

Foto č. 6: Rozložené pomůcky na měření infiltrace



Foto č. 7: Detail pomůcek připravených k měření infiltrace



Foto č. 8: Infiltrační válec po konci měření s dosakující vodou



Foto č. 9: Pohled na experimentální plochu Šardic před orbou



Foto č. 10: Pohled na experimentální plochu Šardic po orbě z druhého kopce



Foto č. 11: Měření 5 způsob orby: diskování(poslední diskování proběhlo 29.6.2016, foto z 30. 6. 2016)



Foto č. 12: Měření 6– způsob orby: kypření



Foto č. 13: Měření 6 – pohled do válce po infiltračním pokusu (je zde vidět, jak zareagovala půda, jak do půdy zapadala/propadala se tyčka na měření topografie)



Foto č. 14: Měření 7 – připraveno k měření způsob orby: pluh



Foto č. 15: měření 12 – pohled na půdu po infiltračním pokusu (s infiltračním válci byla vytažena i půda vně)

